

DUNKLE MATERIE

Spurensuche im All

Astronomische Beobachtungen führten zum Konzept der Dunklen Materie und geben heute Hinweise auf deren Eigenschaften.

Ewald Puchwein und Mark Vogelsberger

Die Struktur und Dynamik von Galaxien und Galaxienhaufen lässt sich im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie nur erklären, wenn es neben der sichtbaren auch eine unsichtbare Materie gibt, die eine zusätzliche Gravitationsanziehung ausübt. Diese Dunkle Materie muss aus anderen Teilchen als gewöhnliche Materie bestehen. Astronomische Beobachtungen erlauben es, deren Eigenschaften zu ergründen.

Schon die ersten Hinweise, dass es eine Dunkle Materie geben muss, stammen aus astronomischen Beobachtungen. Fritz Zwicky bestimmte in den 1930er-Jahren überraschend hohe Geschwindigkeiten für Galaxien in Galaxienhaufen. Diese Werte lassen sich in gravitativ gebundenen Objekten nur erklären, wenn über die sichtbare Materie hinaus eine gravitative Anziehung vorliegt, welche die Galaxienhaufen zusammenhält. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Rotationsgeschwindigkeiten von Spiralgalaxien, die im Außenbereich schneller rotieren als erwartet. Das deutet ebenfalls auf eine zusätzliche unsichtbare Materie

hin. Auch die Häufigkeit leichter Elemente im Universum passt nur dann mit den Vorhersagen des Urknallmodells zusammen, wenn die benötigte zusätzliche Masse nicht in Form gewöhnlicher Materieteilchen, beispielsweise Protonen, Neutronen und Elektronen, vorliegt. Gäbe es mehr gewöhnliche Materie im Universum, hätte sich eine andere Elementverteilung herausgebildet, unter anderem mit mehr Helium und weniger Deuterium. In unserem Universum sollte es demnach Teilchen einer Dunklen Materie geben.

Um die Strukturbildung im Universum zu erklären, muss es im kosmologischen Standardmodell Dunkle Materie geben, die neben ihrer gravitativen Wechselwirkung nur sehr schwach mit normaler Materie agiert. Außerdem sollte die Dunkle Materie vergleichsweise kalt sein. Sie darf also in der Frühzeit des Universums höchstens eine kleine Geschwindigkeitsdispersion aufweisen – zu viel ungeordnete Bewegung würde verhindern, dass aus kleinen Dichtefluktuationen die heute beobachteten Strukturen entstehen. Kandidaten für kalte Dunkle Materie sind beispielsweise Neutralinos oder Axionen. In den letzten Jahrzehnten ka-

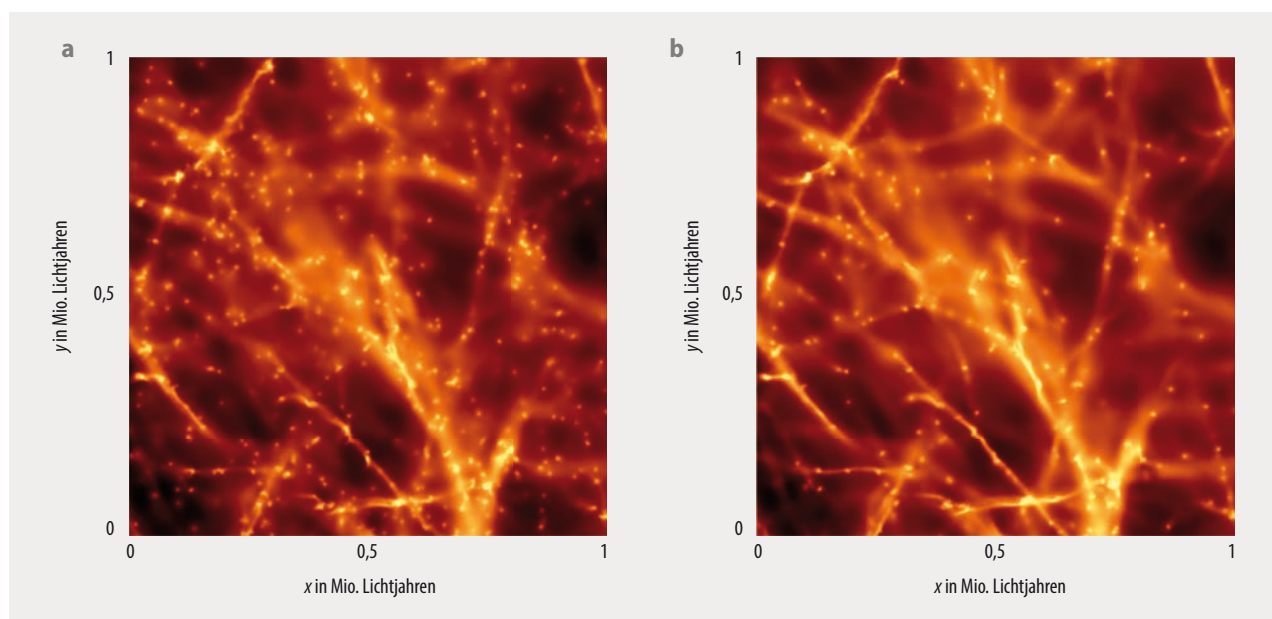


Abb. 1 Etwa 1,2 Milliarden Jahre nach dem Urknall (Rotverschiebung $z \approx 5$) hätte sich das Universum unterschiedlich entwickelt, abhängig davon ob kalte Dunkle Materie (a) oder warme Dunkle Materie (b, Teilchenmasse: 3 keV) die Strukturbildung antreibt. Kalte Dunkle Materie würde kleinskaligere Strukturen erzeugen, wie hier anhand von Simulationen der Verteilung des intergalaktischen Gases gezeigt.

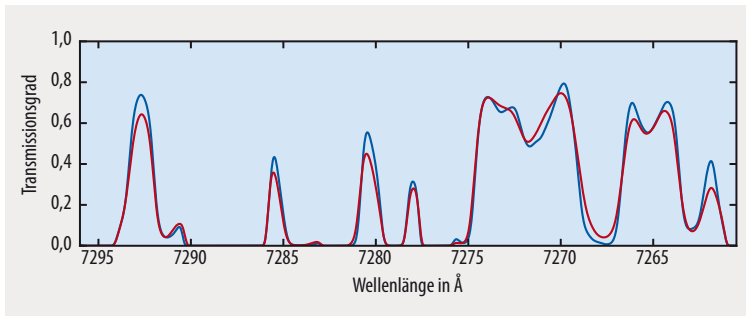


Abb. 2 In Simulationen ergibt sich für den Lyman- α -Wald im Fall von warmer Dunkler Materie (rot) eine weniger kleinskalige Struktur als bei kalter Dunkler Materie (blau). Ein Vergleich mit den gemessenen statistischen Eigenschaften des Lyman- α -Waldes erlaubt es, die Teilchenmasse der Dunklen Materie abzuleiten.

men aber auch zahlreiche Modelle auf, die über das Konzept der kalten Dunklen Materie hinausgehen.

Grund dafür sind Diskrepanzen zwischen astronomischen Beobachtungen und theoretischen Vorhersagen der Verteilung kalter Dunkler Materie in der Umgebung der Milchstraße, also im kosmischen Maßstab betrachtet auf kleinen Längenskalen [1]. Beispielsweise zeigen Computersimulationen, dass die Halostrukturen kalter Dunkler Materie zahlreiche weitere sogenannte Subhalos enthalten (**Abb. 1**) – wesentlich mehr, als sich aus der Zahl der beobachteten Satellitengalaxien der Milchstraße ergeben [2]. Doch das Fehlen dieser Satelliten heißt nicht zwingend, dass auch die Subhalos nicht existieren. Eventuell sind lediglich nicht alle Subhalos in der Lage, sichtbare Galaxien zu beherbergen, weil sie das dafür benötigte Gas durch ihre Gravitationskraft nicht binden können. Ein weiterer Widerspruch folgt aus dem charakteristischen Dichteprofil, welches Simulationen für die Halos von kalter Dunkler Materie vorhersagen [3]. Beobachtungen legen nahe, dass die Materie in den Zentren von Galaxien anders verteilt ist, als es die theoretischen Modelle vorhergesagen. Möglicherweise bewegen Supernova-Explosionen große Gasmengen im Galaxienzentrum und beeinflussen durch das so veränderte Gravitationsfeld auch die Dichteverteilung der Dunklen Materie. Zumindest würde ein dadurch im Zentralbereich flacheres Dichteprofil besser mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen [4].

Weitere „kleinskalige“ Abweichungen von Vorhersagen und Beobachtungen lassen sich potenziell auf ähnliche Weise innerhalb des Modells der kalten Dunklen Materie erklären. Alternative Ansätze führen andere Formen Dunkler Materie ein, die auf kleinen Längenskalen ein modifiziertes Verhalten zeigen.

Kalt oder warm? Das ist hier die Frage...

Beispielsweise zeichnet sich warme Dunkle Materie durch höhere Geschwindigkeiten im frühen Universum aus als kalte Dunkle Materie. Dadurch bilden sich weniger Dichtefluktuationen auf sehr kleinen Skalen, und die Halos der Dunklen Materie enthalten weniger Substrukturen [5]. Das ist besonders im Hinblick auf die fehlenden Satellitengalaxien interessant. Hier können astronomische Beobachtungen die Modelle einschränken, indem die kleinskalige

Verteilung von Materie im Universum gemessen wird. Daraus lassen sich Grenzen für die Geschwindigkeitsdispersion bestimmen. Ein weiteres Kennzeichen kalter Dunkler Materie ist ihre äußerst schwache nicht-gravitative Wechselwirkung. Einige modifizierte Modelle führen daher Dunkle Materie ein, die stärker mit sich selbst wechselwirkt. Das reduziert die Dichte der Dunklen Materie im Zentrum von Halos und kann so die beobachteten flachen zentralen Dichteprofile erklären [6]. Manche Modelle nutzen auch eine gleichzeitig warme und stark selbstwechselwirkende Dunkle Materie. Eine aktuell viel diskutierte Idee ist beispielsweise, dass Dunkle Materie aus sehr leichten Teilchen mit einer Masse von etwa 10^{-22} eV besteht, die sich wie ein kosmologisches Bose-Einstein-Kondensat verhalten. Diese Teilchen stellen ein ultraleichtes bosonisches Skalarfeld mit einer sehr großen De-Broglie-Wellenlänge von einigen tausend Lichtjahren dar. Der Quantendruck in den Zentren der Halos von Dunkler Materie führt dann zu einer Abnahme der zentralen Dichte, was die Probleme auf kleinen Skalen löst [7].

Auch die Parameter einer Selbstwechselwirkung lassen sich durch astronomische Beobachtungen einschränken. Solche Beobachtungen haben also nicht nur die Einführung einer Dunklen Materie erfordert, sondern erlauben es auch, ihrer Natur auf die Spur zu kommen. Dabei handelt es sich nicht nur um Messungen von Geschwindigkeiten in Galaxien und Galaxienhaufen. Einige weitere Beispiele besprechen wir im Folgenden.

Ein Wald aus vielen Linien

Intergalaktisches Gas füllt mit niedriger Dichte den gesamten Raum zwischen Galaxien aus und kann Hinweise auf wesentliche Eigenschaften der Dunklen Materie liefern. Ein Großteil des Gases ist Wasserstoff. Ultraviolette Strahlung, die von Galaxien emittiert wird, ionisiert den Wasserstoff weitgehend. Ein kleiner Anteil von etwa 10^{-4} bleibt allerdings neutral und kann Licht mit der Wellenlänge der Lyman- α -Linie absorbieren ($\lambda_{\text{Ly-}\alpha} = 121,5$ nm). Das entspricht dem Übergang zwischen Grundzustand und erstem angeregten Zustand von Wasserstoff. Intergalaktische Gaswolken, die sich zwischen einer fernen Lichtquelle und dem Beobachter befinden, erzeugen einen ganzen Wald von Absorptionslinien im Spektrum der Quelle. Denn jede einzelne Wolke führt zu einer Lyman- α -Absorptionslinie mit einer anderen Rotverschiebung. Aus den Eigenschaften dieses Lyman- α -Waldes, der sich insbesondere in den Spektren weit entfernter Quasare zeigt, lässt sich auf die Dichteverteilung des intergalaktischen Gases schließen. Diese hängt von der gravitativen Wechselwirkung des Gases mit Dunkler Materie ab, die ebenfalls den intergalaktischen Raum füllt.

Wie bereits erwähnt, besitzt die Dichteverteilung warmer Dunkler Materie durch die höheren Geschwindigkeiten eine weniger kleinskalige Struktur. Weil Dichtestrukturen im intergalaktischen Gas in erster Linie dadurch entstehen, dass das Gas in die Potentialtöpfe der Gravitation Dunkler Materie fällt, ist dann auch die Verteilung des intergalaktischen Gases weniger kleinskalig – und der Lyman- α -Wald weist etwas weniger ausgeprägte Fluktuationen auf (**Abb. 2**).

Ein statistischer Vergleich beobachteter Spektren mit Vorhersagen kosmologischer Computersimulationen ergibt die anfängliche Geschwindigkeitsdispersion der Teilchen, aus denen die Dunkle Materie besteht. Betrachtet man nun verschiedene Kandidaten für Dunkle Materie, hängt die Dispersion eng mit der Teilchenmasse zusammen. Bisher sind die Beobachtungen konsistent mit kalter Dunkler Materie, also mit einer verschwindenden anfänglichen Geschwindigkeitsdispersion. Für WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) folgt daraus beispielsweise eine untere Grenze der Teilchenmasse von etwa 4 keV [8].

Für die Beobachtungen verbleiben allerdings systematische Unsicherheiten. Beispielsweise können Linien schwererer Elemente dem Lyman- α -Wald überlagert sein. Weitere Unsicherheiten ergeben sich aus der Temperaturentwicklung des intergalaktischen Gases. Ist das Gas heißer als angenommen, führt die stärkere Doppler-Verbreiterung der Absorptionslinien ebenfalls zu weniger kleinskaligen Strukturen – und umgekehrt. Für die Interpretation der Spektren ist auch der Zeitpunkt der kosmischen Reionisation wichtig. Das intergalaktische Gas wurde dabei durch die UV-Emission der ersten Galaxienpopulation aufgeheizt. Findet die Reionisation früh statt, löscht die hydrodynamische Reaktion des Gases auf die Temperaturerhöhung mehr kleinskalige Strukturen in der Dichteverteilung des Gases aus – und damit auch im Lyman- α -Wald. Ein besseres Verständnis der kosmischen Reionisation ist durch eine genauere Beobachtung früher Galaxienpopulationen möglich. Ebenso ist es erforderlich, die Spektren immer entfernterer und damit älterer Quasare in die Analyse einzubeziehen. Eine bessere numerische Modellierung des intergalaktischen Mediums kann ebenfalls helfen, die Eigenschaften der Dunklen Materie weiter einzuzugrenzen.

Verzerrte Bilder durch Gravitation

Die Gravitation dominiert nicht nur die Dynamik von Galaxien und Sternsystemen, sondern lenkt nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie auch Licht von einem geradlinigen Weg ab. Der Effekt hängt von zwei Eigenschaften der Gravitationslinse ab: ihrer Gesamtmasse und ihrer Massenverteilung. Eine Galaxie oder ein Galaxienhaufen verzerrt das Bild eines Objekts, in der Regel ebenfalls eine Galaxie, das entlang der Sichtlinie im Hintergrund liegt. Beispielsweise kann das Bild einer rundlichen Hintergrundgalaxie so sehr in die Länge gezerrt und gekrümmt sein, dass ihre sichtbare Form einer Banane gleicht. Je nach Position von Vorder- und Hintergrundgalaxien zur Sichtlinie können auch Mehrfachbilder derselben Galaxie entstehen (**Abb. 3**). Wenn alle Objekte genau auf einer Linie liegen, können sich die Mehrfachbilder zu einem vollständigen Ring um die Vordergrundgalaxie verbinden, einem sogenannten Einstein-Ring. Die stark vergrößerten und deutlich verzerrten Bilder der Hintergrundgalaxie reagieren dann besonders empfindlich auf Änderungen im Schwerfeld der Gravitationslinse. Diese treten beispielsweise auf, wenn kleine Subhalos aus Dunkler Materie um die Vordergrundgalaxie kreisen und sich nahe des Lichtweges befinden. Aus den Bildern lässt sich auf die Anzahl der Subhalos schließen

und damit auf die Eigenschaften der Dunklen Materie. Aktuelle Beobachtungen sind weitgehend konsistent mit kalter Dunkler Materie, brauchen also eher viele Subhalos in Modellrechnungen. Nahe der Sensitivitätsgrenze scheint sich die Häufigkeit zwar zu reduzieren. Das müssen aber weitere und insbesondere tiefere Beobachtungen bestätigen [9].

Elastische Streuung von Dunkler Materie

Die Verteilung der Dunklen Materie im Zentrum von Halos hängt davon ab, ob die Teilchen zusätzlich zur Gravitation miteinander wechselwirken [11]. Beispielsweise würde elastische Streuung die zentrale Dichte reduzieren und die Form des Gravitationspotentials verändern. Modelle kalter Dunkler Materie sagen typischerweise ein triaxial deformiertes Potential voraus. Durch elastische Streuung wären sie aber sphärisch-symmetrischer. Das Gravitationspotential von Galaxienhaufen lässt sich aus ihrem Gravitationslinseneffekt bestimmen und mit Beobachtungen derselben Objekte im Röntgenbereich vergleichen. Daraus folgte zunächst ein elastischer Wirkungsquerschnitt für wechselwirkende Dunkle Materie von $\sigma/m \approx 0,02 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Ein solch kleiner Wert besitzt astrophysikalisch nur geringe Relevanz, weil er die Strukturbildung im Vergleich zu kalter Dunkler Materie nicht signifikant verändert. Eine weitere Analyse der Daten ergab jedoch einen mehr als zehnmal größeren Wert als obere Grenze für σ/m . Aktuelle Arbeiten zeigen sogar, dass Wirkungsquerschnitte zwischen 0,1 und $2 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ möglich sind. Auch aus Kollisionen von Galaxienhaufen, wie etwa für den Bullet-Cluster beobachtet, lassen

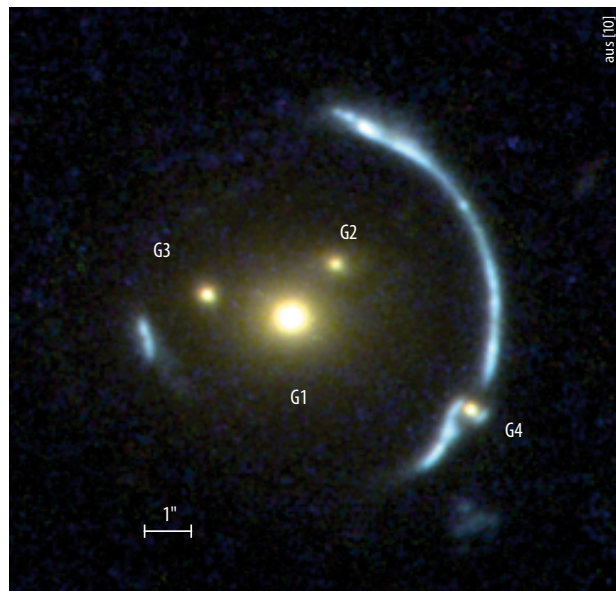


Abb. 3 Das Bild der bläulichen Hintergrundgalaxie ist durch das Schwerfeld der Vordergrundgalaxie G1 stark verzerrt, außerdem treten Mehrfachbilder auf [10]. Die Vordergrundgalaxie befindet sich bei einer Rotverschiebung von $z = 0,422$, die Hintergrundgalaxie bei $z = 2,001$. Das entspricht einer Entfernung von mehreren Gpc. G2, G3 und G4 sind weitere kleinere Vordergrundgalaxien. Insbesondere die Satellitengalaxie G4 verändert das Bild der Hintergrundgalaxie weiter und spaltet den großen Bogen sichtbar auf. Aus diesem Effekt ergibt sich die Masse von G4 – ein Verfahren, das sich auch auf Subhalos von Dunkler Materie anwenden lässt.

sich die Wechselwirkungsquerschnitte bestimmen. Bisher liefern all diese Beobachtungen obere Limits von etwa $1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ für σ/m [12]. Dabei ist zu beachten, dass die Relativgeschwindigkeiten der Teilchen der Dunklen Materie in Galaxienhaufen deutlich höher sind als in der Umgebung der Milchstraße. Innerhalb der Lokalen Gruppe ergab sich kürzlich aus dem Dichteprofil der Draco-Zwerggalaxie eine deutlich geringere Obergrenze von $\sigma/m = 0,57 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ [13]. Allerdings könnten hier auch andere astrophysikalische Effekte das innere Dichteprofil modifizieren.

Darüber hinaus ist es möglich, den Wirkungsquerschnitt zu berechnen, der mit kalter Dunkler Materie die Beobachtungen auf kleinen Skalen erklärt. Verschiedene Simulationen zeigten, dass dafür Werte zwischen 0,5 und $1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ausreichen. Das ist konsistent mit den aktuellen oberen Grenzwerten aus Beobachtungen.

Lebensdauer von Dunkler Materie

Die kosmischen Strukturen bildeten sich über Zeiträume von mehreren Milliarden Jahren. Wenn die Teilchen der Dunklen Materie diesen Prozess beeinflussen, müssen sie sehr langlebig sein. Das schließt aber einen sehr langsamen Zerfall oder eine Annihilation, wie sie etwa für WIMPs erwartet wird, nicht aus. Beide Prozesse könnten auch (zum Teil über Zwischenschritte) Teilchen des Standardmodells erzeugen, die sich astronomisch beobachten lassen – beispielsweise Protonen und Antiprotonen, Elektronen und Positronen, Neutrinos, Gamma- und Röntgenstrahlung. Eine Reihe von Experimenten versucht so, die Dunkle Materie indirekt nachzuweisen (siehe den Artikel von Christopher van Eldik). Eine eindeutige Detektion steht derzeit noch aus, aber es gibt Signale, die sich als Signatur Dunkler Materie interpretieren lassen. Dazu gehört eine Röntgenlinie mit einer Energie von etwa 3,55 keV, die in den Spektren von Galaxien und Galaxienhaufen auftritt [14]. Sie könnte aus dem Zerfall eines Teilchens der Dunklen Materie stammen, beispielsweise einem sterilen Neutrino mit einer Masse von etwa 7 keV. Signifikanz und Interpretation sind derzeit noch umstritten. Einen Fortschritt sollte hier die nächste Generation von Röntgensatelliten wie eROSITA ermöglichen.

Eine weitere interessante Signatur könnte die erhöhte Anzahl von Antiprotonen mit Energien zwischen 10 und 20 GeV in der kosmischen Strahlung darstellen, falls diese bei der Annihilation von Dunkler Materie entstehen. Die Masse der annihilierenden Teilchen müsste dann zwischen 50 und 100 GeV liegen [15]. Das könnte auch erklären, warum die Gammastrahlung aus Richtung des galaktischen Zentrums intensiver ausfällt als erwartet. Derzeit gilt es in diesem Zusammenhang, Unsicherheiten für die Erzeugung von Antiprotonen aus anderen Quellen sowie den Einfluss des Sonnenwindes auf die nahe der Erde gemessene Energieverteilung der kosmischen Strahlung zu untersuchen.

Blick in die Zukunft

Dunkle Materie wird benötigt, um eine Reihe astronomischer Beobachtungen zu erklären. Solange ein direkter

Nachweis eines entsprechenden Teilchens in Laborexperimenten und an Beschleunigern nicht gelingt, sind wir weiter auf die Astronomie angewiesen, um mehr über Dunkle Materie zu erfahren. In Zukunft wird die Genauigkeit zunehmen, mit der wir kosmische Strukturen untersuchen können. Darauf basierend lassen sich Eigenschaften der Dunklen Materie, wie die Masse der Teilchen, genauer bestimmen – allerdings abhängig vom gewählten Modell. Direkter wäre ein astronomischer Zugang über Zerfall und Annihilation der Teilchen, sofern diese beobachtbar sind. Die verbesserte Sensitivität zukünftiger Messungen sollte die Chance einer zweifelsfreien Detektion deutlich erhöhen.

Literatur

- [1] J. S. Bullock und M. Boylan-Kolchin, *Ann. Rev. Astron. Astroph.* **55**, 343 (2017)
- [2] B. Moore et al., *ApJL* **524**, L19 (1999)
- [3] J. F. Navarro et al., *ApJ* **490**, 493 (1997)
- [4] A. Pontzen und F. Governato, *Nature* **506**, 171 (2014)
- [5] M. R. Lovell et al., *MNRAS* **420**, 2318 (2012)
- [6] M. Vogelsberger et al., *MNRAS* **423**, 3740 (2012)
- [7] L. Hui et al., *Phys. Rev. D* **95**, 043541 (2017)
- [8] V. Iršič et al., *Phys. Rev. D* **96**, 023522 (2017)
- [9] E. Ritondale et al., *MNRAS* **485**, 2179 (2019)
- [10] S. Vegetti et al., *MNRAS* **407**, 225 (2010)
- [11] D. N. Spergel und P. J. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3760 (2000)
- [12] S. Tulin und H.-B. Yu, *Phys. Rep.* **730**, 1 (2018)
- [13] J. I. Read et al., *MNRAS* **481**, 860 (2018)
- [14] E. Bulbul et al., *ApJ* **789**, 13 (2014)
- [15] I. Cholis et al., *Phys. Rev. D* **99**, 103026 (2019)

Die Autoren



Ewald Puchwein studierte Physik an den Universitäten Graz und Heidelberg und promovierte über die Struktur von Galaxienhaufen. Als Post-Doc forschte er am Max-Planck-Institut für Astrophysik, am Heidelberger Institut für Theoretische Studien und an der U Cambridge. Seit 2018 untersucht

er am Leibniz-Institut für Astrophysik in Potsdam mit Hilfe von Computersimulationen die Physik von Galaxienhaufen, das intergalaktische Gas und den Lyman- α -Wald.

Mark Vogelsberger studierte Informatik, Mathematik und Physik an den Universitäten Mainz und Karlsruhe. Am Max-Planck-Institut für Astrophysik verfasste er seine Doktorarbeit zur internen Struktur von Halos der Dunklen Materie. Seither forscht er im Bereich der computergestützten Astrophysik in den USA: zunächst als Post-Doktorand am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, seit 2013 als Assistant Professor für Physik am Massachusetts Institute of Technology. Im vergangenen Jahr wurde er zum Associate Professor befördert.



Dr. Ewald Puchwein, Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP), An der Sternwarte 16, 14482 Potsdam und **Prof. Dr. Mark Vogelsberger**, Department of Physics, Kavli Institute for Astrophysics and Space Research, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA