

**Spektrum**  
der Wissenschaft

**KOMPAKT**

# DUNKLE MATERIE

Die Suche nach dem Unsichtbaren

## **Spurensuche**

Auf der Jagd nach  
Mr. Axion

## **Quantenzustand**

Dunkle Materie –  
eine Supraflüssigkeit?

## **Antimaterie**

Neue Hoffnung  
für Materiejäger



Antje Findekle  
E-Mail: [findekle@spektrum.de](mailto:findekle@spektrum.de)

Liebe Leserin, lieber Leser,  
unser Kosmos birgt ein (noch!) unsichtbares Geheimnis: Beobachtungen und Berechnungen zufolge ist die sichtbare Materie offenbar nicht allein in den Weiten des Universums. Ihr zur Seite steht die so genannte Dunkle Materie, die sich dem direkten Blick entzieht, sich aber durch die Wirkung ihrer Schwerkraft verrät und für Struktur im All sorgt. Doch woraus sie tatsächlich besteht, ist noch immer rätselhaft. Manche Forscher hoffen, dass sie mit neuen Methoden und empfindlicheren Verfahren Licht ins Dunkel bringen – andere entwickeln alternative Erklärungsmodelle.

Eine erfolgreiche Spurensuche wünscht

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 11.12.2017

Folgen Sie uns:



**CHEFREDAKTEURE:** Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert  
**REDAKTIONSLEITER:** Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl  
**ART DIRECTOR DIGITAL:** Marc Grove  
**LAYOUT:** Oliver Gabriel, Marina Männle  
**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**PRODUKTMANAGERIN DIGITAL:** Antje Findekle  
**CONTENT MANAGER DIGITAL:** Dr. Michaela Maya-Mrschtik  
**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15-17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, USt-Id-Nr. DE229038528  
**GESCHÄFTSLEITUNG:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**MARKETING UND VERTRIEB:** Annette Baumbusch (Ltg.)  
**LESER- UND BESTELLSERVICE:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

**BEZUGSPREIS:** Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer  
**ANZEIGEN:** Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an [anzeigen@spektrum.de](mailto:anzeigen@spektrum.de).

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2017 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

SEITE  
04

TEILCHENPHYSIK  
Die Tür ins Dunkle Universum

BEIJINGSTORY / GETTY IMAGES / ISTOCK

SEITE  
34

JUNGES UNIVERSUM  
Die Schwarzen Löcher  
des Urknalls

UNLIMIT3 / STOCK.ADOBE.COM

KOSMISCHE KRIMINALISTIK  
Auf der Jagd nach Mr. Axion

SEITE  
43

ISTOCK / EZUMEIMAGES

ALTERNATIVE HYPOTHESE  
Ist die Dunkle Materie eine  
Supraflüssigkeit?

SEITE  
62

400TMAX / GETTY IMAGES / ISTOCK

- 12 STRUKTUR DES UNIVERSUMS  
Dunkle Materie sichtbar gemacht
- 14 DUNKLE GALAXIEN  
Aufgebaut aus Dunkler Materie
- 16 XENON1T  
Empfindlichster Dunkle-Materie-  
Detektor steht in Europa
- 18 ENTWICKLUNG DES UNIVERSUMS  
Kaum Dunkle Materie in  
frühen Galaxien
- 22 SELBSTINTERAKTION  
Kann Dunkle Materie doch mehr  
als nur Schwerkraft?
- 26 ANTIPROTONEN  
Neue Hoffnung für Dunkle-  
Materie-Jäger
- 29 ANTIMATERIE-ÜBERSCHUSS  
Freispruch für zwei Exoten
- 53 MOND-THEORIE  
Gegenwind für die Dunkle Materie

TEILCHENPHYSIK

# Die Tür ins **Dunkle** Universum

von Dirk Eidemüller

Von Anfang an galt das große Theoriengebäude der Teilchenphysik – das Standardmodell – als Provisorium. Doch es will und will nicht einstürzen. Warum ist das so?

**E**igentlich funktioniert es prächtig, das Standardmodell der Teilchenphysik. Es beschreibt alle bekannten Elementarteilchen und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte mit zum Teil unglaublicher Präzision. Theorie und Experiment decken sich manchmal bis jenseits der zehnten Nachkommastelle. Bemerkenswert also, dass die Wissenschaftler selbst noch nie richtig glücklich damit waren. Von Anfang an galt es als Übergangslösung, eine Zwischenstufe auf dem Weg zu einer noch tieferen Theorie.

Dafür gibt es zwei wesentliche Gründe: Erstens beschreibt es nur drei von vier fundamentalen Kräften in der Physik. Es beinhaltet die elektromagnetische Kraft genauso wie die starke und die schwache Kernkraft, die den Zusammenhalt von Atomkernen und radioaktive Zerfälle erklären. Die Gravitation aber, die uns auf der Erde sowie Sternensysteme und Galaxien zusammenhält, kommt im Standardmodell nicht vor.

Und zweitens finden Astronomen draußen im All gewaltige Mengen an Dunkler Materie. Nach neueren Messungen ist jede Galaxie von einem riesigen »Halo« aus

Dunkler Materie umgeben, die selbst weder leuchtet noch sonst irgendwie nachweisbar wäre, ohne deren Gravitationswirkung die Galaxien aber einfach auseinanderfliegen würden. Auch folgt die Verteilung der Galaxien im Universum einem unsichtbaren Netz aus Knotenpunkten, Verbindungen und gigantischen Leerräumen, das ebenfalls aus Dunkler Materie gewebt sein muss.

### **Woraus besteht die Dunkle Materie?**

Diese unsichtbare Materieform macht rund 85 Prozent der gesamten Materie im Universum aus. Im Standardmodell findet sich aber nicht der leiseste Hinweis, woraus sie bestehen könnte. Deshalb suchen Wissenschaftler schon seit vielen Jahren nach neuen, exotischen Teilchen und Kräften, die dieses Rätsel aufklären könnten: nach einer »neuen Physik«, wie es die Experten nennen.

An mangelndem Willen liegt es also nicht, dass das Standardmodell nach wie vor Bestand hat. Doch von den neuen Teilchen fehlt bislang jede Spur. Das kann zwei denkbare Gründe haben: Die gesuchten Teilchen könnten so schwer sein, dass sie noch in keinem Experiment aufgetaucht sind. Das hieße, wir müssten immer leis-

tungsfähigere Teilchenbeschleuniger bauen mit immer höheren Energien, um sie eines Tages doch noch aufzustöbern. Oder aber die Prozesse, mit denen sie erzeugt und nachgewiesen werden könnten, laufen so selten ab, dass sie sich bislang jeder Überprüfung entziehen. Vielleicht sind sie ja längst in den gigantischen Datenmengen enthalten, die die Beschleuniger anhäufen, gehen jedoch im Hintergrundrauschen unter. Dann benötigte man noch präzisere Messungen mit geringeren Fehlerschranken.

### **Suche mit großen Teilchenbeschleunigern**

Große Hoffnungen liegen derzeit auf dem Genfer LHC. Seit 2015 läuft er nach einigen Umbauten und Erweiterungen nun knapp unter seiner maximalen Energie. »Wir suchen mit dem LHC sowohl auf direkte als auch auf indirekte Weise nach neuer Physik«, sagt Isabell-Alissandra Melzer-Pellmann vom Deutschen Elektronen-Synchrotron in Hamburg.

Die direkte Suche besteht darin, die Protonen mit beinahe Lichtgeschwindigkeit aufeinanderprallen zu lassen und hoffentlich genügend Energie in den Kollisionen zu konzentrieren, um bislang unbekannte



**EIN »RING« AUS  
DUNKLER MATERIE**  
Diese Aufnahme des Hubb-  
le-Teleskops »zeigt« einen  
Ring aus Dunkler Materie  
im Galaxienhaufen Cl  
0024+17. Erkennbar wird  
die Dunkle Materie nur  
durch das abgelenkte Licht,  
das von weit entfernten Ga-  
laxien im Hintergrund aus-  
gestrahlt wird.

NASA / ESA / M. J. JEE AND H. FORD (JOHNS HOPKINS UNIVERSITY)

Teilchen zu erzeugen. Diese sollten in den haushohen Detektoren Spuren hinterlassen, die sich von den bereits bekannten Elementarteilchen unterscheiden.

Bei der indirekten Suche hingegen analysieren die Wissenschaftler ganz exakt die bereits bekannten Elementarteilchen darauf, ob sie sich auch wirklich so verhalten wie vom Standardmodell vorhergesagt. Gibt es nicht vielleicht doch irgendwo eine Abweichung zum Standardmodell? Liefert eine andere Theorie womöglich bessere Ergebnisse? Zerfällt ein instabiles Teilchen in andere Produkte als vom Standardmodell vorhergesagt? Solche Effekte könnten das Werk exotischer Teilchen sein, die im Hintergrund in bislang unbekanntem Prozentsatz eine Rolle spielen.

Insbesondere das vor wenigen Jahren nachgewiesene Higgs-Teilchen haben die CERN-Forscher im Visier. Es verleiht allen anderen Elementarteilchen ihre Ruhemasse und war das letzte ausstehende Steinchen im Baukasten des Standardmodells. Jetzt setzen die Teilchenphysiker alles daran, herauszufinden, ob es auch wirklich genau das Higgs-Teilchen ist, welches das Standardmodell fordert. Auch hier die Hoffnung: Wo es Abweichungen gibt, ließe

sich für die Theoriebildung neu ansetzen. Leider hatten auch die Forscher am LHC bisher noch keinen Erfolg, weder mit der direkten noch mit der indirekten Suche.

### **Supersymmetrie: Eine attraktive Theorie für exotische Teilchen**

»Bislang hat sich das Standardmodell als überraschend stabil erwiesen«, sagt Wolfgang Hollik vom Max-Planck-Institut für Physik in München. Er arbeitet dort als Quantentheoretiker und beschäftigt sich mit verschiedenen möglichen Erweiterungen des Standardmodells. Besonders ein theoretischer Ansatz hat es ihm angetan, der, wie Hollik findet, etliche Vorzüge anderer Theorien auf sich vereint.

Die Rede ist von der Supersymmetrie. Laut dieser besitzt jedes Teilchen normaler Materie ein supersymmetrisches Gegenstück – und zwar eines, das sehr viel schwerer ist als sein gewöhnlicher Partner. Viele supersymmetrische Theorien sagen nun die Existenz von Superpartnern voraus, die elektrisch neutral und massereich wären. Unter bestimmten Bedingungen könnten sie stabil und schwer genug sein, um die Dunkle Materie im Universum zu bilden. Das Gravitino wäre ein solcher Kandidat.

Es ist der Superpartner des ebenfalls noch hypothetischen Gravitons, das für die Schwerkraft verantwortlich sein soll. In einem Teilchendetektor wäre es unsichtbar und würde sich nur dadurch bemerkbar machen, dass es heimlich Energie aus einem Prozess wegtransportiert. Es gibt aber auch zahlreiche andere Möglichkeiten, in supersymmetrischen Modellen Teilchen der Dunklen Materie einzuführen. »Ist das leichteste supersymmetrische Teilchen stabil und zerfällt nicht in unsere bekannten Standardmodell-Teilchen, ist es ein guter Kandidat für Dunkle Materie«, sagt Melzer-Pellmann.

Auch zahlreiche andere Probleme ließen sich lösen. »So kann das Standardmodell nicht erklären, warum es im Universum so viel Materie und keine Antimaterie gibt«, meint Hollik. Die Supersymmetrie könnte es. Oder warum das Higgs genau die Masse hat, die die Forscher am LHC ermittelten. Laut Standardmodell hat sie rein zufällig diesen Wert, die Supersymmetrie hätte eine befriedigendere Antwort parat. Auch hoffen viele Forscher, mit Hilfe der Supersymmetrie eine einheitliche theoretische Beschreibung aller physikalischen Kräfte liefern zu können. Bislang ist das