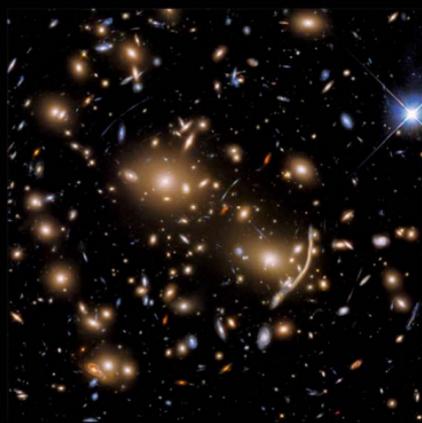


C.H. BECK **WISSEN**

Sibylle Anderl

DUNKLE MATERIE



Das große Rätsel
der Kosmologie

85 Prozent der Materie in unserem Universum existieren in einer Form, die wir nicht direkt beobachten können und die mit den uns bekannten Materieteilchen allenfalls sehr schwach in Interaktion treten: Die Dunkle Materie ist ein großes, vielleicht das größte Rätsel der Kosmologie. Wer sie zu verstehen versucht, streift fast alle Themen, die unser Kosmos bereithält: von der Entwicklung und Dynamik der Galaxien über Galaxienhaufen bis zu den größten kosmischen Strukturen und schließlich die Zeit kurz nach dem Urknall und die Entwicklung unseres Universums im Ganzen. Darüber hinaus gibt der Band einen Überblick über mögliche Kandidaten für diese merkwürdige Materieform und diskutiert die aktuelle Frage nach Alternativen zur Hypothese Dunkler Materie.

Sibylle Anderl ist Redakteurin der Frankfurter Allgemeinen Zeitung und schreibt für das Wissenschaftsressort und das Feuilleton. Sie hat in Astrophysik über Stoßwellen im interstellaren Medium promoviert und als Gastwissenschaftlerin zu den Themen Sternentstehung und Astrochemie am Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble geforscht.

Sibylle Anderl

DUNKLE MATERIE

Das große Rätsel der Kosmologie

C.H.Beck

Mit 9 Abbildungen

1. Auflage. 2022

© Verlag C.H.Beck oHG, München 2022

Reihengestaltung: Uwe Göbel (Original 1995, mit Logo), Marion
Blomeyer (Überarbeitung 2018)

Umschlagabbildung: Der Galaxienhaufen Abell 370, der etwa sechs
Milliarden Lichtjahre von der Milchstraße entfernt ist; © NASA/
Hubble, HAST Frontier Fields

Satz: C.H.Beck.Media.Solutions, Nördlingen

ISBN Buch 978 3 406 78360 9

ISBN eBook (epub) 978 3 406 78361 6

ISBN eBook (PDF) 978 3 406 78362 3

*Die gedruckte Ausgabe dieses Titels erhalten Sie im Buchhandel
sowie versandkostenfrei auf unserer Website www.chbeck.de.
Dort finden Sie auch unser gesamtes Programm und viele weitere
Informationen.*

Inhalt

Einleitung	7
1. Warum wir glauben, dass es Dunkle Materie gibt	11
1.1 Die Anfänge	11
1.2 Wie man Dunkle Materie findet – Oorts Beobachtungen der Milchstraße	13
1.3 Wie man Dunkle Materie findet – Zwicky's Beobachtungen von Galaxienhaufen	17
1.4 Dunkle Materie in Galaxiengruppen und -haufen und das heiße Gas	19
1.5 Wenn Massen wie Linsen wirken	21
1.6 Fehlende Masse in einzelnen Galaxien	25
1.7 Der kosmologische Einfluss galaktischer Masse	28
1.8 Dunkle Materie in anderen Galaxien	32
1.9 Dunkle Materie auf kosmologischen Skalen – Die kosmische Hintergrundstrahlung	34
1.10 Das schwingende Universum	39
1.11 Immer bessere Beobachtungen	43
1.12 Kalte Dunkle Materie	44
1.13 Keine Materie, wie wir sie kennen	47
2. Was sich hinter der Dunklen Materie verbergen könnte	51
2.1 Astrophysikalische Ansätze: Suche nach Mikrolinsen	51
2.2 Neue Ideen für die Identität von MACHOs	56
2.3 Das Standardmodell der Teilchenphysik	58
2.4 Das WIMP	61
2.5 Die direkte Suche nach WIMPs	63
2.6 Die indirekte Suche nach WIMPs	64
2.7 WIMPs in Beschleunigern	67

2.8	Axionen	70
2.9	Sterile Neutrinos	71
2.10	Dunkle-Materie-Kandidaten – Wie geht es weiter? . .	72
	3. Probleme des Standardmodells	74
3.1	Simulationen der Strukturbildung	74
3.2	Fehlende Satelliten	77
3.3	Die merkwürdige Ausrichtung der Satelliten	79
3.4	Das Dichteprofil	79
3.5	«Too big to fail»	80
3.6	Merkwürdige Korrelationen	81
3.7	Probleme und mögliche Lösungen	82
3.8	Eine Modifikation der Theorie Newtons	85
3.9	MOND und ihre Probleme	89
3.10	Die Hubble-Kontroverse	92
3.11	Das Lithium-Problem	95
3.12	Anomalien der Hintergrundstrahlung	96
3.13	Das Dunkle-Materie-Problem: Ein Fall für Philosophen	98
	4. Der philosophische Blick auf die Dunkle Materie	100
4.1	Ein Kampf zwischen Paradigmen?	100
4.2	Ein Problem der Modelle?	106
4.3	Ist Dunkle Materie real?	112
4.4	Erkenntnisgrenzen	119
	Bibliographie	122
	Bildnachweis	128

Einleitung

Es ist eine durchaus erschütternde Bilanz: 85 Prozent der Materie in unserem Universum existieren in einer Form, deren Natur wir nicht verstehen. Oder andersherum: Nur 15 Prozent aller Materie bestehen aus dem, wovon wir alltäglich umgeben sind und woraus wir selbst bestehen, aus denjenigen Materieteilchen, die wir im Labor untersuchen und in Teilchenbeschleunigern erzeugt haben. Es ist, als würde eine atemberaubende Lücke in unserem wissenschaftlichen Verständnis klaffen, die sich sowohl im Mikrokosmos (offenbar gibt es Teilchen, jenseits unserer Standardtheorie) als auch im Makrokosmos (im Universum muss es deutlich mehr Materie geben, als wir auf der Grundlage unseres derzeitigen Verständnisses erwartet hätten) zeigt.

Doch gleichzeitig greift diese Beschreibung des Problems deutlich zu kurz. Denn tatsächlich wissen wir mittlerweile sehr viel über diese «Dunkle Materie» und ihre Eigenschaften. Man kann sie selbst nicht sehen, das heißt, sie wechselwirkt nicht mit Licht und hat keine elektrische Ladung. Auch mit den uns bekannten Materieteilchen und sogar mit sich selbst scheint sie allenfalls nur sehr schwach in Interaktion zu treten. Mit einer Ausnahme: Dunkle Materie verrät sich durch ihre Gravitation. Durch ihre Anziehungswirkung nimmt sie Einfluss auf das Verhalten von Galaxien, sie verändert die Erscheinung von Gruppen und Haufen von Galaxien. Der gesamte Kosmos würde anders aussehen, wenn es sie nicht gäbe; denn sie hat kurz nach dem Urknall einen entscheidenden Beitrag dazu geleistet, die Materiestrukturen im Universum zu formen – die uns bekannte Materie allein wäre dafür nicht ausreichend gewesen. Wir können insofern einiges darüber sagen, wo Dunkle Materie vorhanden sein sollte und in welchen Mengen.

Die Quellen dieses Wissens sind vielfältig. Es stammt aus ver-

schiedenen (Teil-)Disziplinen, beruht auf sehr unterschiedlichen Methoden und Herangehensweisen und wurde auf der Grundlage voneinander völlig unabhängiger Beobachtungen und Daten erlangt. Und obwohl die Quellen so divers sind, ergeben sie ein erstaunlich stimmiges Bild hinsichtlich etwa der Menge, der Verteilung und des Verhaltens der Dunklen Materie. Das ist tröstlich. In der Wissenschaft wird solche Übereinstimmung unabhängiger Quellen als Zeichen dafür gewertet, dass man auf der richtigen Spur ist. Irrtümer können schließlich immer passieren, die Wissenschaftsgeschichte ist voll davon, aber dass sich viele unabhängige Wissenschaftler in genau der gleichen Weise irren, das scheint ziemlich unwahrscheinlich.

Auf der Grundlage all dieser Hinweise würde man daher erwarten, dass das Problem der Dunklen Materie alles andere als hoffnungslos ist. Es hat im Laufe der Jahrzehnte viele schöne und stimmige Theorien darüber gegeben, was sich hinter ihr verbergen könnte. Eine Idee war etwa, dass hinter der Dunklen Materie nicht oder nur sehr schwach leuchtende Himmelskörper stecken – eine Vermutung, die sich allerdings nicht bestätigt hat. Heute geht man davon aus, dass die Lösung des astrophysikalischen Problems der Dunklen Materie eine Revolution der Teilchenphysik nötig machen wird: Im derzeit akzeptierten teilchenphysikalischen Standardmodell gibt es keine Materieteilchen, die allen aus der Astrophysik abgeleiteten Anforderungen an Dunkle Materie genügen. Auch kosmologische Argumente, die auf der Entstehung der Elemente nach dem Urknall beruhen, legen nahe, dass die Dunkle Materie «nicht baryonisch» ist, also anders als die uns bekannten massereichen Teilchen des Standardmodells. Wer Dunkle Materie verstehen will, muss dieses Modell also erweitern.

Die Teilchenphysiker würden das gerne in Kauf nehmen, denn das Standardmodell plagt sich ganz unabhängig von kosmischen Fragen mit einigen Problemen herum, die darauf hinzuweisen scheinen, dass das Standardmodell nicht die abschließende Theorie sein kann, die den Mikrokosmos wirklich und umfassend beschreibt. Die schönsten Dunkle-Materie-Theorien sind daher in der Lage, nicht nur eine Erklärung für die astro-

physikalischen Beobachtungen zu liefern, sondern gleichzeitig auch eine Reihe von Problemen zu lösen, über die sich die Teilchenphysiker ohnehin den Kopf zerbrechen. Dass die Konstruktion solcher Theorien überhaupt möglich ist, die ganz unterschiedliche Probleme einer Lösung zuführen können, scheint schon fast ein Argument dafür zu sein, dass sie auch stimmen müssen.

Leider musste man aber feststellen, dass es so einfach doch nicht ist. Viele der Vermutungen wurden durch Beobachtungen widerlegt, experimentelle Erwartungen erfüllten sich nicht. Wenn man recherchiert, wie sich namhafte Wissenschaftler im Laufe der Zeit zum Problem der Dunklen Materie geäußert haben, dann erwarteten sie oftmals innerhalb des kommenden Jahrzehnts die Lösung. Dass diese immer weiter auf sich warten ließ, beunruhigte zunächst nicht allzu sehr. In den vergangenen Jahren ging es allerdings den «schönsten» Theorien aus der Teilchenphysik an den Kragen. Der gigantische Teilchenbeschleuniger des CERN, der Large Hadron Collider (LHC), galt als aussichtsreiches Instrument, endlich einige derjenigen postulierten Teilchen der Dunklen Materie erzeugen zu können, die den Wissenschaftlern als am wahrscheinlichsten galten. 2008 ging er in Betrieb und steigerte seitdem mehrfach seine Leistungsfähigkeit. Die erwarteten Teilchen zeigten sich bislang allerdings nicht.

Dieser Befund hat bei einigen Wissenschaftlern für Verwunderung, bei anderen für Frustration, bei wieder anderen sogar für tiefgreifenden Zweifel gesorgt: Was hat es zu bedeuten, wenn die schönsten und einfachsten Theorien offenbar nicht zutreffend sind? Ist der Versuch, die Natur der Dunklen Materie zu ergründen, tatsächlich aussichtsreich? Gibt es die Dunkle Materie überhaupt, oder könnte es sein, dass diejenigen Theorien, auf deren Grundlage ihre Existenz nötig scheint, fehlerhaft sind? Könnte etwa Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie das Problem sein? Und wäre die Dunkle Materie dann so etwas wie der Äther der Gegenwart: eine Substanz, deren Existenz Wissenschaftler lange angenommen haben, die es aber in Wirklichkeit gar nicht gibt?

Die Geschichte und die wissenschaftlichen Hintergründe der Dunklen Materie sind auf sehr vielen Ebenen faszinierend. Ihr Studium liefert einen tiefen Einblick in die Methodik der Astrophysik, die fast ausschließlich theoretisch und beobachtend Phänomene und Prozesse in Dimensionen und Umgebungen erschließt, die sich oft an der Grenze des für uns Menschen noch anschaulich Fassbaren bewegen. Wer Dunkle Materie zu verstehen versucht, wird außerdem fast alle Themen streifen, die unser Kosmos bereithält: von der Entwicklung und Dynamik der Galaxien über Galaxienhaufen bis zu den größten kosmischen Strukturen und schließlich die Zeit kurz nach dem Urknall und die Entwicklung unseres Universums im Ganzen. Schließlich ist das Thema auch wissenschaftsphilosophisch interessant: Welche Evidenz ist vonnöten, bis ein völlig neues Phänomen als real anerkannt wird? Wie lang hält die wissenschaftliche Community daran fest, wenn ursprüngliche Erwartungen immer wieder enttäuscht werden? Wie geht sie mit alternativen Theorien um? Und wie wird argumentiert, wenn es darum geht, sich zwischen verschiedenen Erklärungsansätzen zu entscheiden?

Dieses Buch will eine Einführung in das Thema der Dunklen Materie geben, indem es erstens zeigt, welche empirischen Befunde innerhalb der letzten knapp hundert Jahre zu der Annahme geführt haben, dass die sichtbare Materie nur einen kleinen Teil der gesamten Materie im Kosmos ausmacht. Dieser historische Abriss der sich immer stärker verdichtenden empirischen Evidenz für die Annahme Dunkler Materie wird relativ ausführlich behandelt werden, da sich ohne die Vielfalt dieser Hinweise kaum verstehen lässt, warum die Annahme Dunkler Materie für die meisten Astrophysiker heute nach wie vor plausibel erscheint. Der zweite Teil liefert daraufhin einen Überblick über mögliche Kandidaten für diese merkwürdige dunkle Materieform. Im dritten Teil wird die aktuelle Frage nach Alternativen zur Hypothese Dunkler Materie diskutiert. Der Schlussteil des Buches wird das Problem der Dunklen Materie schließlich in den Rahmen der modernen Wissenschaftstheorie einbetten und diskutieren. Der Schwerpunkt liegt in diesem Buch auf

einer astrophysikalischen Perspektive, wenngleich die Ausläufer der Probleme in der Teilchenphysik und deren Lösungsvorschläge ebenfalls diskutiert werden.

1. Warum wir glauben, dass es Dunkle Materie gibt

1.1 Die Anfänge

Dunkle Materie – Materie, die man nicht direkt beobachten kann – gab es im Kosmos für uns Menschen zu allen Zeiten. Lange konnten Himmelsbeobachter nur das optische Licht nutzen, um zu ergründen, was dort oben vor sich geht, zunächst mit bloßem Auge, dann mit immer besseren Teleskopen. Auf diese Weise kann man Sterne und die Planeten unseres Sonnensystems sehen, generell alles, das genügend heiß oder energetisch genug ist, um bei sichtbaren Wellenlängen zu strahlen. Vieles aber bleibt im Universum für optische Teleskope dunkel: junge Sterne und kalte Gas- und Staubwolken etwa. Man kann das sehen, wenn man in dunklen Nächten die Milchstraße beobachtet. Dort werden viele Sterne in der galaktischen Ebene von (optisch-)dunkler Materie verdeckt: von Staub, der das Sternenlicht absorbiert.

Erst seit rund zweihundert Jahren, seit William Herschels Entdeckung der Infrarotstrahlung im Jahr 1800, konnten Astronomen weitere Bereiche des elektromagnetischen Spektrums jenseits des optischen Lichtes für ihre Beobachtungen erschließen. Anfang der dreißiger Jahre folgte die langwellige Radiostrahlung, seit den 1960er Jahren weitere schwer zu beobachtende Bereiche des Infraroten, aus dem Orbit heraus dann auch der hochenergetische Röntgen- und Gammabereich. Radiowellenlängen machen beispielsweise weit entfernte Galaxien sichtbar, deren Licht durch die kosmische Expansion, die fortwährende Ausdehnung des Weltalls, im Laufe der Zeit immer stärker an Energie verloren hat. Infrarotstrahlen ermöglichen den Blick in das Innere von Staubwolken, wo Sterne entstehen.

Röntgen- und Gammastrahlen machen extreme Prozesse sichtbar, bei denen gewaltige Energien im Spiel sind, etwa wenn ein Schwarzes Loch einen Partnerstern zerreißt.

Dazu kamen mit der Zeit Observatorien, die kosmische Strahlung und Neutrinos, hochenergetische Elementarteilchen aus dem All, nachweisen können. Neutrinos ermöglichen einen «Blick» ins Innere der Sonne, wo Wasserstoff unter Produktion von Neutrinos zu Helium fusioniert wird. Da diese Teilchen nur extrem schwach wechselwirken, können sie von dort aus ungehindert die Erde erreichen und Auskunft über ihren Ursprungsort, das Zentrum unseres Heimatsterns, geben. Seit ein paar Jahren hat sich ein weiteres Beobachtungsfenster ins All geöffnet. Anhand von Gravitationswellen sind nun «dunkle» Prozesse wie die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher sichtbar geworden. Jeder von Astronomen neu in den Dienst genommene kosmische Informationsträger hat somit eine neue Klasse dunkler Objekte erhellt. Vor diesem Hintergrund mag es kaum erstaunen, dass in astrophysikalischen Veröffentlichungen der Ausdruck «dunkle Materie» schon zu finden war, lange bevor deutlich wurde, dass es eine Form von Dunkler Materie gibt, die sich von allen bis dahin so genannten dunklen kosmischen Phänomenen grundsätzlich unterscheidet.

In diesem Sinne nutzten den Begriff «Dunkle Materie» Anfang der dreißiger Jahre auch zwei Astronomen für diejenige Materie, die in Beobachtungen nicht direkt sichtbar war, sondern sich nur durch ihre Gravitationswirkung verriet. Der eine, der Niederländer Jan Hendrik Oort, verwendete die Bezeichnung 1932 in einer Arbeit, deren Ziel unter anderem «die Ableitung eines akkuraten Wertes der vollständigen Masse inklusive dunkler Materie» in der Scheibe unserer Milchstraße war. Der andere, der in den USA arbeitende Schweizer Fritz Zwicky, hatte die Bewegung von Galaxien im Coma-Haufen, einer rund 100 Megaparsec (ein Parsec entspricht knapp 3,3 Lichtjahren) weit entfernten Ansammlung von mehr als tausend Galaxien, beobachtet. Bei der Auswertung seiner Daten war er zu dem Schluss gekommen, dass die «leuchtende Materie» nicht ausreicht, um die Ansammlung von Galaxien stabil zusammenzu-

halten. In seiner 1933 veröffentlichten Studie schrieb er: «Falls sich dies bewahrheiten sollte, würde sich also das überraschende Resultat ergeben, dass dunkle Materie in sehr viel größerer Dichte vorhanden ist als leuchtende Materie.» Beide meinten mit ihren Beschreibungen tatsächlich etwas, das unserem heutigen Verständnis von Dunkler Materie sehr nahe kommt, und gelten damit als die beiden ersten Autoren von Studien zu diesem Thema. Allerdings war Oorts Ableitung fehlerhaft, während Zwicky als echter Pionier des Problems der Dunklen Materie gelten kann. Beide nutzten aber im Prinzip ähnliche Argumente, um auf die Existenz nicht direkt beobachtbarer Materie zu schließen, die in den folgenden Jahrzehnten bei der Untersuchung Dunkler Materie immer wieder zum Einsatz kommen würden.

1.2 Wie man Dunkle Materie findet – Oorts Beobachtungen der Milchstraße

Die Astrophysik muss mit einer grundsätzlichen Herausforderung umgehen: Fast alle ihrer Forschungsobjekte sind so weit entfernt, dass man sie nicht beeinflussen kann. Anders ausgedrückt: Als Astrophysiker kann man mit seinen Forschungsobjekten nicht aktiv Experimente durchführen und so auf direkte Art bestimmte postulierte Zusammenhänge auf die Probe stellen. Viele kosmische Objekte verdanken ihre «dunkle Existenz» dieser Tatsache, denn andernfalls hätte man sie einfach aufspüren können, beispielsweise, indem man ihnen Energie zuführt und sie damit zum Leuchten bringt. Stattdessen muss in der Astrophysik häufig von beobachtbaren Wirkungen auf eine zugrunde liegende Ursache geschlossen werden, die im besten Fall alles Beobachtbare konsistent und einfach erklären kann – ganz ähnlich wie das eine Kriminalkommissarin tut, die auf der Grundlage der vorliegenden Indizien den Tathergang rekonstruiert.

Auf diese Weise kann man etwa Materie, die nicht direkt beobachtbar ist, anhand ihrer Anziehung auf andere Massen finden. Dieses Vorgehen ist durchaus traditionsreich: 1846 wurde