

# Das Standardmodell der Kosmologie unter Beschuss

## *Wachsende Zweifel an der Notwendigkeit der dunklen Energie*

In den letzten zehn Jahren hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass sich das Universum unter dem Einfluss einer dunklen Energie immer schneller ausdehnt. Jetzt mehren sich allerdings die Zweifel, ob man diese ominöse Energie tatsächlich braucht.

Die Kosmologie galt einst als eine Pseudowissenschaft, in der mangels Daten unbesorgt drauflospekuliert werden durfte. Diese Zeiten sind endgültig vorbei. Mit der systematischen Beobachtung von weit entfernten Supernova-Explosionen, einer immer genaueren Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung und anderen Beobachtungskampagnen ist die Kosmologie zu einer ernstzunehmenden Wissenschaft geworden, deren Vorhersagen sich inzwischen mit einer Genauigkeit von wenigen Prozent überprüfen lassen.

### Ein Modell mit Lücken

Das derzeit favorisierte Modell geht davon aus, dass wir in einem Universum leben, dessen Ausdehnung sich seit einigen Milliarden Jahren immer mehr beschleunigt. Die gewöhnliche Materie spielt in diesem Modell nur eine untergeordnete Rolle. Der dominierende Einfluss geht vielmehr von der dunklen Materie und der mindestens ebenso ominösen dunklen Energie aus, die zusammen über 95 Prozent zum Energieinhalt des Universums beitragen. Dieses sogenannte Konkordanzmodell hat erst kürzlich einen weiteren Test triumphal bestanden. Die auf einer fünfjährigen Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung basierenden Daten des amerikanischen WMAP-Satelliten schränken die Parameter des Konkordanzmodells weiter ein und erlauben es sogar, genauere Aussagen über die inflationäre Phase zu machen, die das Universum diesem Modell gemäss wenige Augenblicke nach dem Urknall durchlief.

Und dennoch weht dem Standardmodell der Kosmologie in jüngster Zeit ein scharfer Wind ins Gesicht. Vor allem die dunkle Energie, die im Standardmodell die treibende Kraft für die beobachtete beschleunigte Expansion ist, steht zur Disposition. Diese Energie sei möglicherweise nur eine Illusion, die dadurch vorgetäuscht werde, dass man im Standardmodell stillschweigend die inhomogene Materieverteilung im Universum unterschlägt, sagt Thomas Buchert von der Universität Lyon 1, der zu den Hauptkritikern gehört.

Dass die dunkle Energie erklärungsbedürftig ist, geben auch die Anhänger des Konkordanzmodells bereitwillig zu. Denn bis heute weiss niemand, was sich hinter dieser Worthölse verbirgt. Die Hoffnung ist, dass sich die dunkle Energie eines Tages mit der Energie des Vakuums oder mit einem alles durchdringenden Feld (der sogenannten Quintessenz) in Verbindung bringen lässt. Nicht alle Forscher teilen diese Zuversicht. Allerdings sind die dargebotenen anderen Theorien oft ebenso spekulativ. So propagieren manche Kosmologen einen Abschied von der allgemeinen Relativitätstheorie. Dass man «dunkle» Einflüsse bemühen müsse, um die Entwicklung des Universums korrekt zu beschreiben, ist in

ihren Augen ein Ausdruck dafür, dass die Einsteinsche Gravitationstheorie falsch sei.

### Kein Bedarf an «neuer Physik»

So weit gehen Buchert und seine Mitstreiter nicht. Sie wählen einen vergleichsweise konservativen Weg, der ohne «neue Physik» auskommt. Ihr Ansatzpunkt ist die Tatsache, dass die ursprünglich gleichmässig verteilte Materie heute zu Sternen, Galaxien und Galaxienhaufen verklumpt ist. Dem Standardmodell der Kosmologie liegt die (unbewiesene) Annahme zugrunde, dass die inhomogene Verteilung der Materie keinen Einfluss auf die kosmische Entwicklung hat: Es wird schlicht angenommen, dass sich der Mittelwert der tatsächlich vorhandenen Strukturen zeitlich genauso entwickelt wie eine homogene Materieverteilung. Schon vor einigen Jahren konnte Buchert allerdings zeigen, dass das so nicht stimmt: In den Gleichungen, die die zeitliche Entwicklung des gemittelten Universums beschreiben, taucht ein auf die Dynamik rückwirkender Zusatzterm auf, der sich auf grossen Skalen formal wie die dunkle Energie verhält. Seither, so Buchert, versuche man herauszufinden, ob diese Rückkopplung ausreiche, um die beschleunigte Expansion des Universums auch ohne die ad hoc eingeführte dunkle Energie zu erklären.

Zu den Forschern, die dieser Frage nachgegangen sind, gehört Syksy Räsänen von der Universität Genf. In einer bisher nur auf dem Web veröffentlichten Arbeit hat er versucht, die Gleichungen von Buchert näherungsweise zu lösen. Dabei sei er von einem vereinfachten, aber realistischen Modell für die Strukturbildung im Universum ausgegangen, so Räsänen. Das wesentliche Prinzip lasse sich allerdings auch mit einer simplen Überlegung plausibel machen. Wenn sich die ursprünglich homogen verteilte Materie irgendwo zu verdichten beginne, so verlaufe die Expansion in dieser Region langsamer als im Mittel. Das Gegenteil sei in jenen Regionen der Fall, aus denen die Materie abgezogen werde. Da das Volumen der unterdichten Regionen schneller wachse als das der überdichten, dominierten diese die Ausdehnung mehr und mehr – mit dem Resultat, dass die mittlere Expansionsrate zunehme.

In dem Modell, das den Berechnungen von Räsänen zugrunde liegt, ist dieser Effekt allerdings nicht stark genug ausgeprägt, um eine beschleunigte Ausdehnung zu erzwingen. Die Expansion verlief zwar schneller als in einem Referenz-Universum mit homogen verteilter Materie; der Punkt, wo die Abbremsung in eine Beschleunigung umschlägt, wurde aber nicht erreicht. Räsänen möchte allerdings nicht ausschliessen, dass man dieses Verhalten mit einem realistischen Modell reproduzieren kann. Auch wenn der Rückkopplungseffekt in den bisherigen Berechnungen noch zu klein sei, habe er doch immerhin die richtige Grössenordnung.

Ein ermutigendes Zeichen ist auch, dass die Strukturbildung in dem Modell von Räsänen etwa zehn Milliarden Jahre nach dem Urknall wichtig wird. Ungefähr zur gleichen Zeit war in unserem Universum jener Punkt erreicht, wo unter dem Einfluss der dunklen Energie aus der verlangsamt eine beschleunigte Expansion wurde. Damit

deutet sich eine einfache Lösung für das sogenannte Koinzidenzproblem an. Bis heute können die Anhänger des Konkordanzmodells nämlich nicht erklären, warum die dunkle Energie ausgerechnet in der heutigen Epoche (und nicht viel früher oder viel später) zur dominierenden Energieform wurde. Durch die Verknüpfung mit der Strukturbildung erübrigt sich diese Frage gewissermassen. Es ist dann die Zeitskala der Strukturbildung, die den zeitlichen Rahmen für die beschleunigte Expansion vorgibt.

### Eine Frage der Perspektive

Optimistischer als von Räsänen wird die Situation von David Wiltshire von der University of Canterbury in Christchurch, Neuseeland, beurteilt. Er gehört zu jenen Kosmologen, die behaupten, völlig auf die dunkle Energie verzichten zu können. Auch Wiltshire geht von jenen Gleichungen aus, die Buchert vor einigen Jahren aufgestellt hat. Er verweist jedoch darauf, dass man zusätzlich unseren besonderen Beobachterstatus im Universum berücksichtigen müsse. Als Bewohner einer durch Gravitationskräfte zusammengehaltenen Galaxie würden wir die Expansion des Universums anders beurteilen als ein idealer Beobachter, der im frei expandierenden Raum mitschwimme. Was für einen solchen Beobachter wie eine normale (also verlangsamte) Expansion aussehe, könne aus unserer Perspektive durchaus als beschleunigte Expansion wahrgenommen werden. Der Grund hierfür ist laut Wiltshire, dass kosmische Beobachtungen in der Regel auf Zeit- und Längenmessungen beruhen. Da sich die Gravitationskräfte in unserer Galaxie jedoch auf den Gang von Uhren und die Länge von Massstäben auswirken, messen wir andere Zeiten und Distanzen (und damit auch andere Beschleunigungen) als ein Beobachter, der sich in einer frei expandierenden Region des Weltraums befindet.

Um diese Effekte zu quantifizieren, geht Wiltshire von einer Materieverteilung aus, wie sie durch jüngste Beobachtungen nahegelegt wird. Unser Universum ähnelt demnach einem Schwamm, der volumenmässig von materiefreien Blasen dominiert wird. Die zu Galaxienhaufen zusammengeballte Materie sitzt in den fein verästelten Wänden des Schwamms. Wie Wiltshire zeigen konnte, lassen sich mit einer solchen Materieverteilung wichtige kosmologische Beobachtungen der letzten Jahre ebenso gut erklären wie mit dem Konkordanzmodell – darunter die Supernova-Beobachtungen, die vor zehn Jahren die Diskussion um die dunkle Energie überhaupt erst ins Rollen gebracht hatten. Die beste Übereinstimmung mit den Supernova-Daten ergibt sich, wenn das heutige Universum zu 76 Prozent von materiefreien Blasen dominiert wird und die Hubble-Konstante (also die Expansionsrate des heutigen Universums) einen Wert von 61,7 (in den entsprechenden Einheiten) besitzt. Dieser Wert ist deutlich kleiner als jener, der vom Konkordanzmodell favorisiert wird, und auch kleiner als der Wert, den Wendy Freedman und ihre Mitarbeiter im Rahmen des «Hubble Space Telescope Key Project» ermittelt haben. Die Expansionsrate passt aber zu den Messungen von Allan Sandage und seinen Mitarbeitern. Damit könnte ein alter Streit um die korrekte Bestimmung der Hubble-Konstante neue Nahrung erhalten. Die inhomogene Materieverteilung wirkt sich auch auf andere kosmologische Parameter aus. So ist das Universum laut den Berechnungen von Wiltshire 14,7 Milliarden Jahre alt (aus der Perspektive eines galaktischen Bewohners). Damit wäre es etwa eine Milliarde Jahre älter als im Konkordanzmodell. Manche Forscher sehen darin einen

Vorteil, weil damit mehr Zeit für die Entstehung der ersten Strukturen im Universum zur Verfügung stünde. Ein weiteres Plus ist, dass das Modell von Wiltshire mit weniger dunkler Materie (nicht Energie!) auskommt als das Konkordanzmodell.

### Viele Kosmologen halten sich bedeckt

Die Berechnungen von Wiltshire sind allerdings selbst bei seinen Mitstreitern nicht unumstritten. So bemängelt Buchert etwa die Art und Weise, wie Wiltshire neue Uhren und Massstäbe in seine Theorie einführt. Und auch Dominik Schwarz von der Universität Bielefeld sähe es lieber, wenn man solche Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie rigoros ableiten könnte. Wie Buchert ist aber auch Schwarz davon überzeugt, dass lokale Strukturen einen Einfluss auf globale Beobachtungsgrössen haben. So konnte er etwa berechnen, dass sich der Wert der Hubble-Konstante durch den Prozess der Mittelung um fünf bis zehn Prozent verändern kann.

Von den Anhängern des Standardmodells der Kosmologie werden diese Arbeiten bis anhin nur am Rande zur Kenntnis genommen. David Spergel etwa, der zum Wissenschaftsteam des WMAP-Satelliten gehört, findet die Idee, dass die beschleunigte Expansion des Universums nur vorgetäuscht sein könnte, physikalisch unplausibel. Er gibt aber zu, das nicht rigoros beweisen zu können. Andere Kosmologen begnügen sich mit dem Hinweis, dass das Konkordanzmodell mit verschiedenen Beobachtungen im Einklang stehe und es daher keiner Alternative zur dunklen Energie bedürfe. Buchert findet allerdings, dass es sich die Anhänger des Konkordanzmodells damit zu einfach machen. Selbst wenn die beschleunigte Expansion nur zu fünf Prozent auf lokale Strukturen im Universum zurückzuführen sei, müsse man sich mit diesen Effekten auseinandersetzen. Sonst könne man nicht von Präzisions-Kosmologie sprechen.

*Christian Speicher*