

DUNKLE MATERIE

Suche nach der Dunklen Materie

Die Frage, woraus unser Universum besteht, beschäftigt Physiker, Astronomen und Kosmologen schon lange.

Manfred Lindner, Hans-Christian Schultz-Coulon und Friedrich-Karl Thielemann

Wichtige Fragen von Physik, Astronomie und Kosmologie betreffen die Größe, Zusammensetzung und Entwicklung unseres Universums. Seit den 1930er-Jahren spielt dabei ein neuer Aspekt eine entscheidende Rolle: Astronomische Beobachtungen deuten darauf hin, dass die uns bekannte Materie nur einen sehr kleinen Teil der Materie- und Energiedichte im Universum ausmacht. In der Teilchenphysik gibt es zudem Gründe für die Existenz neuer unsichtbarer Teilchen, die zur Massenverteilung des Universums als Dunkle Materie beitragen könnten. Nur wenn eine solche Dunkle Materie existiert, kann die Allgemeine Relativitätstheorie die Gravitation auf allen Skalen beschreiben und die beobachteten Phänomene erklären.

Schon die Philosophen des Altertums diskutierten das Vorhandensein unsichtbarer Materie im Universum. Newtons Gravitationstheorie erlaubte es erstmals, die Bewegung von Himmelskörpern quantitativ zu untersuchen. Auf dieser Basis schlug Friedrich Wilhelm Bessel 1844 vor [1], dass es neben den sichtbaren Sternen und Planeten

auch unsichtbare, massebehaftete Körper geben könnte, die sich allein durch ihren Einfluss auf die Bewegung anderer Himmelskörper und nicht durch von ihnen ausgesandtes Licht identifizieren lassen. Dies führte z. B. zur Vorhersage der Existenz des Neptuns, ohne den die Umlaufbahn des Uranus nicht zu verstehen ist. Ebenfalls im 19. Jahrhundert stellte sich die Frage, ob die dunklen Regionen des Nachthimmels schlicht keine Sterne enthalten oder ob sich dort eine verhüllende, absorbierende „dunkle Materie“ befindet. Lord Kelvin verwendete dynamische Argumente, um Aussagen über die Menge an zusätzlichen, nicht sichtbaren Objekten in der Milchstraße zu treffen. Er betrachtete die Sterne als Gasteilchen und nutzte ihre gegenseitige Gravitationswechselwirkung, um die Geschwindigkeitsdispersion vorherzusagen, aus der sich eine obere Grenze für die Materiedichte in unserer Galaxie ergibt [2]. Aus Kelvins Ergebnissen zog Henri Poincaré den Schluss, dass die Masse an dunkler gravitativ wirkender Materie kleiner oder maximal vergleichbar mit der Masse sichtbarer Materie sein müsse [3], ähnlich wie andere Autoren [4]. Seither hat sich das Verständnis der Dunklen Materie erheblich verbessert [5].

Hinweise aus Kosmologie und Astronomie

Den Begriff der Dunklen Materie verwendete 1933 erstmals der Schweizer Physiker und Astronom Fritz Zwicky [6]. Er nutzte den Virialsatz und die Rotverschiebung von acht Galaxien im Coma-Cluster und kam zu dem Schluss, dass sich die gemessene große Geschwindigkeitsdispersion nur durch das Vorhandensein einer nicht sichtbaren, dunklen Materie erklären ließ. Das Verhältnis von Dunkler zu sichtbarer Materie bestimmte er zu 500, unter Verwendung einer Hubble-Konstanten von $H_0 = 558$. Der heute gültige Wert $H_0 = 67$ [7] liefert ein Verhältnis von 8,3. Zwicky ging davon aus, dass es sich bei der Dunklen Materie um eine Mischung aus kalten, nicht leuchtenden Sternen, makroskopischen und mikroskopischen Festkörpern sowie Gasen handelt.

Den nächsten Schritt steuerte die Radioastronomie mit der Untersuchung der sog. 21-cm-Linie in den 1950er-Jahren bei. Damit ließ sich die Rotationsgeschwindigkeit von Sternen und interstellarem Gas um das galaktische Zentrum bestimmen. Der Durchbruch gelang 1970 mit den Beobachtungen von Vera Rubin und Kent Ford. Zusammen mit ihren optischen Messungen ergaben sich erstmals vollständige Rotationskurven [8]. Ihre Daten in großem Abstand vom galaktischen Zentrum waren kompatibel mit den Messungen im Radiobereich. Im Gegensatz zur Erwartung fällt die Rotationsgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand r vom galaktischen Zentrum aber nicht mit $1/\sqrt{r}$ ab, sondern bleibt nahezu konstant (**Abb. 1**). Das ist nur zu erklären, wenn die innerhalb des Radius r eingeschlossene Masse $M(r)$ proportional zum Radius ansteigt. Diese Bedingung erfüllt die sichtbare Materie nicht. Das Phänomen ist durch die Existenz Dunkler Materie zu erklären [9], deren Natur bis heute unklar ist.

Ein Vielzahl von Möglichkeiten wurde im Lauf der Zeit als Erklärung für die Dunkle Materie herangezogen. In den 1960er- und 1970er-Jahren waren massereiche, kollabierte Objekte, Wasserstoff-Bälle oder Zwergsterne Erklärungsversuche mit konventioneller Materie [10]. Ein gängigeres Beispiel sind sog. MACHOs (Massive Astrophysical Compact Halo Objects). Dazu könnten erkaltete alte Sterne, nicht leuchtende Schwarze Löcher und Braune Zwerge gehören, deren Masse zu klein ist, um durch nukleares Brennen hell zu leuchten. MACHOs lassen sich beim Vorbeilaufen vor einem in seiner Leuchtkraft nicht veränderlichen Stern durch ein kurzes Aufblitzen des Sternenlichts nachweisen: Die ansonsten unsichtbaren Objekte lenken durch ihre Gravitationswirkung das Licht des Sterns ab und verstärken es. Drei Experimente – MACHO, EROS und OGLE – haben solche Ereignisse beobachtet, die auf ansonsten dunkle Objekte von 0,03 bis 0,5 Sonnenmassen hinweisen. Allerdings ergibt sich aus der kleinen Zahl dieser Ereignisse, dass maximal acht Prozent der Dunklen Materie in Form von MACHOs vorliegen kann [11].

In den letzten Jahrzehnten haben sich Astronomie und Kosmologie zu einer Präzisionswissenschaft entwickelt. Dies ist bedingt durch den technischen Fortschritt bei erd- und satellitengestützten Instrumenten sowie bei der automatisierten Datenverarbeitung. Unser heutiger Wissensstand zu Zusammensetzung, Entwicklung und Struktur unseres Kosmos lässt sich mit wenigen freien Parametern durch das Λ CDM-Modell beschreiben.¹⁾ Gemäß diesem Standardmodell der Kosmologie besteht das Universum heute nur zu etwa fünf Prozent aus uns bekannter Materie. Etwa ein Viertel setzt sich aus nicht sichtbarer Dunkler Materie zusammen, deren Existenz sich bisher einzig aufgrund ihrer gravitativen Wechselwirkung erschließt. Die noch fehlenden rund 70 Prozent werden als Dunkle Energie bezeichnet. Anders als die Materie soll sie homogen verteilt sein und erklärt die beschleunigte Expansion des Universums. Wir wissen, dass sich die Anteile während der Entwicklungsgeschichte des Universums so durch das Λ CDM-Modell vorgegeben verändert haben. Unklar ist aber, woraus Dunkle Materie besteht und wie sich Dunkle Energie erklären lässt.

1) Das Modell beruht auf der Annahme einer kalten Dunklen Materie (Cold Dark Matter, CDM) und einer von Null verschiedenen kosmologischen Konstanten Λ . Kalte Dunkle Materie weist im Gegensatz zu heißer oder warmer Dunkler Materie nur eine geringe Geschwindigkeitsdispersion auf.

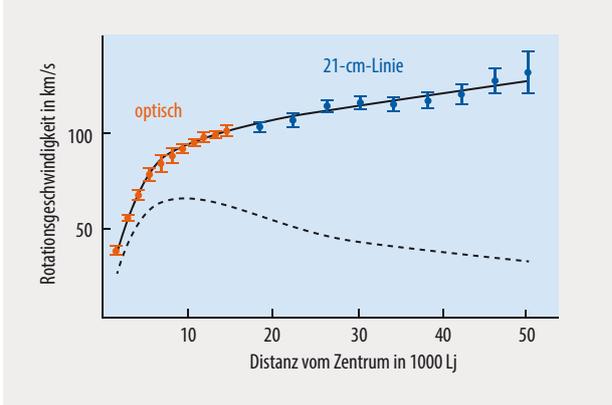


Abb. 1 Die Rotationskurven von Spiralgalaxien wie NGC 6814 (oben) lassen sich optisch (orange) und mit Messungen der 21-cm-Linie von Wasserstoff (blau) bestimmen. Sie weichen deutlich von der Erwartung ab, die sich aus der sichtbaren Materie ergibt (schwarz gestrichelt).

Um zu klären, ob irgendwelche nicht nachgewiesene normale Materie eine mögliche Option darstellt, muss zunächst die Gesamtmasse der Baryonen im Universum bekannt sein. Erkenntnisse hierzu ergeben sich aus dem Verständnis der primordialen Nukleosynthese und der Vorhersage der Häufigkeiten der direkt nach dem Urknall gebildeten leichten Elemente wie Wasserstoff, Deuterium, ^3He , ^4He und ^7Li [12]. Wenn man von der mit großen Unsicherheiten behafteten Interpretation der ^7Li -Häufigkeit in metallarmen Sternen absieht, ergibt sich in Kombination mit Ergebnissen aus der Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung durch die Raumsonde WMAP [13] und das Weltraumteleskop PLANCK [7] eine sichere Obergrenze für den Baryonenanteil von 20 Prozent an der gesamten Materie im Universum.

Aus der Teilchenphysik bleibt damit als einzige Erklärung für Dunkle Materie die Existenz von nicht-baryonischen Elementarteilchen, die bezüglich der elektromagnetischen und der starken Wechselwirkung neutral sind. Sie koppeln weder an Licht noch binden sie an elektrisch geladene Teilchen. Im Standardmodell der Teilchenphysik erfüllen Neutrinos diese Bedingungen. Etwa 330 dieser schwach wechselwirkenden Teilchen finden sich in jedem Kubikzentimeter des Universums. Doch ihre Gesamtmasse addiert sich nur zu etwa 0,5 Prozent der Dunklen Materie. Außerdem handelt es sich um relativistische Teilchen, die als heiße Dunkle Materie zu anderen kosmologischen Strukturen als den heute beobachteten geführt hätten (vgl. den Beitrag von Ewald Puchwein und Mark Vogelsberger).

Dunkle Materie aus neuen Elementarteilchen

Das Standardmodell der Teilchenphysik ist nicht vollständig, beinhaltet es weder die Gravitation noch Erklärungen für Phänomene wie die Materie-Antimaterie-Asymmetrie oder die Neutrinooszillation. Theoretische Erweiterungen, die dadurch motiviert sind, liefern oft auch nicht-baryonische Teilchenkandidaten mit Eigenschaften, die denen der Dunklen Materie entsprechen. Die derzeit vielversprechendsten Kandidaten sind Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs), Axionen oder Axion-Like Particles (ALPs) und sterile Neutrinos [14].

Weakly Interacting Massive Particles

WIMP-Teilchen wechselwirken ähnlich den Neutrinos nur sehr schwach mit Materie, sind aber sehr viel schwerer. Theoretische Erweiterungen des Standardmodells, die generisch mit der Symmetriebrechungsskala von 246 GeV verbunden sind, liefern eine Hauptmotivation für WIMPs. Entsprechend bewegt sich ihre erwartete Masse im Bereich von $m_{\text{WIMP}} = 10 - 1000 \text{ GeV}/c^2$, also dem etwa zehn- bis tausendfachen Wert der Protonenmasse. WIMPs werden – wie alle anderen Teilchen auch – im frühen Universum thermisch erzeugt, frieren aber aufgrund ihrer großen Masse bereits bei hohen Temperaturen aus dem thermischen Gleichgewicht aus. Im teilchenphysikalischen Modell ergibt sich so automatisch die richtige Menge an Dunkler Materie, wie sie aus kosmologischen Betrachtungen folgt. Dass kosmologische und teilchenphysikalische Größen so zusammenpassen, wird als „WIMP-Wunder“ bezeichnet und macht diese Teilchen daher zu den vielversprechendsten Kandidaten für Dunkle Materie.

Teilchen des Standardmodells wechselwirken schwach mit WIMPs, sodass sich drei Wege anbieten, experimentell nach ihnen zu suchen. Der direkte Nachweis beruht auf Stößen der WIMP-Teilchen mit Materie (vgl. den Beitrag von Teresa Marrodán Undagoitia, Uwe Oberlack und Marc Schumann). Ebenso könnten sie ihre Existenz auch indirekt durch Annihilation oder Zerfall verraten (vgl. den Beitrag von Christopher van Eldik). Im Umkehrschluss sollten sie auch bei Kollisionen hochenergetischer Protonen entstehen (vgl. den Beitrag von David Berge, Joachim Kopp und Ruth Pöttgen). All diese Ansätze sind komplementär und decken einen großen Parameterraum bezüglich der Masse und der Wechselwirkungsstärke von WIMPs ab.

Axionen und Axion Like Particles

Axionen und ALPs kommen nur dann als Dunkle Materie infrage, wenn sie im frühen Universum mit einer nicht-thermischen Geschwindigkeitsverteilung entstanden sind, beispielsweise durch eine Neuausrichtung des Vakuums oder durch topologische Defekte. Dann erklären sie sowohl den Anteil der Dunklen Materie im Universum als auch deren Einfluss auf die kosmologische Strukturbildung. Ursprünglich zur Lösung des starken CP-Problems eingeführt, erlebt die Suche nach Axionen und ALPs derzeit daher neuen Aufschwung [15]. Der Nachweis ist möglich über ihre sehr schwache Kopplung an Photonen oder elektromagne-

tische Felder, alternativ suchen Beam-Dump-Experimente über langlebige Teilchenzustände nach ihnen [15].

Sterile Neutrinos

Es gibt gut motivierte theoretische Gründe für die Existenz steriler Neutrinos, deren Wechselwirkung mit Materie aufgrund ihrer geringen Mischung mit den „normalen“ Neutrinos des Standardmodells nur sehr gering ist. Sterile Neutrinos mit Massen im keV-Bereich und hinreichend kleiner Mischung sind sehr gute Kandidaten für warme Dunkle Materie. Derzeit gibt es Hinweise für die Existenz steriler Neutrinos in verschiedenen Parameterbereichen. Kontroverse Diskussionen löste die Behauptung einer angeblichen Beobachtung aus, die sich aber auch ohne sterile Neutrinos erklären lässt [16].

Primordiale Schwarze Löcher

Diese Objekte entstehen sehr früh in der Entwicklungsgeschichte des Universums, noch vor der primordialen Nukleosynthese, und sind daher nicht im baryonischen Materieanteil enthalten. Nicht detektierte Hawking-Strahlung vom Zerfall sehr massearmer primordialer Schwarzer Löcher, fehlende Effekte beim erwarteten Gravitationslinseneinfluss auf die Beobachtung hochenergetischer Gammastrahlungsausbrüche, eine zu geringe Anzahldichte aus Gravitationslinsensurveys (wie oben erwähnt) sowie nicht beobachtete Modifikationen der kosmischen Hintergrundstrahlung durch Materieeinfall auf massereiche Schwarze Löcher schließen lediglich den Massenbereich von 10^{-11} bis $10^{-14} M_{\odot}$ noch nicht aus [17]. Eine ausreichende Produktion primordialer Schwarzer Löcher in diesem eingeschränkten Massenbereich würde besondere Anforderungen an das Spektrum von Dichtefluktuationen im frühen Universum stellen.

Gravitation neu denken

Eine andere Erklärung der astronomischen Beobachtungen, die auf Dunkle Materie hinweisen, könnte in alternativen Gravitationstheorien liegen. Ein einfacher Vertreter ist das MOND-Modell (MODified Newtonian Dynamics), welches das Zweite Newtonsche Gesetz $F = m \cdot a$ für sehr kleine, gravitativ bedingte Beschleunigungen modifiziert [18]. Eine Verallgemeinerung auf relativistische Theorien erlaubt es mithilfe einiger freier Parameter, die Rotationskurven von Spiralgalaxien auch ohne die Einführung von Dunkler Materie zu beschreiben [19]. Allerdings ergeben sich Probleme und mögliche Widersprüche, wenn man versucht, damit die Hinweise auf Dunkle Materie auf den unterschiedlichen Längenskalen in statistischen und dynamischen Systemen zu erklären [20]. Andere Ansätze stellen beispielsweise das Äquivalenzprinzip der Allgemeinen Relativitätstheorie infrage. Aber es ist generell nicht einfach, die sehr unterschiedlichen Hinweise auf Dunkle Materie so zu erklären, während neue Teilchen dies scheinbar leichter können.

Unabhängig davon, ob das Standardmodell der Kosmologie die Einführung einer Dunklen Materie erzwingt oder ob alternative Gravitationstheorien neue freie Parameter einführen: Alle Erklärungen kämpfen mit verbleibenden

Schwierigkeiten. Ob es sich dabei um Hinweise auf fundamentale Probleme handelt oder ob lediglich eine nicht ausreichend präzise Beschreibung beispielsweise kosmologisch kleiner Strukturen vorliegt, müssen weitere Beobachtungen und Experimente klären. Zumindest stoßen derzeit betriebene und im Bau befindliche teilchenphysikalische Experimente in den Parameterbereich vor, der ein Signal zeigen sollte, wenn es Dunkle Materie gibt. Nach Jahrzehnten faszinierender Entwicklungen könnte das Licht am Ende des dunklen Tunnels in greifbare Nähe rücken.

Literatur

- [1] F. W. Bessel, MNRAS **6**, 136 (1844)
- [2] W. Thomson (Lord Kelvin), Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light, Cambridge University Press (1904), archive.org/details/baltimorelecture00kelviala
- [3] H. Poincaré, Popular Astronomy **14**, 475 (1906)
- [4] J. H. Oort, Bull. Astron. Inst. Neth. **6**, 249 (1932)
- [5] G. Bertone und D. Hooper, Rev. Mod. Phys. **90**, 045002 (2018)
- [6] F. Zwicky, Helv. Phys. Acta **6**, 110 (1933); F. Zwicky, ApJ **86**, 217 (1937)
- [7] N. Aghanim et al. (Planck Collaboration), arXiv:1807.06209 (2018)
- [8] V. C. Rubin und W. K. Ford, ApJ **159**, 379 (1970)
- [9] S. M. Faber und J. S. Gallagher, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **17**, 135 (1979)
- [10] P. J. E. Peebles, Physical Cosmology, Princeton University Press, Princeton Series in Physics XVI (1971); J. Tarter und J. Silk, QJRAS **15**, 122 (1974)
- [11] P. Tisserand et al., Astron. & Astrophys. **469**, 387 (2007)
- [12] R. H. Cyburt et al., Rev. Mod. Phys. **88**, 015004 (2016); C. Pitrou et al., Phys. Rep. **754**, 1 (2018)
- [13] G. Hinshaw et al., Ap. J. Suppl. **208**, 19 (2013)
- [14] R. Lang, Physik Journal, November 2014, S. 35
- [15] B. Majorovits, K. Desch und A. Ringwald, Physik Journal, Juli 2018, S. 33
- [16] M. Drewes, Physik Journal, Februar 2019, S. 28
- [17] H. Niikura et al., Nat. Astron. **3**, 524 (2019)
- [18] M. Milgrom, ApJ **270**, 365 (1983)
- [19] J. D. Bekenstein, Phys. Rev. D **70**, 083509 (2004)
- [20] B. Famaey und S. McGaugh, Liv. Rev. Relativity **15**, 10 (2012)

Die Autoren

Manfred Lindner (FV Teilchenphysik) ist Direktor am MPI für Kernphysik in Heidelberg und persönlicher Ordinarius an der Universität Heidelberg. Er forscht zu theoretischen und experimentellen Fragen der Teilchen- und Astroteilchenphysik und ist Ko-Sprecher der XENON-Kollaboration.

Hans-Christian Schultz-Coulon (FV Teilchenphysik) ist Professor für experimentelle Teilchenphysik am Kirchhoff-Institut für Physik der Universität Heidelberg. Er ist Mitglied der ATLAS-Kollaboration und arbeitet an Suchen nach neuen Phänomenen jenseits des Standardmodells und der Entwicklung von Teilchendetektoren.

Friedrich-Karl Thielemann (FV Hadronen und Kerne) ist Prof. em. für theoretische Physik an der U Basel und Mitglied der Theoriegruppe am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt. Er forscht zur nuklearen und theoretischen Astrophysik mit Fokus auf der Elemententstehung im Universum.

Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Lindner, MPI für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg, **Prof. Dr. Hans-Christian Schultz-Coulon**, Kirchhoff-Institut für Physik, U Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 227, 69120 Heidelberg und **Prof. em. Dr. Friedrich-Karl Thielemann**, U Basel, Klingelbergstr. 82, 4056 Basel, Schweiz

