

Der Nachhall des Urknalls

Physik-Nobelpreis für Pionierleistungen in der Kosmologie

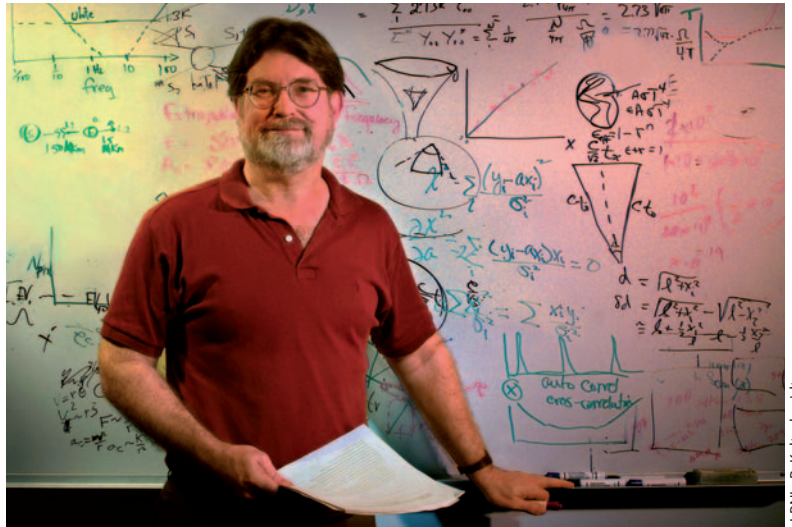
Torsten A. Enßlin

Der Physik-Nobelpreis geht 2006 zu gleichen Teilen an die beiden amerikanischen Astrophysiker John Mather und George Smoot, und zwar für die Entdeckung des Schwarz-Körper-Spektrums und der Anisotropie der Kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (Cosmic Microwave Background, CMB), die ihnen mit den Instrumenten an Bord des NASA-Satelliten Cosmic Background Explorer (COBE) gelang.

Die bahnbrechenden Messungen von Mather und Smoot bestätigten, dass sich im frühen Universum Materie und Strahlung in einem nahezu perfekten thermodynamischen Gleichgewicht befanden. Winzige Abweichungen einer räumlichen Gleichverteilung von Materie und Energie haben sich seitdem zu Sternen, Galaxien und den großräumigen Strukturen entwickelt, die heute im Universum sichtbar sind. Mather und Smoot waren die führenden Köpfe im COBE-Team, dessen Messungen die Kosmologie aus dem Bereich der theoretischen Vermutungen heraus in den Rang der „exakten Wissenschaft“ erhob, wie es das Nobel-Komitee in seiner Laudatio ausdrückte.

Vorhersage und Entdeckung

Bereits 1948 sagte der russisch-amerikanische Physiker George Gamov zusammen mit Ralph Alpher und Robert Herman eine thermische Hintergrundstrahlung voraus, die uns im Mikrowellenbereich aus allen Richtungen gleichförmig (isotrop) erreichen sollte. Diese Vorhersage ergab sich als direkte Konsequenz aus der Urknalltheorie und aufgrund von Überlegungen zur primordialen Heliumsynthese. Demnach hatte sich das Universum nach rund 380 000 Jahren so weit abgekühlt, dass das anfängliche



LBNL, R. Kaltschmidt

George Smoot beschäftigt sich aktuell mit dem Aufbau astronomischer Teleskope für hochenergetische Neutrinos

und ist Mitglied der Planck Surveyor Kollaboration zur Vermessung des Mikrowellenhintergrundes.

Plasma zu Atomen rekombinierte. Dadurch wurde das Universum transparent, sodass sich die Photonen fortan ungehindert ausbreiten konnten – aufgrund der Expansion wurden sie aber stark in den Mikrowellenbereich rotverschoben [1].

Gamovs Vorhersage wurde zunächst wenig beachtet. Aber im Jahr 1964 entdeckten zwei Wissenschaftler der Bell Laboratories, Arno Penzias und Robert Wilson, bei der Untersuchung von Störsignalen in einem für die Satelliten-Kommunikation vorgesehenen Frequenzbereich ein isotropes Signal in ihren Daten. Dessen Ursprung blieb zunächst rätselhaft. Die beiden Physiker tippten auf Taubendreck auf der Antenne. Erst eine Gruppe von Kosmologen aus Princeton um Robert Dicke und Jim Peebles erkannte, dass es sich um die Strahlung des Urknalls handelte. Ironie der Geschichte: Dicke und Peebles waren wenige Monate davon entfernt, selbst danach zu suchen. So erhielten aber Penzias und Wilson für die Entdeckung der Hintergrundstrahlung 1978 den Nobelpreis für Physik.

Elf Jahre später, 1989, wurde der Satellit COBE¹⁾ ins All geschossen, um die Hintergrundstrahlung zu vermessen. Zu den führenden Köpfen im Forscherteam gehörten John C. Mather vom Goddard Space Flight Center der NASA im US-Bundesstaat Maryland und George F. Smoot vom kalifornischen Lawrence Berkeley National Laboratory.

Die ersten neun Minuten

Bereits in den ersten neun Betriebsminuten hatte John Mathers Instrument FIRAS, ein Ferninfrarot-Spektrograph, gezeigt, dass der spektrale Intensitätsverlauf der CMB-Strahlung exakt den berühmten theoretischen Kurven von Max Planck aus dem Jahre 1900 folgt: Es ist die Strahlung eines idealen Schwarzen Körpers, eines Objekts in perfektem thermodynamischen Gleichgewicht mit seinem Strahlungsfeld. Messungen von COBE/FIRAS in den folgenden vier Jahren bestätigten die Erkenntnisse der ersten neun Minuten [2]; die Abweichungen von der exakten Schwarz-Körper-Kurve sind extrem klein und betragen weniger als ein

1) <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>

Zehntausendstel (siehe Abb. unten). Demnach muss das Universum ursprünglich fast völlig uniform gewesen sein. Ein so exaktes globales Gleichgewicht zwischen Materie und Strahlung hätte später als einen Monat nach dem Urknall gar nicht mehr zustande kommen können.

George Smoots DMR-Instrument, ein sog. differenzielles Mikrowellen-Radiometer, war dafür ausgelegt, kleinste Schwankungen der Temperatur der CMB-Strahlung um ihren Mittelwert von 2,73 Grad über dem absoluten Nullpunkt zu kartieren (Abb. auf S. 26 unten). Nach einem Betriebsjahr gelang Smoot und seinen Kollegen der erste Nachweis, dass solche Schwankungen tatsächlich existieren, und zwar auf dem Niveau von einem Hunderttausendstel. Die Existenz dieser winzigen Fluktuationen war mehr als 20 Jahre vor dem COBE-Start von russischen und amerikanischen Theoretikern vorhergesagt worden. Man kann sich vorstellen, dass sie von kleinen Schwankungen in der Materie- und Strahlungsdichte im frühen Universum verursacht wurden. Seit der Entkopplung von Materie und Strahlung (etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall) sind diese Schwankungen durch die Gravitationskraft angewachsen und haben zu all den Strukturen geführt, die das Universum erfüllen. Mit dem DMR-Instrument von COBE haben wir das erste wirkliche Bild davon bekommen, wie das Universum aussah, bevor es Sterne oder gar Galaxien gab.

Seit COBE ist es keinem Folgeexperiment gelungen, die FIRAS-Spektren zu verbessern. Eigentlich

sollte das CMB-Spektrum weitere fundamentale Informationen beinhalten, aber trotz technischer Fortschritte sind sie immer noch außer Reichweite. So sollte Linienstrahlung des erstmalig kombinierenden Wasserstoffs charakteristische spektrale Abweichungen von dem Planck-Spektrum verursacht haben.

Andererseits gab es große Anstrengungen, die DMR-Messungen der Struktur des Mikrowellenhintergrunds zu verbessern, und technische Fortschritte haben zu weiteren spektakulären Ergebnissen geführt, insbesondere durch den 2001 gestarteten WMAP-Satelliten der NASA.³⁾ Offenbar hat die Struktur des frühen Universums genau die statistischen Eigenschaften, die man erwartet, wenn alle Strukturen von Quantenfluktuationen des Vakuums während einer inflationär beschleunigten, sehr frühen Ausdehnungsphase stammen. Darüber hinaus bestätigen die neuen Daten, dass der heutige Zustand des Universums von der bislang noch nicht näher bestimmten dunklen Materie und von einer dunklen Energie dominiert wird.

Kosmologie im Kollektiv

Der wissenschaftliche Fortschritt, der dieses Jahr vom Nobelpreiskomitee gewürdigt wurde, erforderte die kollektive Anstrengung einer großen Anzahl extrem talentierter und hingebungsvoller Menschen. Die Design- und Konstruktionsarbeiten am COBE-Experiment hatten mehr als 15 Jahre gedauert. Forschergruppen unter der Leitung von John Mather und



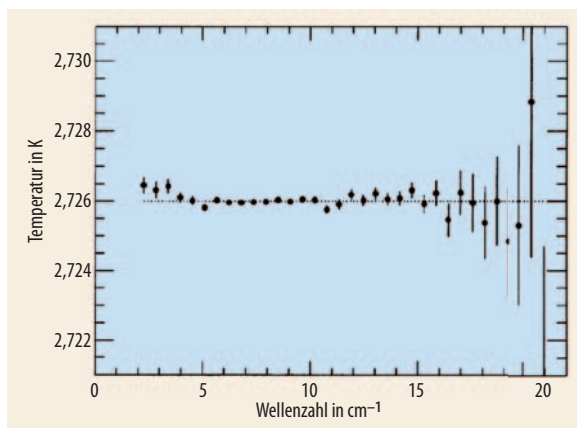
John Mather ist derzeit „Senior Scientist“ beim James Webb Space Telescope, dem geplanten Infrarot-Nachfolger des Hubble-Weltraumteleskops.

George Smoot arbeiteten in enger Kollaboration intensiv daran, die FIRAS- und DMR-Daten zu interpretieren. Zusätzlich war John Mather als leitender Wissenschaftler für die Koordination des gesamten COBE-Projekts verantwortlich.

Hinter den beiden Nobelpreisträgern stand ein großes Team: 20 Mitglieder des „Science Team“, 25 leitende Ingenieure und Manager und rund 1200 Wissenschaftler und Techniker. Dass es in einer solch großen Organisation nicht immer harmonisch zugeht, ist kaum anders zu erwarten. Der enorme Druck, die Anspannung über das Gelingen der Messungen noch vor Konkurrenzexperimenten und die häufigen Frustrationen über bürokratische Widrigkeiten, die ein Weltraumprojekt unweigerlich mit sich bringt, können nur noch übertroffen werden von der Befürchtung, um die verdiente Anerkennung und den Ruhm für die geleistete Arbeit gebracht zu werden. Genau dies schien aber einzutreten.

Im Januar 1990 stellte John Mather das von dem FIRAS-Instrument gemessene Schwarzkörper-Spektrum des CMB auf einer Konferenz

Die FIRAS-Messungen [2] zeigen, dass die Hintergrundstrahlung bei verschiedenen Wellenlängen sehr präzise einem Planck-Spektrum bei einer Temperatur von 2,726 K entspricht.²⁾



2) Die meisten Fehlerbalken würden bei der üblichen Darstellungsweise des Spektrums unter der theoretischen Kurve verschwinden.

3) <http://map.gsfc.nasa.gov>



COBE/NASA

Der COBE-Satellit befindet sich in einem erdnahen Orbit. Die Instrumente von Mather und Smoot, FIRAS und DRM, sind innerhalb eines Hitzeschildes angebracht.

vor. Die Kosmologen nahmen die präzise Bestätigung des Urknallmodells enthusiastisch auf. Dies war ein großer Erfolg der sog. *Big Bang*-Kosmologie über die seinerzeit noch nicht ausgeschlossenen *Steady State*-Modelle⁴⁾ des Universums. Allerdings waren die charakteristischen und winzigen Temperaturfluktuationen, die Smoots DMR-Experiment vermessen sollte und die das Ausbilden der ersten kosmischen Strukturen und Proto-Galaxien anzeigen sollten, noch nicht detektiert. Während Smoot speulierte, ob das kosmologische Standardbild richtig sei, witzelte Mather: „Wir haben unsere eigene Existenz noch nicht ganz ausgeschlossen.“

Ein „Blick auf Gott“?

Im April 1992 sollte dieser weitere Fingerabdruck des Urknalls erstmalig auf einem Treffen der American Physical Society präsentiert werden [3]. Doch drei Tage vor der angekündigten Pressekonferenz gab das Lawrence Berkeley Laboratory, das Institut von Smoot, eine Presseerklärung zu der Entdeckung der kosmischen Temperaturanisotropien heraus, in der Georg Smoots Rolle als Leiter des DMR-Experimentes herausgestrichen wurde und weder das Science Team noch die NASA Erwähnung fanden. Die Pressemaschinerie sprang sofort an, und Smoot avancierte dank seiner

Geschicktheit im Umgang mit den Medien schnell zum Star. Vor der Weltpresse beschrieb Smoot die COBE-Daten mit den Worten: „Wir haben die ältesten und größten Strukturen, die jemals im frühen Universum gesehen wurden, beobachtet. Dies ist die Ur-Saat der heutigen Strukturen wie Galaxien, Galaxienhaufen und so weiter“. Zur fundamentalen Natur der Temperaturfluktuationen sagte er: „Wenn Sie religiös sind, dann ist es wie ein Blick auf Gott“. Diese Aussage elektrisierte die Medien, rund um den Globus stilisierten sie Smoot zum Galfinder. New York Times und Washington Post stellten ihn fälschlicherweise als Kopf der COBE-Mission dar, und das People Magazin reihte ihn unter die 25 interessantesten Persönlichkeiten des Jahres ein. Innerhalb von einem Jahr brachte er ein Buch über die COBE-Mission heraus [4].

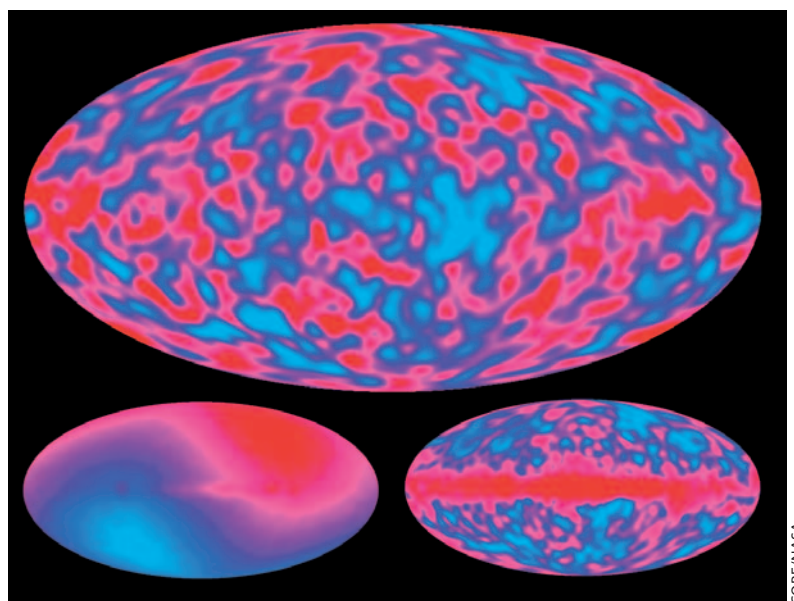
Die Fokussierung des Medieninteresses auf Smoot hinterließ in dem „COBE Science Team“ und bei der NASA mehr als einen schalen Nachgeschmack. Auch ein Brief von Smoot, in dem er das Verletzen der Regeln für Publikationen einräumte, konnte die Verbitterung nicht beseitigen. Dennoch gestand selbst Mather in seinem Buch über die COBE-Mission, in dem positive

Erwähnungen Smoots mehr als rar sind, ein, dass Smoot COBE weltweite Publizität gebracht hat, die sie ansonsten vielleicht nicht erreicht hätten [5].

Bahnbrechende Antworten ...

Im Hinblick auf die Temperaturanisotropien des CMB hatten Rainer Sachs und Arthur Wolfe argumentiert, dass die Gravitationspotentiale der sich bildenden Strukturen im Universum zu solchen Anisotropien führen müssen, da die CMB-Photonen bei der Rekombination aus diesen Potentialen „herausklettern“ mussten. Zudem sollten sie sich auf dem Weg zu uns durch zeitveränderliche Potentiale bewegt haben. Die durch COBE gefundene nahezu perfekte Isotropie der Strahlung zusammen mit der Entdeckung der winzigen Temperaturfluktuationen von wenigen zehn Mikrokkelvin gemäß des Sachs-Wolfe-Effektes waren eine fantastische Bestätigung des Urknallszenarios.

Weiterhin hatte Andrei Sakharov die Existenz von CMB-Fluktuationen aufgrund von akustischen Oszillationen des primordialen Photon-Plasma-Fluids vorhergesagt, welche zu einem charakteristischen Maximum des CMB-Leistungsspektrums auf kleinen



COBE/NASA

Die mit DMR gemessene Temperaturanisotropie (Winkelauflösung: 7°) ist zunächst durch den Doppler-Dipol aufgrund der Erdbewegung im CMB-Bezugssystem dominiert (unten links).

Nach Abzug des Dipols dominiert die Emission aus der Milchstraße (unten rechts). Nach Subtraktion dieses Anteils sind die CMB-Fluktuation aufgrund des Sachs-Wolfe-Effekts sichtbar (oben).

4) In diesen Modellen expandiert das Universum zwar auch, aber es entsteht kontinuierlich immer neue Materie.

Winkelskalen von ca. 1° führen sollte. Unter dieser Winkelskala sehen wir heute den Schallhorizont zur Epoche der Auskoppelung des CMBs. Zur Berechnung des Leistungsspektrums entwickelt man die Temperatur T des CMB nach Kugelfunktionen und drückt die Temperaturschwankungen $(\Delta T)^2$ als Funktion des Multipolindex l aus. Die Winkelskala ist dann näherungsweise durch $200^\circ/l$ gegeben. Während DMR/COBE nur eine Winkelauflösung von 7° erreicht hat (entspricht $l = 30$), ist es später mithilfe von Ballonexperimenten und bodengestützten Teleskopen gelungen, den genannten ersten akustischen Peak bei 1° und damit die Existenz der akustischen Schwingungen in der primordialen Photonen-Plasma-Flüssigkeit nachzuweisen.

WMAP, die zweite CMB-Satellitenmission, hat dann Intensität und Polarisation des CMB-Leistungsspektrums mit einer Winkelauflösung von $0,2^\circ$ ($l = 1000$) vermessen und sowohl das erste als auch das zweite akustisch-harmonische Maximum präzise bestätigt. Weitere Experimente weisen auf höhere harmonische Maxima hin [6].

Durch die gewonnenen Erkenntnisse ist es gelungen, eine Vielzahl von Fragen zu beantworten: Ist Dunkle Materie im Universum? Ja, auch die WMAP-Daten lassen sich ansonsten nicht verstehen. Gibt es Dunkle Energie? Ja, WMAP plus Supernovadaten erzwingen eine Konstituente des Universums, welche sich nicht wie Strahlung oder kalte Materie verhält. Ist das Universum flach? Gibt es Hinweise auf eine frühe Epoche inflationärer Expansion? Und wann wurde der neutrale Wasserstoff, der sich bei der Abkoppelung des CMB gebildet hatte, wieder ionisiert?

... und neue Fragen

Die nächsten größeren Fortschritte werden von der dritten CMB-Weltraummission, dem Planck Surveyor der ESA, erwartet, dessen Start für 2008 geplant ist. Präzisionsmessungen der Temperatur- und Polarisationsfluktuationen des CMB sollen eine Reihe von weitergehenden Fragen beantworten: Was

sind die präzisen Werte der kosmologischen Parameter? Stimmt das Bild des inflationären Universums? [7] Welche Eigenschaften hat das Inflaton, das hypothetische Quantenfeld, welches die Inflation antrieb? Gibt es Anzeichen für String- oder Brane-Kosmologien? Verließ die Bildung von Galaxienhaufen in frühen kosmischen Epochen wie von den kosmischen Parametern erwartet? Welche Zustandsgleichung hat die Dunkle Energie? Sind primordiale Gravitationswellen nachweisbar? Als der führende deutsche Partner innerhalb des Planck-Projekts wird sich das Max-Planck-Institut für Astrophysik intensiv an der Interpretation dieser neuen Daten beteiligen.

John Mather und George Smoot haben mit ihrem großen persönlichen Einsatz für ihre bahnbrechenden Experimente FIRAS und DMR an Bord des COBE-Satelliten die Tür für die heutige Präzisionskosmologie geöffnet. Eine Leistung, die das Nobelpreis-Komitee zu Recht würdigte.

- [1] G. Börner, Physik Journal, Februar 2005, S. 21
- [2] J. C. Mather et al., Astrophys. J. **420**, 439 (1994)
- [3] G. Smoot et al., Astrophys. J. **396**, L1 (1992)
- [4] G. Smoot und K. Davidson, Wrinkles in Time, William Morrow & Company, New York (1993)
- [5] J. C. Mather und J. Boslough, The Very First Light, Basic Books, New York (1996)
- [6] G. Hinshaw et al., arXiv:astro-ph/0603451 (2006)
- [7] M. Bartelmann, Physik. Blätter, September 2001, S. 41

DER AUTOR

Torsten A. Enßlin studierte Physik in Karlsruhe, Düsseldorf und Bonn, wo er 1999 promovierte. Anschließend forschte er an der Universität von Toronto sowie dem Max-Planck-Institut für Astrophysik (Garching). Derzeit ist Enßlin Leiter der deutschen Beteiligung an der Planck Surveyor Mission. Er beschäftigt sich mit Astroteilchenphysik und Kosmologie.

