

# Lückenlose Entstehungsgeschichte

Der Sloan Digital Sky Survey veröffentlichte kürzlich eine umfassende Analyse der bislang größten dreidimensionalen Karte des Universums.

Matthias Steinmetz

Auf großen Skalen ist das Universum homogen und isotrop, es erscheint also einem Beobachter an jedem Ort und in jeder Richtung gleichartig. Die Geburtsstunde der modernen Kosmologie schlug 1917, als Albert Einstein erstmals die Allgemeine Relativitätstheorie auf die Entwicklung des Universums als Ganzes anwendete [1]. Zu dieser Zeit widersprach das „kosmologische Prinzip“ der Homogenität und Isotropie allen damaligen empirischen Beobachtungen. Heute ist die Isotropie des Kosmos dank Satellitenexperimenten wie COBE, WMAP und Planck, welche die kosmische Hintergrundstrahlung vermessen haben, sowie dank großräumiger Durchmusterungen von Galaxien und Quasaren mit hervorragender Präzision bestätigt.

Auf kleineren Skalen erscheint das Universum dagegen durchaus strukturiert: So gibt es Galaxien und Galaxienhaufen, die zudem nicht gleichförmig im Kosmos verteilt sind, sondern sich entlang eines von Filamenten durchzogenen kosmischen Netzwerks sammeln, dem „Cosmic Web“. Ein solches Netzwerk kann durch die Wirkung der Gravitation aus anfänglich zufälligen Anfangsbedingungen entstehen: In der Tat scheint die Gravitation unser Universum auf Längenskalen oberhalb von rund zehn Millionen Lichtjahren maßgeblich geformt zu haben [2, 3], moduliert durch kleinere Beiträge von Strahlung, Gas und Neutrinos.

Die Unregelmäßigkeiten in der Dichte und ihre Entwicklung mit der Zeit sind nicht nur von fundamentalem Interesse, um zu verstehen, wie das Universum aus einem anfänglich fast strukturlosen Zustand Objekte wie Sterne oder Galaxien bilden konnte. Aus der Zeitabhängigkeit des Leistungsspektrums der Dichtefluktuationen lassen sich auch die kosmologischen Parameter und



Das 2,5-m-Sloan-Teleskop in New Mexico durchforstete den Nachthimmel 20 Jahre lang.

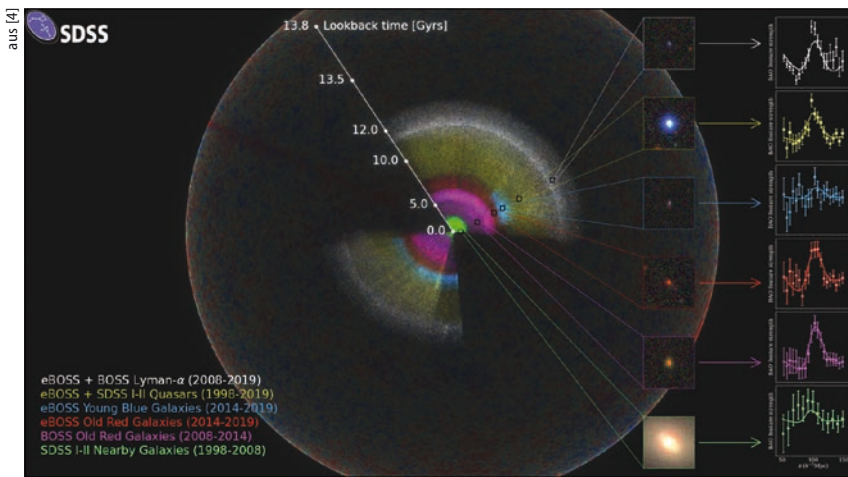
Maurice Clark

somit die relativen Beiträge von gewöhnlicher Materie, Dunkler Materie, Strahlung, Neutrinos und Dunkler Energie bestimmen. Zudem sind in der räumlichen Verteilung charakteristische Längenskalen eingepreßt, die als kosmische „Zollstöcke“ die Geometrie des Kosmos abhängig von der kosmischen Epoche vermessen können. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Wellenlänge der baryonischen akustischen Oszillationen. Diese haben ihren Ursprung in der kosmischen Hintergrundstrahlung: Durch die gegenseitige Wirkung von Gravitationsanziehung der Dunklen Materie und auswärts gerichteter Druckkräfte des ionisierten Plasmas entstehen Schallwellen. Deren Wellenlänge leitet sich aus der Größe des Schallhorizonts während der damaligen Epoche etwa 400 000 Jahre nach dem Urknall ab. Aufgrund der Ausdehnung des Kosmos entspricht dies heute einer Längenskala von etwa 490 Millionen Lichtjahren.

Die Vermessung des lokalen Universums bis zu Distanzen von etwa zwei Milliarden Lichtjahren war Anfang der 1990er-Jahre eine der wesentlichen Motivationen für den

Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Ziel dabei war es, mit einem eigens dafür gebauten 2,5-Meter-Teleskop in New Mexico, einer Weitwinkel-Digitalkamera und einem auf Glasfasern basierten Multi-Objekt-Spektrographen eine dreidimensionale Karte für Millionen von Galaxien zu erstellen, die Amplitude der Dichte-Inhomogenitäten zu bestimmen und charakteristische Längenskalen zu messen. Essenziell hierfür war die Verbindung von Methoden der Digitalfotografie, um die Galaxienpositionen am Himmel zu bestimmen, und der Spektroskopie, um die Rotverschiebung und damit den Abstand zu messen.

Die Ergebnisse des SDSS waren so überzeugend, dass die Durchmusterung sukzessiv erweitert wurde. Statt der ursprünglich geplanten fünf Jahre durchforstete das Sloan-Teleskop den Nachthimmel zwanzig Jahre lang bis zu Entfernungen von über 12 Milliarden Lichtjahren. Die Fokussierung auf verschiedene Populationen kosmischer Objekte ermöglichte es, die Verteilung der Materie kontinuierlich über die letzten 12 Milliarden Jahre der kosmischen Geschichte zu vermessen (**Abb. 1**): Benachbarte Ga-



**Abb. 1** Die Verteilung der verschiedenen Populationen offenbart die Wellenlänge der baryonischen akustischen Oszillationen. Von innen nach außen sind nahe Galaxien, alte rote Galaxien, junge blaue Galaxien, Quasare und Lyman-alpha-Absorber zu sehen.

Galaxien liefern ein Bild über die letzten zwei Milliarden Jahre des Kosmos. Alte rote Galaxien taxieren die Epoche vor zwei bis sieben Milliarden Jahren, während junge, im Ruhesystem blau erscheinende Galaxien uns in Epochen vor sechs bis acht Milliarden Jahren zurückblicken lassen. Quasare, die hellsten Leuchttürme im Kosmos, erlauben es, das Universum vor sieben bis elf Milliarden Jahre zu erkunden, und die ins optische Licht verschobene Lyman-alpha-Absorption von Hintergrundquasaren führt uns elf bis zwölf Milliarden Jahre zurück – also in eine Epoche, als das Universum weniger als zwei Milliarden Jahre alt war.

Somit ist es möglich, fast 90 Prozent des Alters unseres Kosmos kontinuierlich zu vermessen, ergänzt um einen weiteren Messpunkt 400 000 Jahre nach dem Urknall durch die kosmische Hintergrundstrahlung. In diesen zwölf Milliarden Jahren ist das Universum von einer über die Gravitation abgebremsten Ausdehnung (bis vor rund sechs Milliarden Jahren) in den heutigen Zustand übergegangen, also in eine durch die kosmologische Konstante beschleunigte Expansion.

Eine Reihe von Publikationen enthält nun die wichtigsten Ergebnisse dieser 20-jährigen Analyse, die wesentlichen Ergebnisse sind in [4] zusammengefasst.

Der SDSS misst die rotverschiebungsabhängige dreidimensionale Verteilung der Galaxien, d. h. die Amplitude des Leistungsspektrums

der Dichtefluktuationen sowie die Winkel, unter denen charakteristische Längenskalen wie die der baryonischen akustischen Oszillationen erscheinen. Damit misst der SDSS verschiedene Kombinationen der relevanten kosmologischen Parameter, woraus sich diese wiederum einzeln extrahieren lassen. Die sich ergebenden kosmologischen Parameter sind konsistent mit dem Konkordanz-LCDM-Modell. Darin ist das Fluktuationsspektrum durch kalte Dunkle Materie dominiert und der Energieinhalt heute zu 70 Prozent durch die kosmologische Konstante (oder Dunkle Energie) bestimmt. Zudem weist es keine räumliche Krümmung auf. Die Ergebnisse ändern sich nicht signifikant, wenn einzelne Parameter offen bleiben: Ohne Vorab-Bedingungen ist die Raumkrümmung weiterhin klein, und ein dynamisches Modell für die Dunkle Energie – üblicherweise charakterisiert durch den Parameter  $w(z)$  in der kosmischen Zustandsgleichung  $P = w\rho c^2$  – führt zu einem Modell, das konsistent mit  $w = -1$  ist, also einer kosmologischen Konstante.

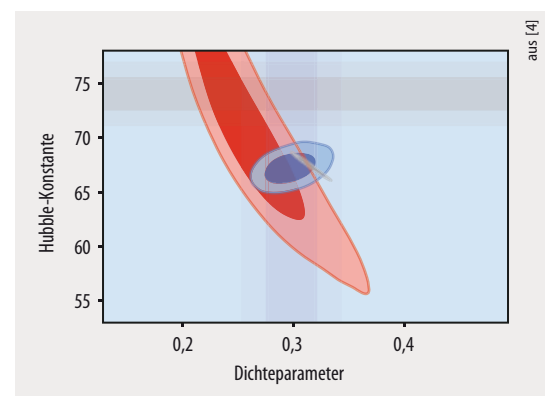
Die Ergebnisse sind besonders eindrucksvoll in Kombination mit den Messungen anderer Projekte, insbesondere mit den Planck-Daten für die kosmische Hintergrundstrahlung und den Supernova-Daten zur Vermessung der Ausdehnungsgeschichte des Kosmos. In dieser Kombination verringern sich alle bekannten Mess-

ungenauigkeiten signifikant, teilweise um bis zu eine Größenordnung. So ergeben sich folgende Resultate:

- ein Anteil von  $68,98 \pm 0,61\%$  (68 % Konfidenz) der Dunklen Energie am Gesamtenergieinhalt des Kosmos,
- eine räumlich flache Geometrie mit einer Krümmung von  $-0,0001 \pm 0,0018$  (68 % Konfidenz),
- eine praktisch zeitunabhängige Dunkle Energie mit  $w = -1,026 \pm 0,033$  (68 % Konfidenz) und
- eine obere Grenze für die Summe der Neutrinomassen über alle Neutrinofamilien von  $\sum m_\nu c^2 < 0,125$  eV (95 % Konfidenz).

Ein fundamentaler kosmologischer Parameter wurde noch nicht angesprochen: die Hubble-Konstante  $H_0$ , also die Ausdehnungsrate des Universums. Die letzten Jahre haben zu einer Diskrepanz in der Bestimmung dieser Größe geführt zwischen Messungen, die auf der lokalen Entfernungsskala beruhen, und solchen basierend auf Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung [5].

Da der SDSS in radialer Richtung Rotverschiebungen misst und keine Entfernungen per se, liefert er keine unabhängige Bestimmung der Hubble-Konstante  $H_0$ . Sie lässt sich aber aus der Kombination der SDSS-Ergebnisse mit denen des Planck-Satelliten und der Supernova-Daten ableiten (**Abb. 2**). Hierbei ergibt sich ein Wert von  $67,87 \pm 0,86$  (km/s)/Mpc, der konsistent ist mit den (niedrigen)



**Abb. 2** Die Hubble-Konstante  $H_0$  ergibt sich aus Messungen des Dark Energy Survey (rot), des Planck-Satelliten (grau) und von SDSS (blau). Die Schattierungen entsprechen den 68%- und 95%-Konfidenzintervallen. Zum Vergleich sind die Hubble-Konstante aus lokalen Messungen mittels Cepheiden (horizontaler Balken, [5]) und der Dichteparameter aus Supernovae Ia (vertikal, [6]) angegeben.

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

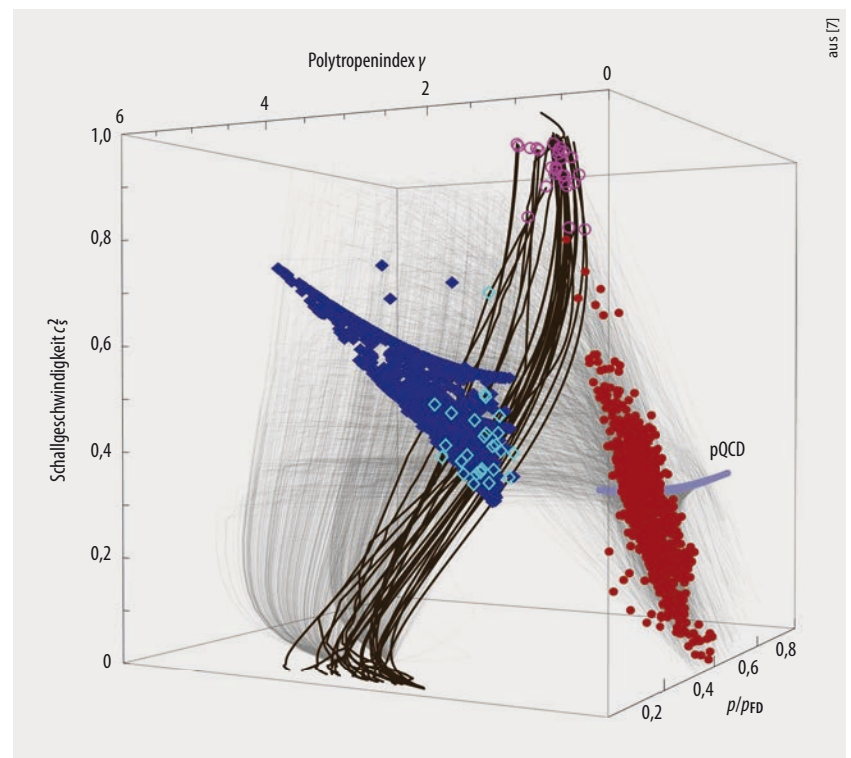
**Prof. Dr. Matthias Steinmetz**,  
Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam,  
An der Sternwarte 16, 14482 Potsdam

# 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  $\gamma$ , 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).