



**Matthias Steinmetz**

---

## **Das Standard-Modell der Kosmologie – schön, elegant oder grotesk?**

In: Spekulative Theorien, Kontroversen, Paradigmenwechsel : Streitgespräch in der Wissenschaftlichen Sitzung der Versammlung der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften am 25. November 2016. – Berlin: 2017, S. 9-15  
(Debatte ; 17)

Persistent Identifier: [urn:nbn:de:kobv:b4-opus4-26749](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:b4-opus4-26749)

---

Die vorliegende Datei wird Ihnen von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften unter einer Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Germany (cc by-nc-sa 3.0) Licence zur Verfügung gestellt.



Matthias Steinmetz

## Das Standard-Modell der Kosmologie – schön, elegant oder grotesk?<sup>1</sup>

Die Kosmologie geht davon aus, dass das Universum zu 27 % aus sogenannter dunkler Materie besteht, zumeist angenommen in Form eines noch nicht entdeckten Elementarteilchens, und zu 68 % aus sogenannter dunkler Energie, deren Ursprung im Rahmen des heutigen Gebäudes der Physik schlicht unverständlich ist. Nichtsdestotrotz sprechen Kosmologen vom „Standardmodell der Kosmologie“ – für den nicht-Fachmann sicherlich eine Zumutung und die Vermutung, dass es sich hierbei bestenfalls um eine Spekulation handelt, liegt nahe. Ich möchte im Folgenden kurz darlegen, woraus sich die Sicherheit, dass es sich um mehr als eine Spekulation handelt, herrührt und dass der Begriff „Standardmodell“ durchaus gerechtfertigt ist.

Der Begriff „dunkle Materie“ wurde erstmals von Fritz Zwicky in den 1930ern geprägt, das Phänomen geht aber deutlich weiter zurück und hat auch einen Regionalbezug zu unserer Akademie. Es begann etwa einen Kilometer südlich von hier in der Nähe des heutigen Checkpoint Charlie. An der damaligen Berliner Sternwarte wurde 1846 der Planet Neptun entdeckt. Nun ist es per se keine Neuigkeit, dass man in der Wissenschaft neue Dinge entdeckt, neu aber war die Art und Weise, wie er entdeckt wurde! Zunächst wurde die Existenz eines weiteren Planeten von Le Verrier postuliert zur Erklärung von nicht verstandenen Störungen in der Bahn des Planeten Uranus. Die Position des neuen Planeten wurde berechnet und Le Verrier überzeugte Johann Gottfried Galle an der Berliner Sternwarte, im entsprechenden Bereich nach dem vermuteten Planeten zu suchen. Dieser richtete das Teleskop auf die berechnete Position und nach einer Suche von weniger als einer Stunde wurde, auch dank der von der Akademie frisch herausgegebenen Sternkarten für diese Himmelsregion, dieser Planet entdeckt. Zum ersten Mal erfolgte eine Vorhersage einer Entdeckung aufgrund der theoretischen Physik, die dann durch das Experiment, durch die Beobachtung in der Praxis bestätigt wurde.

---

<sup>1</sup> Der Titel nimmt Bezug auf drei vor rund 15 Jahren erschienene Veröffentlichungen, die das Universum mit den Begriffen „beautiful“ [1], „elegant“ [2] und „preposterous“ [3] versehen.

Diese Art und Weise zu arbeiten ist heutzutage in der Astronomie und Physik gang und gäbe. Ich nehme als Beispiel eines der spannendsten Themen der heutigen Astronomie, die Entdeckung von Planeten um andere Sterne – sogenannte Exoplaneten. Wir implizieren ihre Existenz aufgrund der Störung, die diese (unsichtbaren) Planeten in der Bahn des entsprechenden Sterns induzieren. Mittlerweile kennen wir über 2.000 solcher Exoplaneten. Die Idee, mittels Theorie eine Vorhersage zu machen und diese dann durch das Experiment zu bestätigen, ist in der Teilchenphysik praktisch zur Standardarbeitsweise geworden ist. Das Standardmodell der Teilchenphysik wurde in den 1960er und 70er Jahren entwickelt. Etwa die Hälfte der Teilchenarten, die dieses Modell enthält, waren damals nicht nachgewiesen. Es folgten nach der Formulierung des Standardmodells die Entdeckung des W-Teilchens, des Z-Teilchens, des Top- und Bottom-Quarks, der Gluonen sowie – vor wenigen Jahren – die des Higgs-Bosons. All diese Teilchen wurden zunächst basierend auf der Theorie vorhergesagt und später im Experiment am Beschleuniger gemessen. Als die Deutsche Physikalische Gesellschaft im letzten Oktober anlässlich der Bekanntgabe des Nobelpreises für Physik 2016 ins Magnus-Haus einlud, hat es der Präsident der Gesellschaft, der ehemalige Generaldirektor des CERN, Dieter Heuer, als bemerkenswert bezeichnet, dass für den Physik-Nobelpreis 2016 die Theorie *nach* der Beobachtung kam. Vielmehr sei es in der Physik eher üblich, dass die Theorie *vor* der Beobachtung käme.

Nun, wie sieht es für die Kosmologie aus? Auch dort haben wir ein Standardmodell. Die grundlegende Herangehensweise ist relativ einfach. Die Natur gibt uns Zugang zum Aussehen des Kosmos zu zwei Epochen: Zum einen ist das die heutige großräumige Verteilung der Galaxien, zum anderen die Verteilung der Materie zu einem Zeitpunkt, als das Universum gerade durchsichtig wurde, etwa 400.000 Jahre nach dem Urknall. Letzteres sehen wir in Form der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung. Wir können nun versuchen, die Materieverteilung (genauer ihre statistischen Eigenschaften) 400.000 Jahre nach dem Urknall als Anfangsbedingung anzunehmen und dann diese Verteilung mit Hilfe der physikalischen Gesetze bis zum heutigen Tag vorwärtszurechnen. Das scheint zunächst ein hoffnungsloses Unterfangen zu sein, funktioniert aber erstaunlich gut, da wir uns nur mit sehr großen Skalen beschäftigen, auf denen von den vier Naturkräften nur noch die Gravitation wirklich relevant ist. Abbildung 1 vergleicht die Galaxienverteilung in zwei simulierten Universen mit der tatsächlich in der sogenannten 2dF-Durchmusterung beobachteten Galaxienverteilung. In der Tat sind die abgebildeten

Verteilungen im Rahmen der bekannten Unsicherheiten der Daten statistisch äquivalent!

Das Standardmodell der Kosmologie scheint folglich eine sehr gut funktionierende Theorie zu sein. Es hat leider nur einen Haken: Wir müssen annehmen, dass das Universum nur zu 5 % aus uns bekanntem Material besteht, baryonische Materie, also der Stoff des Universums, aus dem auch wir gemacht sind. Der Großteil des Massenbudgets des Kosmos, rund 27 %, liegen in Form eines mysteriösen Stoffs vor, den wir dunkle Materie nennen, von dem wir relativ wenig wissen außer zwei Sachen: Zum einen muss er kalt sein, d. h. die Geschwindigkeiten der einzelnen Teilchen sind im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit gering, zum anderen muss er aus etwas anderem sein als der Stoff, aus dem das sichtbare Universum gemacht ist, da sonst im frühen Universum zu viel Helium erbrütet worden wäre. Und als sei das noch nicht der Zumutungen genug, müssen weitere 68 % des Universums aus einer weiteren Unbekannten bestehen, die wir dunkle Energie nennen. Während wir für die dunkle Materie wenigstens im Rahmen der Teilchenphysik eine Reihe von Kandidaten haben, hat die dunkle Energie im Gebäude der Physik heute gar keinen rechten Platz. Wir stehen – wie seit dem frühen 20. Jahrhundert nicht mehr – vor einem Rätsel.

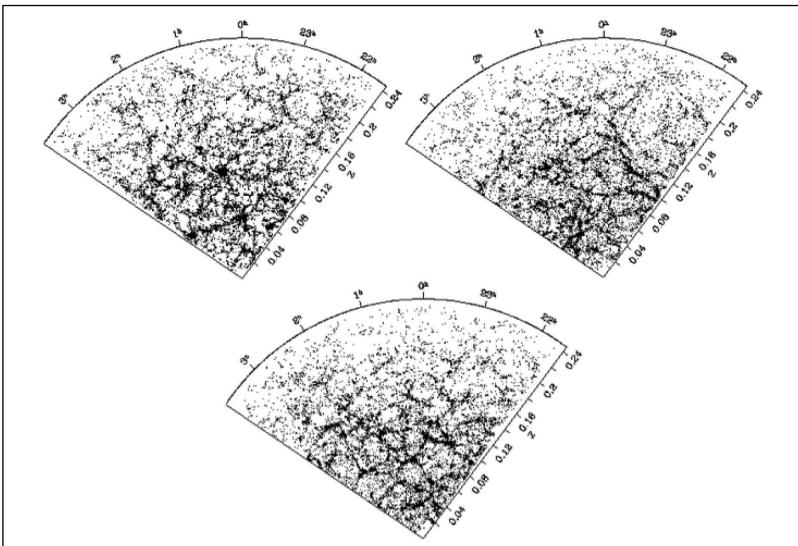


Abb. 1: Vergleich der Galaxienverteilung in zwei simulierten Universen mit dem im Rahmen der 2dF-Durchmusterung tatsächlich beobachteten (oben links).

Dies scheint nun eine Spekulation par excellence zu sein. Woher kommt die Zuversicht, dies als *Standardmodell* zu bezeichnen? Für die dunkle Materie ist die Sache noch relativ übersichtlich: Ähnlich wie für den Neptun oder die Exoplaneten sehen wir die gravitative Wirkung dieser dunklen Materie auf andere Massen und dies über einen weiten Bereich an Längenskalen – von der Milchstraße bis zum Kosmos als Ganzem. Ein Beispiel ist die Art und Weise, wie Sterne das galaktische Zentrum umkreisen. Je größer die Abstände, bei denen man misst, desto größer ist der Beitrag der dunklen Materie – das Doppelte der Masse aller sichtbaren Sterne in unserer Milchstraße, das Sechsfache in den Außenbereichen von Galaxien. Auch in Galaxienhaufen ist die Gravitation dominiert vom Wirken der dunklen Materie – dort messen wir die Geschwindigkeit in Form der Temperatur des Röntgenstrahlung emittierenden Gases. Galaxienhaufen bieten uns aber noch einen weiteren, davon unabhängigen Zugang. Wir können in Form des sogenannten Gravitationslinseneffekts die Masse des Galaxienhaufens aus der gravitativen Verzerrung des Lichts von Hintergrundquellen bestimmen und kommen zu einem analogen Ergebnis – besagter Faktor von 6. Last but not least sehen wir großräumige Geschwindigkeitsfelder, sehen Ströme von Galaxien in Galaxienhaufen und Superhaufen reinfallen, und auch aus dieser Geschwindigkeit lässt sich das Vorkommen gravitierender dunkler Materie bestimmen – mit identischem Ergebnis: 27 % der Masse des Kosmos liegen in dunkler Materie vor.

Kommen wir zur dunklen Energie. Eine der Grundeigenschaften der Gravitation – sei es in Newtonscher, sei es in Einsteinscher Formulierung – ist, dass sie immer anziehend wirkt. Folglich sollte der Kosmos als ganzes sich heute aufgrund seiner eigenen Gravitation langsamer ausdehnen als er das in der Vergangenheit tat. Wenn wir diese Abbremsung messen, können wir letztendlich die Gesamtmasse des Kosmos und somit das Verhältnis aus leuchtender und nicht-leuchtender Materie bestimmen. Umso überraschender war die Messung der Teams um Saul Perlmutter, Adam Riess und Brian Schmidt, dass sich das Universum heute schneller ausdehnt, als es das vor rund sieben Milliarden Jahren tat [5, 6]. Das Universum bremst sich in seiner Ausdehnung heute nicht ab, sondern es beschleunigt sich. Das Vakuum übt sozusagen einen Druck aus, es hat eine Energie, die das Universum auseinanderdrückt. Was diese Energie ist und woher sie kommt – wir wissen es nicht. Es ist eines der großen Rätsel, wenn nicht gar das große Rätsel der modernen Physik, aber die Messungen sind mittlerweile mit verschiedenen Ansätzen bis ins Detail überprüft.

Ist also die dunkle Materie oder gar die dunkle Energie etwas, was man als den Äther des 21. Jahrhunderts bezeichnen kann? Wir erinnern uns an die Diskussion des 19. Jahrhunderts nach der Formulierung der Maxwell'schen Gleichungen, dass es eine das Universum durchdringende Substanz geben müsse, die die Ausbreitung des Lichts so ermöglicht, wie auf der Erde die Luft die Ausbreitung des Schalls erlaubt. Nein, es ist genau das Gegenteil [3], denn im 19. Jahrhundert war es unumstritten, dass es einen Äther geben sollte. Erst nach den Experimenten von Michelson und Morley musste man akzeptieren, dass es diesen Äther nicht gibt. Mit der dunklen Energie verhält es sich genau umgekehrt. Niemand wollte sie haben, sie war in keiner Theorie zwingend vorgesehen. Erst das Experiment bzw. die Beobachtung hat uns gezwungen zuzugeben, dass da etwas ist, dessen Wirkung wir messen können, auch wenn wir nicht wissen, was es ist.

Nun, das kosmologische Standardmodell ist nicht perfekt. Es gibt eine Reihe von anscheinenden Inkonsistenzen auf „kleinen“ Skalen<sup>2</sup>. Allerdings verlassen wir dann auch den durch Gravitation dominierten Bereich. Andere Kräfte wie gasdynamische Kräfte, Druckkräfte oder Magnetfelder gewinnen an Bedeutung. Es ist folglich nicht offensichtlich, ob die Inkonsistenzen auf diesen Skalen ein Problem des Standardmodells widerspiegeln oder ob wir die komplexe Astrophysik auf diesen Skalen nicht hinreichend verstehen.

Ich habe meinen Beitrag mit einem historischen Blick auf den Neptun begonnen, weil an ihm erstmals gezeigt wurde, wie man aus einer funktionierenden Theorie eine Vorhersage machen und zu neuen Entdeckungen kommen kann. Es ist aber genau diese Vorgehensweise, die uns auch die Risiken der Methode verdeutlicht. Motiviert von seinem epochalen Erfolg widmete sich Le Verrier in den Folgejahren der Bahn des Planeten Merkur und versuchte, seinen Erfolg zu wiederholen. Auch Merkur zeigt Bahn-Eigenschaften, die im Rahmen der Newton'schen Theorie nicht zu erklären sind. Le Verrier postulierte einen Planeten im Innern der Merkur-Bahn, also zwischen Merkur und Sonne, der Planet bekam sogar einen Namen – Vulkan. In mehreren Veröffentlichungen Mitte des 19. Jahrhunderts wurde sogar die Entdeckung dieses Planeten verkündet. Wie wir heute wissen, fallen alle diese Sichtungen in die Kategorie „Glaube macht sehend“. Die Unregelmäßigkeiten der Merkur-Bahn konnten erst durch die allgemeine Relativitätstheorie abschließend erklärt werden.

---

<sup>2</sup> In der Kosmologie versteht man unter kleinen Skalen üblicherweise Längenskalen unterhalb der Ausdehnung einer Galaxie, also weniger als eine Million Lichtjahre.

Die Merkur-Bahn war der erste Test, an dem Einstein selbst die Gültigkeit seiner neuen Theorie überprüft hatte. Es war nicht ein neues Objekt, das die Diskrepanz zwischen Theorie und Beobachtung erklärte, sondern eine komplett neue Herangehensweise an die Theorie der Gravitation.

### **Diskussion zum Vortrag**

**Martin Quack:** Welches sind die Möglichkeiten, die beobachteten Effekte, die auf die hypothetische dunkle Materie zurückgeführt werden, stattdessen durch eine Änderung des Gravitationsgesetzes zu erklären?

**Matthias Steinmetz:** Es gibt Ansätze, die Dynamik von Galaxien, insbesondere die Rotationseigenschaften von Spiralgalaxien statt mit dunkler Materie durch eine Änderung des Gravitationsgesetzes im schwachen Bereich zu erklären. Das läuft unter dem Namen *Modified Newtonian Dynamics (MOND)*. Man verändert das Newtonsche Gravitationsgesetz dahingehend, dass es bei extrem schwachen Kräften nicht auf Null geht, sondern eine Restbeschleunigung beibehält.

**Martin Quack:** Das funktioniert?

**Matthias Steinmetz:** Es funktioniert auf Skalen von Galaxien. Außerhalb von Galaxien funktioniert es nicht, weil man diese Ansätze nicht hinreichend verallgemeinern konnte. Das Problem ist, dass man sozusagen mit dem Bad auch das Kind ausschüttet. Es ist noch nicht gelungen, eine überzeugende kovariante Formulierung für MOND zu finden, auch wenn es interessante Ansätze dazu gibt. Im Ergebnis löst man das Problem der Rotationseigenschaften von Galaxien, gibt aber gleichzeitig die komplette Kosmologie, die allgemeine Relativitätstheorie, und alles, was damit zusammenhängt, auf. Und das ist ein Preis, den die Mehrheit der Physiker bisher nicht bereit ist zu zahlen.

**Reinhard Lipowsky:** Lässt sich allgemein verständlich ausdrücken, warum man beides braucht, dunkle Energie separat von dunkler Materie?

**Matthias Steinmetz:** Im Fall der Galaxien und Galaxienhaufen benötigt man mehr Gravitation als das, was die Masse, deren Licht man sehen kann, erzeugt. Gravitation muss verstärkt werden. Das Universum selbst, wenn es sich beschleunigt ausdehnt, braucht dagegen eine negative Gravitation, d. h. wir haben zwei völlig verschiedene Sorten. Im Fall der dunklen Materie geht es einher mit der Bildung von Strukturen, im Fall der dunklen Energie muss die Wirkung aus der Homogenität selbst kommen.

## Literatur

- [1] Livio, Mario: *The Accelerating Universe: Infinite Expansion, the Cosmological Constant, and the Beauty of the Cosmos*, Wiley and Sons, 2000.
- [2] Green, Brian: *The Elegant Universe*, W.W. Norton, 1999/2003.
- [3] Carrol, Sean: *The preposterous Universe*. Blog auf [www.preposterousuniverse.com](http://www.preposterousuniverse.com).
- [4] Frenk, C. S.: *Connecting Cosmological Simulations to the Real World*. In: *IAU Symposium* 208 (2003), S. 245–260.
- [5] Riess, A. G. et al.: *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant*. In: *Astron. J.*, 116 (1998), S. 1009–1038.
- [6] Perlmutter, S. et al.: *Measurement of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 high-redshift supernovae*. In: *Astrophys. J.*, 517 (1999), S. 565–586.