

# Veränderliche Naturkonstanten

Ein Dogma der Physik scheint ins Wanken zu geraten: Ist das, was die Welt in ihrem Innersten zusammenhält, gar nicht konstant, sondern eine Funktion der Zeit?



Unvorstellbar fremd wäre die Welt, falls die so genannte Feinstrukturkonstante Alpha ( $\alpha$ ), die etwa  $1/137$  beträgt, einen anderen Wert besäße. Teilchen und Strahlung würden dann auf bizarre Weise interagieren; tatsächlich könnte sogar der eindeutige Unterschied zwischen Materie und Energie verloren gehen.

**M**anche Dinge ändern sich nie. Physiker nennen sie Naturkonstanten. Größen wie die Lichtgeschwindigkeit  $c$ , Newtons Gravitationskonstante  $G$  und die Ruhemasse des Elektrons  $m_e$  haben, so die allgemeine Überzeugung, überall im Universum und zu allen Zeiten denselben Wert. Sie bilden das Gerüst, mit dessen Hilfe die physikalischen Theorien errichtet wurden, und sie bestimmen die grundlegende Struktur unseres Universums. In dem Maße, in dem ihre Werte experimentell immer präziser gemessen wurden, hat sich das gesamte Gebäude der Physik weiterentwickelt.

Und doch: Erstaunlicherweise konnte bislang niemand auch nur eine dieser Konstanten berechnen oder theoretisch begründen. Warum sie ihre speziellen Zahlenwerte besitzen, ist schlicht unbekannt. In ihren jeweiligen SI-Einheiten, dem internationalen Einheitensystem, ist  $c = 299\,792\,458$ ,  $G = 6,6742 \cdot 10^{-11}$  und  $m_e = 9,1093826 \cdot 10^{-31}$  (Tabelle rechts). Diese Zahlen folgen keinem erkennbaren Muster. Das einzig Gemeinsame ist: Würden einige von ihnen auch nur geringfügig von ihrem tatsächlichen Wert abweichen, gäbe es keine komplexen atomaren Gebilde – und damit auch keine Lebewesen. Der Wunsch, die Konstanten aus etwas Tiefgründigerem abzuleiten, war eine der treibenden Kräfte hinter den Bemühungen, eine umfassende, einheitliche Beschreibung der Natur zu entwickeln, eine »Theorie von Allem«. Die Physiker hofften damit zeigen zu können, dass jede Naturkonstante nur einen logisch möglichen Wert besitzt.

Das würde eine tiefer liegende Ordnung in der scheinbaren Willkür der Natur enthüllen. Doch in den letzten Jahren

ist die Frage nach dem Status der Konstanten keineswegs einfacher geworden. Forscher fanden heraus, dass der beste Kandidat einer umfassenden Theorie – eine Variante der Stringtheorie namens M-Theorie – nur dann in sich konsistent ist, wenn das Universum nicht nur vier Raum-Zeit-Dimensionen besitzt, sondern bis zu sieben weitere Dimensionen. Eine Folgerung davon ist, dass die beobachteten Konstanten womöglich nicht wirklich fundamental sind. Diese gäbe es wohl nur in dem höherdimensionalen Raum, und wir würden dann nur ihre dreidimensionalen »Schatten« sehen.

### Fundamente unserer Welt

Inzwischen akzeptieren die Physiker auch, dass die Werte vieler Konstanten möglicherweise durch zufällige Ereignisse und Elementarteilchenprozesse in der Frühzeit des Universums zu Stande kamen. Die Stringtheorie erlaubt nämlich eine riesige Anzahl möglicher Welten –  $10^{500}$  – mit unterschiedlichen, in sich konsistenten Naturgesetzen und -konstanten. Warum ausgerechnet unsere Kombination realisiert wurde, lässt sich bislang nicht erklären. Vielleicht ergeben künftige Forschungen, dass es nur eine logisch mögliche Welt geben kann. Doch vorläufig müssen wir weiterhin die enervierende Möglichkeit in Betracht ziehen, dass unser bekanntes Universum nur eines von vielen ist – ein Teil eines Multiversums. Unterschiedliche Bereiche dieses Multiversums sind unterschiedlichen Lösungen der Theorie unterworfen. Die von uns beobachteten Naturgesetze stellen dann nur eine spezielle Version aus einer immensen Vielfalt möglicher Varianten mit jeweils lokalem Geltungsbereich dar (siehe »Paralleluniversen« von Max Tegmark, Spektrum der Wissenschaft 8/2003, S. 34).

## Wichtige Naturkonstanten

### Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$$c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

### Elementarladung

$$e = 1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

### Planck'sches Wirkungsquantum

$$h = 6,6260693 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

### Ruhemasse des Elektrons

$$m_e = 9,1093826 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

### Ruhemasse des Protons

$$m_p = 1,67262171 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

### Permeabilität des Vakuums

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$$

### Dielektrizitätskonstante des Vakuums

$$\epsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$$

### Gravitationskonstante

$$G = 6,6742 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

### Avogadro-Konstante

$$N_A = 6,0221415 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

### Boltzmann-Konstante

$$k_B = 1,3806505 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

### Feinstrukturkonstante

$$\alpha = e^2/2\epsilon_0 hc = 1/137,03599911$$

Für die Zahlenwerte vieler unserer Konstanten gäbe es dann keine weitergehende Erklärung als die, dass sie just eine der wenigen Kombinationen darstellen, mit denen die Entwicklung eines Bewusstseins möglich ist. Unser beobachtbares Universum könnte also eine von vielen isolierten Oasen sein, die in der Unendlichkeit eines leblosen Raums eingebettet sind, in dem völlig andere Naturgesetze herrschen. Teilchen wie Elektronen und Gebilde wie Kohlenstoffatome oder gar das Erbmolekül DNA wären darin unmöglich. Wenn Sie versuchen würden, sich in diese surreale Außenwelt vorzuwagen, würden Sie aufhören zu existieren.

So gibt die Stringtheorie mit der einen Hand und nimmt mit der anderen. Ihre Begründer hofften unter anderem, mit ihr die scheinbar willkürlichen Werte der physikalischen Konstanten erklären zu können. Zwar enthalten ihre Grundgleichungen nur wenige freie Parameter; doch bis jetzt bietet die Stringtheorie keine Erklärung für die beobachteten Werte der Konstanten.

In der Tat könnte die Bezeichnung Konstante unzutreffend sein. Die scheinbar unveränderlichen Zahlenwerte könnten sowohl im Raum als auch in der Zeit

## IN KÜRZE

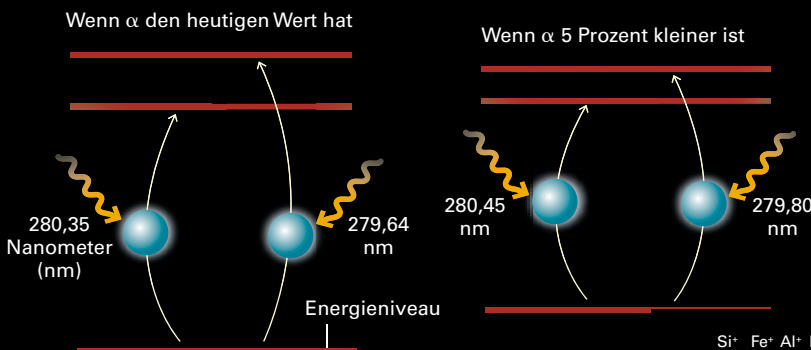
- ▶ Fast alle physikalischen Gleichungen enthalten Größen, die wie die Lichtgeschwindigkeit als **Naturkonstanten** gelten. Sie sollen immer und überall denselben Wert aufweisen.
- ▶ Diese Annahme stellen die Autoren seit sechs Jahren in Frage. In Spektren von fernen Quasaren fanden sie Hinweise, nach denen die chemischen Elemente in ferner Vergangenheit Licht anders absorbierten als heute. Den Unterschied erklären sie mit einer winzigen **Änderung der Feinstrukturkonstanten Alpha ( $\alpha$ )**.
- ▶ Diese Variation, falls sie bestätigt wird, wäre revolutionär, denn **dann würden die Naturgesetze ihre universelle Gültigkeit verlieren**. Sie wäre auch ein Hinweis auf zusätzliche Dimensionen des Raums.

# Licht und die Feinstrukturkonstante

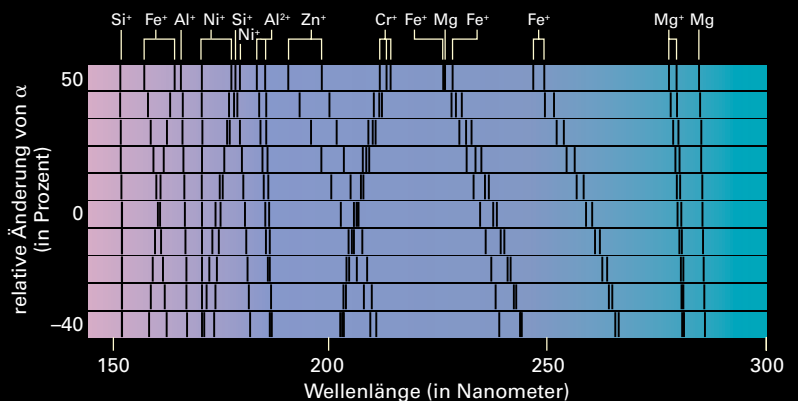
**Die Feinstrukturkonstante Alpha** ( $\alpha$ ) setzt sich aus mehreren Naturkonstanten zusammen, deren Werte experimentell sehr genau bestimmt werden können. Sie ist eine reine Zahl, die angibt, wie stark Teilchen über elektromagnetische Kräfte interagieren. Eine solche Wechselwirkung ist zum Beispiel die Absorption eines Photons durch ein Atom. Wenn man es mit Licht bestrahlt, absorbiert ein Atom Photonen bestimmter Wellenlänge, was sich im Farbspektrum als Absorptionslinie bemerkbar macht.



**Energieniveaus** der Elektronen in einem Atom bestimmen den Absorptionsprozess. Die Energie eines Photons wird auf ein Elektron übertragen, das daraufhin auf ein höheres erlaubtes Energieniveau springt. Jedem möglichen Sprung entspricht eine bestimmte Wellenlänge. Die Niveaubstände hängen von der Stärke der Anziehungskraft des Atomkerns auf das Elektron ab und damit von der Feinstrukturkonstanten. Falls  $\alpha$  kleiner wäre, lägen zum Beispiel die Niveaus eines Magnesiumions ( $Mg^+$ ) näher beieinander. Photonen könnten dann mit geringerer Energie – mit größerer Wellenlänge – Elektronen auf höhere Niveaus heben.



**Simulierte Spektren** zeigen, wie Änderungen von  $\alpha$  die Absorption von Licht im nahen Ultraviolettbereich in verschiedenen Atomarten beeinflussen. Die vertikalen schwarzen Linien stellen die absorbierten Wellenlängen dar. Jede Atom- oder Ionenart weist ein eindeutiges Absorptionslinienmuster auf. Änderungen der Feinstrukturkonstanten beeinflussen Magnesium und Silizium weniger als Eisen, Zink oder Chrom.



ALISON KENDALL NACH: JOHN K. WEBB

▷ variieren. Falls sich die Größe der zusätzlichen Raumdimensionen ändern sollte, würden sich die »Konstanten« unserer dreidimensionalen Welt mit ihnen verändern. Und wenn wir nur genügend weit in den Weltraum blicken, könnten Regionen auftauchen, in denen die »Konstanten« andere Werte eingenommen haben. Schon in den 1930er Jahren spekulierten manche Wissenschaftler darüber, ob die Konstanten wirklich unveränderlich sind. Die Stringtheorie verleiht dieser Idee eine theoretische Stütze. Beobachter suchen deshalb nach Abweichungen der bisher als allgemeingültig angenommenen Werte.

Allerdings stellen solche Experimente eine Herausforderung dar. Das erste Problem hängt damit zusammen, dass die Messgeräte selbst von Änderungen der

Konstanten beeinflusst sein könnten. Sollten sich etwa alle Atome im Lauf der Zeit ausdehnen und der Maßstab, mit dem sie gemessen werden, ebenfalls, wäre die Änderung nicht festzustellen.

### Die Feinstrukturkonstante Alpha

Metrologen setzen zwar immer voraus, dass ihre Messstandards – Maßstäbe, Massen, Uhren – unveränderlich sind. Aber diese Annahme ist unzulässig, wenn Naturkonstanten überprüft werden sollen. Die Forscher müssen sich deshalb auf Konstanten konzentrieren, die dimensionslos, also reine Zahlen sind. Nur dann sind ihre Werte unabhängig vom Einheitensystem. Ein einfaches Beispiel ist das Verhältnis zweier Massen, wie etwa die Ruhemasse des Protons zur Ruhemasse des Elektrons. Ein besonders in-

teressantes Verhältnis kombiniert die Lichtgeschwindigkeit  $c$ , die Elementarladung  $e$ , das Planck'sche Wirkungsquantum  $h$  und die Dielektrizitätskonstante des Vakuums  $\epsilon_0$ . Diese berühmte Größe,  $\alpha = e^2/2\epsilon_0hc$ , heißt Feinstrukturkonstante. Arnold Sommerfeld, der als einer der Ersten quantenmechanische Prinzipien auf den Elektromagnetismus anwandte, hat sie 1916 eingeführt. Die Feinstrukturkonstante drückt die relativistischen ( $c$ ) und quantenmechanischen Eigenschaften ( $h$ ) der elektromagnetischen Wechselwirkung ( $e$ ) zwischen geladenen Teilchen im leeren Raum ( $\epsilon_0$ ) aus. Ihr Wert beträgt  $1/137,03599911$  oder ungefähr  $1/137$ . Unter Physikern hat die Zahl 137 einen geradezu legendären Ruf.

Wenn die Feinstrukturkonstante – die ein Maß für die Stärke der elektro-



# Suche nach Änderungen im Licht von Quasaren

**Eine ferne Gaswolke**, die von einem noch fernerer Quasar beleuchtet wird, erlaubt es Astronomen, den Vorgang der Lichtabsorption im frühen Universum zu untersuchen und damit den damaligen Wert der Feinstrukturkonstanten zu bestimmen.

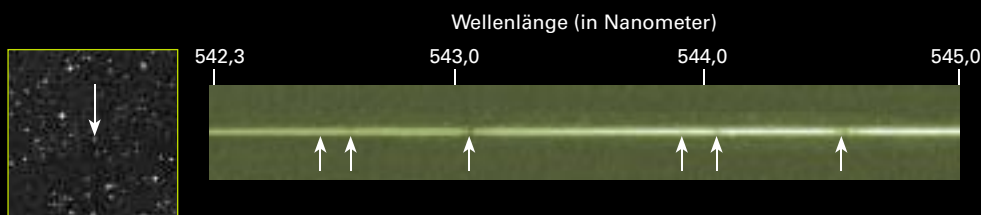
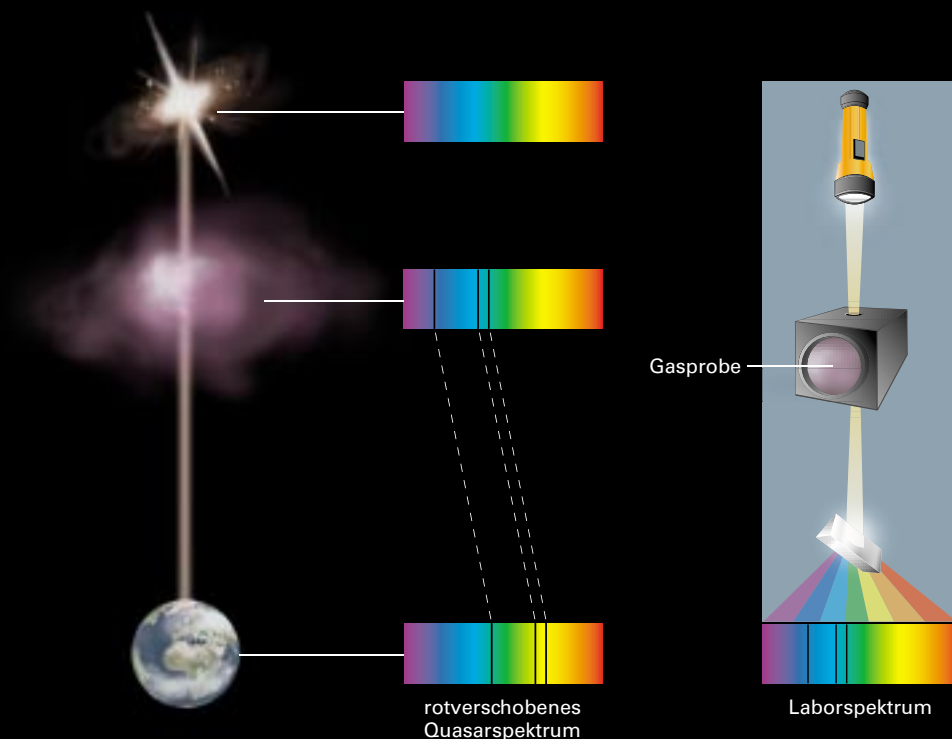
**1** Vor Jahrmilliarden machte sich das im Spektrum kontinuierlich verteilte Licht eines Quasars auf die Reise zur Erde.

**2** Sein Weg führt durch eine oder mehrere Gaswolken. Das Gas blockiert bestimmte Wellenlängen und im Spektrum entstehen Serien dunkler Absorptionslinien. Für die Untersuchung der Feinstrukturkonstanten konzentrieren sich die Astronomen auf die Absorption durch Metalle.

**3** Durch die kosmische Expansion sind die Wellenlängen der Linien beim Eintreffen auf der Erde verschoben. Die Größe der Verschiebung ist ein Maß für die Entfernung der Wolke und somit für deren Alter.

**4** Die Abstände der Spektrallinien können mit Labormessungen verglichen werden. Eine Abweichung ist ein Hinweis darauf, dass die Feinstrukturkonstante einst einen anderen Wert hatte.

**Absorptionslinien in einem Quasarspektrum**, aufgenommen mit dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte Eso. Die Linien entstehen durch Gaswolken, die sich zwischen dem Quasar (Pfeil) und uns befinden. Ihre Positionen (ganz rechts) zeigen, dass das Licht vor 7,5 Milliarden Jahren durch die Wolken lief.



ALISON KENDALL

magnetischen Wechselwirkung, also für die Kopplung geladener Teilchen mit Photonen ist – einen anderen Wert hätte, würden sich alle entscheidenden Merkmale unserer Welt ändern. Wäre er niedriger, nähme die Dichte fester atomarer Materie ab (proportional zu  $\alpha^3$ ), Molekülbindungen würden bei tieferen Temperaturen aufbrechen ( $\alpha^2$ ), und die Anzahl stabiler Elemente im Periodensystem könnte zunehmen ( $1/\alpha$ ). Falls  $\alpha$  zu groß wäre, könnten kleine Atomkerne nicht existieren, weil die Abstoßung zwischen ihren positiv geladenen Protonen stärker wäre als die starke Kernkraft, die sie zusammenhält. Mit einem Wert von 0,1 würden selbst Kohlenstoffkerne zerplatzen. Kernprozesse in Sternen hängen besonders empfindlich von  $\alpha$  ab. Damit Atomkerne verschmelzen kön-

nen, müssen sie sich so schnell bewegen, dass sie eine Chance haben, ihre gegenseitige Abstoßung zu überwinden.

Das geht nur, wenn der Gravitationsdruck des Sterns für ausreichend hohe Temperaturen in seinem Innern sorgt. Für  $\alpha$  größer als 0,1 wäre die Kernfusion unmöglich (sofern andere Parameter wie das Massenverhältnis von Elektron zu Proton nicht angepasst würden, um den Effekt zu kompensieren). Eine Änderung von  $\alpha$  um nur vier Prozent würde die Energieniveaus der Kohlenstoffkerne derart verschieben, dass die Synthese dieses Elements in Sternen zum Erliegen käme.

## Zu kurze Messzeit im Labor

Das zweite Problem ist noch schwieriger zu lösen. Um Variationen der Konstanten zu messen, sind hochpräzise Geräte

notwendig, die lange genug stabil bleiben müssen, damit sie die Änderungen überhaupt erfassen. Selbst Atomuhren, die in 50 Millionen Jahren nur um eine Sekunde abweichen, können eine Drift der Feinstrukturkonstanten nur entdecken, wenn die Messzeit viele Tage oder Jahre beträgt. Falls sich  $\alpha$  innerhalb von drei Jahren um mehr als vier Teile von  $10^{15}$  änderte, würden die besten vorhandenen Atomuhren dies erkennen. Aber bislang wurde nichts Derartiges gefunden.

Das klingt wie ein überzeugender Beweis für die Unveränderlichkeit. Doch drei Jahre sind für den Kosmos nur ein winziger Augenblick. Langsame, aber signifikante Veränderungen in der langen Geschichte des Universums blieben mit der heutigen Messgenauigkeit un-

▷ Glücklicherweise haben Physiker andere Tests erdacht. In den 1970er Jahren fanden Wissenschaftler der französischen Atomenergiebehörde im Erz einer Uranmine in Oklo (Gabun, Westafrika) eine merkwürdige Isotopenverteilung: Sie ähnelte derjenigen von abgebrannten Brennstäben heutiger Kernreaktoren. Vor zwei Milliarden Jahren muss in der Oklo-Erzlagerstätte auf natürliche Weise

Himmel richten. Das Licht ferner astronomischer Quellen ist teilweise Milliarden von Jahren unterwegs, bevor es unsere Teleskope erreicht. Mit sich führt es eine Momentaufnahme der physikalischen Gesetze und Konstanten aus der Zeit, als es seine Reise begann oder unterwegs auf Materie traf.

Erstmals kam die Astronomie 1965 mit der Frage der Naturkonstanten in

von den heute im Labor gemessenen Werten. Die in den Spektren beobachteten Wellenlängen der Übergänge würden somit differieren. Die Art und Weise der Wellenlängenänderungen hängen empfindlich von den Orbitalkonfigurationen der Elektronen ab. Für eine bestimmte Änderung von  $\alpha$  verkürzen sich einige Wellenlängen, während andere anwachsen. Das resultierende Muster im Spektrum ist so komplex, dass es schwerlich durch einen Kalibrierungsfehler vorgetäuscht werden könnte. Dadurch ist der Test erstaunlich leistungsfähig.

Bevor unser Team vor sieben Jahren seine Arbeit aufnahm, litten die Messungen unter zwei Einschränkungen. Zum einen waren die Laborwellenlängen vieler relevanter Spektrallinien nicht genau genug bekannt. Ironischerweise wussten die Wissenschaftler mehr über die Spektren von Milliarden Lichtjahren entfernten Quasaren als über die Referenzspektren von Proben hier auf der Erde. Was wir brauchten, waren sehr präzise Labormessungen, die wir mit unseren Quasarspektren vergleichen konnten. Auf unsere Anregung hin führten Anne Thorne und Juliet Pickering vom Imperial College in London erste Messungen durch. Weitere Daten lieferten Gruppen um Svereric Johansson von der Sternwarte Lund (Schweden) und um Ulf Griesmann und Rainer Kling vom National Institute of Standards and Technology in Gaithersburg (Maryland).



### Ironischerweise wussten Wissenschaftler mehr über Spektren von Milliarden Lichtjahren entfernten Quasaren als über die von irdischen Proben

eine nukleare Kettenreaktion stattgefunden haben. 1976 erkannte Alexander Schljachter vom Institut für Kernphysik im russischen Sankt Petersburg, dass der Wirkungsgrad eines solchen natürlichen Reaktors entscheidend von der Energie eines bestimmten Zustands des Samariumkerns abhängt, der den Einfang von Neutronen erleichtert. Und diese Energie wiederum hängt empfindlich von  $\alpha$  ab. Wenn die Feinstrukturkonstante einen geringfügig anderen Wert gehabt hätte, wäre keine Kettenreaktion zu Stande gekommen. Da sie aber stattfand, bedeutet dies, dass sich  $\alpha$  in den letzten zwei Milliarden Jahren maximal um ein Teil in  $10^8$  geändert hat.

1962 bereits hatten P. James E. Peebles und Robert Dicke von der Universität Princeton als Erste ein ähnliches Verfahren auf Meteoriten angewandt: In diesen urzeitlichen Brocken hängen die Häufigkeitsverhältnisse verschiedener Isotope, die im Zuge der radioaktiven Zerfallsketten entstehen, von  $\alpha$  ab. Die empfindlichste Einschränkung liefert der Betazerfall von Rhenium zu Osmium. Nach neuesten Untersuchungen eines Teams um Keith Olive von der Universität von Minnesota in Minneapolis und Maxim Pospelov von der Universität Victoria (Kanada) kann  $\alpha$  zur Zeit der Entstehung der Meteoriten höchstens um zwei Teile von  $10^6$  vom heutigen Wert abgewichen sein. Diese Ergebnisse sind zwar weniger genau als die Oklo-Daten, reichen dafür aber weiter in die Vergangenheit zurück, bis zur Entstehung des Sonnensystems vor 4,6 Milliarden Jahren.

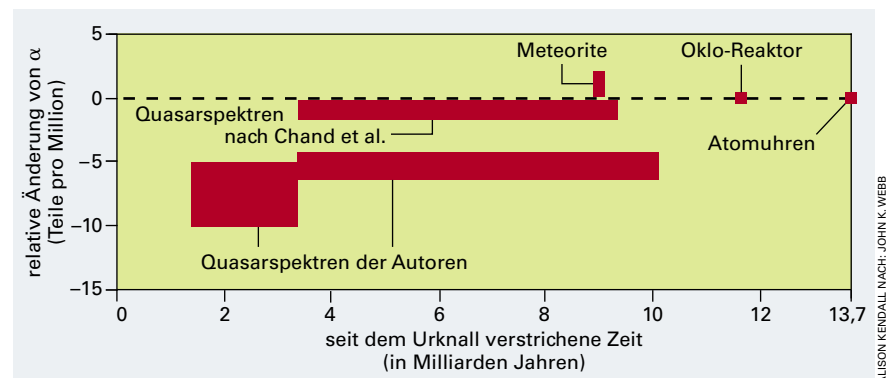
Um mögliche Änderungen über noch längere Zeiträume festzustellen, müssen die Forscher den Blick in den

Berührung, kurz nachdem die Quasare entdeckt worden waren. Die Überlegung war einfach. Die neuartigen Himmelskörper waren als sehr ferne, gleißend helle Lichtquellen identifiziert worden. Wegen des langen Wegs vom Quasar bis zu uns muss das Licht unweigerlich die gasförmigen Außenbereiche junger Galaxien durchqueren. Dieses Gas absorbiert das Licht des Quasars bei bestimmten Frequenzen und drückt seinem Spektrum einen Strichcode aus schmalen Absorptionslinien auf (siehe Kasten auf S. 81).

### Verräterische Spektrallinien

Wann immer Gas Licht absorbiert, springt im Atom ein Elektron von einem niedrigeren in einen höheren Energiezustand. Die Lage dieser Energieniveaus wird davon bestimmt, wie stark der Atomkern die Elektronen anzieht. Dies hängt wiederum von der Stärke der elektromagnetischen Kraft zwischen ihnen ab – und somit von der Feinstrukturkonstanten. Falls zum Zeitpunkt der Absorption des Lichts oder in dem betreffenden Raumbereich  $\alpha$  einen anderen Wert hatte, unterscheidet sich die Energie, die benötigt wird, um das Elektron anzuheben,

▼ Messungen der Feinstrukturkonstanten sind nicht eindeutig. Einige weisen darauf hin, dass sich die Konstante im Lauf der Zeit ändert, andere nicht. Möglicherweise fanden die Änderungen nur während früherer Epochen des Kosmos statt, aber nicht mehr heute.



Das zweite Problem hing damit zusammen, dass frühere Beobachter so genannte Alkali-Doublett-Absorptionslinien untersuchten. Das sind paarweise auftretende Absorptionslinien eines Gases, wie bei Kohlenstoff oder Silizium. Die Forscher verglichen die Abstände zwischen diesen Linien in Quasarspektren mit denen im Labor. Allerdings wird bei diesem Verfahren eine bestimmte Eigenschaft ignoriert: Eine Änderung von  $\alpha$  beeinflusst nicht nur den Abstand der Absorptionslinien relativ zum niedrigsten Energieniveau, dem Grundzustand, sondern auch die absolute Position des Grundzustands. Deshalb lag die Genauigkeit der bisherigen Beobachtungen höchstens bei einem Teil in  $10^4$ .

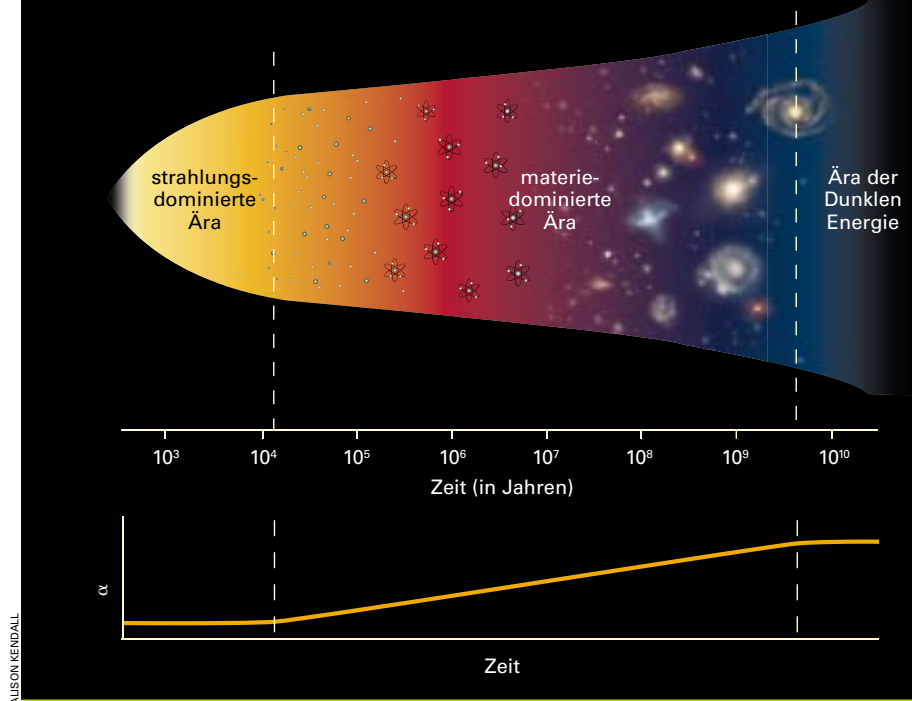
1999 ersannen einer von uns (Webb) und Victor V. Flambaum von der Universität von New South Wales in Sydney (Australien) eine Methode, mit der sich sowohl die relative als auch die absolute Verschiebung der Absorptionslinien ermitteln lässt. Das war der Durchbruch und bedeutete eine zehnfach höhere Empfindlichkeit. Zudem können wir mit diesem Verfahren unterschiedliche Atomsorten (zum Beispiel Magnesium und Eisen) vergleichen, was zusätzliche Gegenproben ermöglicht. Aber für die Umsetzung dieser Idee in die Praxis waren komplizierte numerische Berechnungen notwendig, um herauszufinden, wie in allen verschiedenen Atomarten die beobachteten Wellenlängen von  $\alpha$  abhängen. Unter der Verwendung moderner Teleskope und Detektoren erlaubte uns der neue Ansatz, die Many-Multiplet-Analyse (kurz: MM-Analyse), die Konstanz von  $\alpha$  mit noch nie da gewesener Genauigkeit zu untersuchen.

Zu Beginn unseres Projekts hatten wir noch keinen Anlass, an der Unveränderlichkeit der Feinstrukturkonstanten zu zweifeln. Wir erwarteten, in der Frühzeit unseres Universums für  $\alpha$  denselben Wert zu finden wie heute, nur würden unsere Messungen genauer sein als zuvor. Zu unserer Überraschung zeigten erste Ergebnisse im Jahr 1999 kleine, aber statistisch signifikante Unterschiede. Weitere Messungen bestätigten diesen Befund. Auf der Grundlage von 128 Quasarabsorptionslinien errechneten wir eine mittlere Zunahme von  $\alpha$  um nahezu sechs Teile pro Million während der letzten sechs bis zwölf Milliarden Jahre.

Außergewöhnliche Behauptungen erfordern außergewöhnliche Beweise. Un-

## Sie ändert sich, sie ändert sich nicht ...

**Nach der Theorie der Autoren** blieb die Feinstrukturkonstante während gewisser Epochen in der kosmischen Geschichte konstant, nahm aber in anderen zu. Die Messdaten (siehe Kasten unten links) sind mit dieser Vorhersage vereinbar.

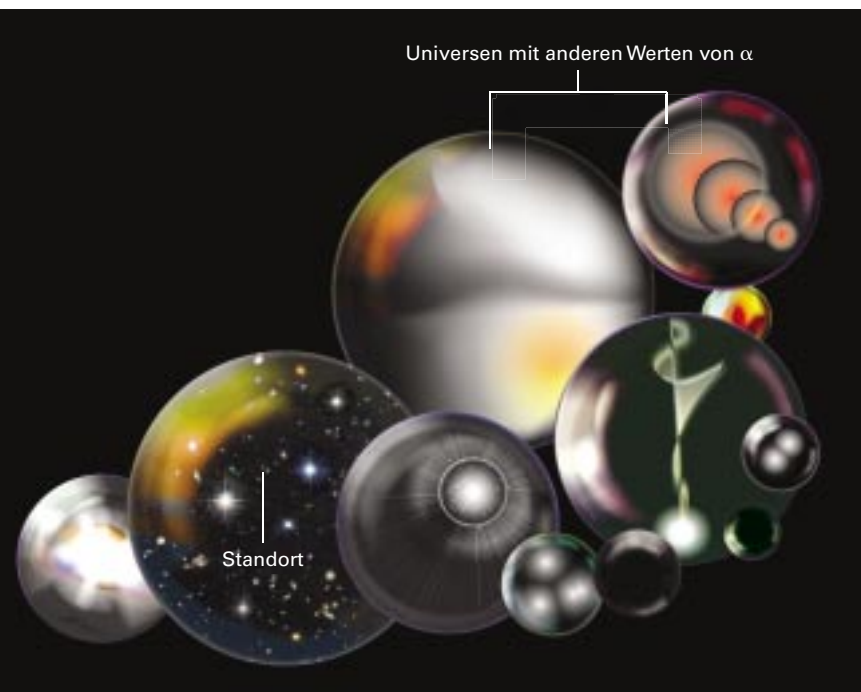


ser erster Verdacht richtete sich deshalb auf mögliche Fehler in den Daten oder in den Analysemethoden. Diese Unsicherheiten lassen sich in zwei Gruppen einordnen: systematische und zufällige. Letztere sind leichter zu verstehen; sie sind eben einfach das, was ihr Name besagt: zufällig. Jede Einzelmessung unterscheidet sich etwas von den anderen, für große Datenmengen indes heben sich diese Abweichungen im Mittel gegenseitig fast auf. Systematische Abweichungen hingegen mitteln sich nicht weg und sind deshalb schwieriger in den Griff zu bekommen. In der Astronomie lauern sie überall. Experimentatoren im Labor können ihre Apparatur modifizieren, um systematische Fehler zu erkennen und zu beseitigen, aber Astronomen können das Universum nicht ändern. Sie müssen deshalb akzeptieren, dass alle ihre Untersuchungsmethoden unter unvermeidlichen Auswahlwirkungen leiden. Beispielsweise werden in jeder Durchmusterung des Himmels helle Galaxien überrepräsentiert sein, einfach, weil diese leichter zu sehen sind als lichtschwache. Solche Auswahlwirkungen zu identifizieren und zu neutralisieren ist eine ständige Herausforderung.

Zunächst prüften wir, ob die Wellenlängenskala, mit deren Hilfe wir die Spektrallinien der Quasare vermaßen, eine Verzerrung aufwies. Eine solche könnte beispielsweise auftreten, wenn wir die Rohdaten der Quasare in kalibrierte Spektren umrechnen. Obwohl eine einfache Streckung oder Stauchung der Wellenlängenskala eigentlich keine Änderung von  $\alpha$  vortäuschen kann, könnten solche Diskrepanzen durchaus ausreichen, unsere Ergebnisse zu erklären. Zur Eingrenzung dieser Probleme ersetzten wir Quasardaten durch Kalibrierungsmessungen und analysierten sie so, als ob sie Quasardaten seien. Dadurch konnten wir einfache Verzerrungen als Fehlerquelle mit hoher Sicherheit ausschließen.

### Vortäuschen einer Änderung

Zwei Jahre lang suchten wir intensiv nach anderen Fehlern in den Daten. Wir stellten einen potenziellen Auswahlwirkung nach dem anderen auf den Prüfstand, nur um ihn nach detaillierten Analysen als unbedeutend wieder auszuschließen. Bislang vermochten wir nur eine mögliche ernsthafte Fehlerquelle zu identifizieren. Sie betrifft die Absorptionslinien des Elements Magnesium. Jedes seiner drei



▲ Unser beobachtbares Weltall ist vermutlich nur ein kleiner Teil eines Multiversums. In anderen Regionen dieser Vielwelt kann die Feinstrukturkonstante andere Werte annehmen als in unserer – mit der Folge, dass die Naturgesetze surreale Formen annehmen und sich Leben nicht entwickeln kann.

▷ stabile Isotope absorbiert Licht einer anderen Wellenlänge, aber die drei Linien liegen sehr nahe beieinander. In Quasarspektren sind sie gewöhnlich zu einer einzigen Linie verschmolzen. Legt man die im Labor gemessenen relativen Häufigkeiten der drei Isotope zu Grunde, lässt sich auf die einzelnen Beiträge der Linien schließen. Falls aber im jungen Universum andere Häufigkeiten galten, könnte dies eine Änderung von  $\alpha$  vortäuschen. Das könnte dann der Fall sein, wenn die Sterne, die damals das Magnesium in ihrer Galaxie verteilten, im Mittel massereicher waren als heute.

### Wird Alpha durch die kosmische Expansion beeinflusst?

Aber eine Studie, die in diesem Jahr veröffentlicht wurde, zeigt, dass unsere Befunde nicht so einfach wegdiskutiert werden können. Yeshe Fenner und Brad K. Gibson von der Technischen Universität Swinburne in Melbourne (Australien) sowie Michael T. Murphy von der Universität Cambridge (England) fan-

den heraus: Wäre die von uns gemessene Abweichung von  $\alpha$  auf eine andere Magnesiumhäufigkeit zurückzuführen, würde daraus auch eine Überproduktion an Stickstoff im frühen Universum resultieren. Das aber widerspricht den Beobachtungen. Deshalb müssen wir die Möglichkeit in Betracht ziehen, dass sich  $\alpha$  tatsächlich verändert hat.

Die wissenschaftliche Gemeinschaft erkannte schnell die immense mögliche Bedeutung unserer Ergebnisse. Weltweit nahmen Forschergruppen eiligst ihre eigenen Quasarspektren auf. Teams um Sergej Lewschakow vom Ioffe-Institut in St. Petersburg (Russland) und um Ralf Quast von der Universität Hamburg untersuchten 2003 drei neue Quasarsysteme. Letztes Jahr analysierten Hum Chand und Raghunathan Sriamand vom Interuniversitären Zentrum für Astronomie und Astrophysik in Puna (Indien), Patrick Petitjean vom Institut für Astrophysik und Bastien Aracil vom Forschungszentrum Lerma (beide in Paris) 23 weitere. Keine dieser Gruppen fand eine Veränderung von  $\alpha$ . Chand vermutete, dass irgendwelche Änderungen in den letzten sechs bis 10 Milliarden Jahren kleiner als 1 Teil pro  $10^6$  gewesen sein müssen.

Wie kann eine ähnlich geartete Untersuchung, nur mit anderen Daten, zu einem derart anderen Ergebnis führen? Nun, wir kennen die Antwort noch nicht. Die Daten dieser Forschungsgruppen sind von ausgezeichneter Qualität. Aber ihre Datenmenge ist kleiner und reicht

nicht so weit in der Zeit zurück wie unsere. Die Untersuchung der Chand-Gruppe hat nicht alle experimentellen und systematischen Fehlerquellen berücksichtigt. Da sie eine vereinfachte Version der MM-Analyse verwendeten, könnten sie selbst neue Fehler eingeführt haben.

Der renommierte Astrophysiker John Bahcall von der Universität Princeton kritisierte die Many-Multiplet-Analyse selbst. Aber die von ihm identifizierten Probleme sind zufälliger Natur und sollten folglich bei großen Datenmengen verschwinden. Um das zu überprüfen, untersuchten Bahcall sowie eine Gruppe um Jeffrey Newman vom Lawrence-Berkeley-Nationallaboratorium (Kalifornien) Emissionslinien anstatt Absorptionslinien. Bislang ist ihr Ansatz noch nicht genau genug, aber er könnte in der Zukunft nützliche Randbedingungen liefern.

Falls unser Befund bestätigt werden sollte, hätte dies enorme Konsequenzen, die noch gar nicht alle abzusehen sind. Bis vor Kurzem waren alle Überlegungen, wie eine veränderte Feinstrukturkonstante das Schicksal des Universums beeinflussen sollte, wenig überzeugend. Meist mündeten sie in der Annahme, man könne dieselben Gleichungen wie bisher benutzen, nur dass  $\alpha$  nun als Variable statt als Konstante zu betrachten sei. Das ist eine zweifelhafte Vorgehensweise. Wenn  $\alpha$  variiert, müssen bei allen Änderungen Energie und Impuls erhalten bleiben und sie müssen das Gravitationsfeld im Universum beeinflussen. Erstmals gelang es 1982 Jacob D. Bekenstein von der Hebräischen Universität in Jerusalem, die Gesetze des Elektromagnetismus zu verallgemeinern, sodass sie auch für wechselhafte »Konstanten« gelten. Die Theorie behandelt  $\alpha$  nicht mehr wie eine reine Zahl, sondern wie ein skalares Feld, dessen Wert von Ort und Zeit abhängig ist. Was in seiner Theorie noch fehlte, war die Gravitation. Erst vor vier Jahren gelang es einem von uns (Barrow) mit Håvard Sandvik und João Magueijo vom Imperial College in London, Bekensteins Theorie dahingehend zu erweitern.

Die neue Theorie macht ansprechend einfache Vorhersagen. Änderungen von  $\alpha$  um wenige Teile pro Million sollten keinen merklichen Effekt auf die kosmische Expansion haben. Das liegt daran, dass auf kosmischen Skalen der Elektromagnetismus viel schwächer ist als die Schwerkraft. Doch umgekehrt sollte sich die Expansion auf  $\alpha$  auswirken, und



zwar hervorgerufen durch Ungleichgewichte zwischen den Energien des elektrischen und des magnetischen Felds.

Während der ersten 300 000 Jahre in der Geschichte des Kosmos dominierte die Strahlung über die geladenen Teilchen und hielt die elektrischen und magnetischen Felder im Gleichgewicht. Als das Universum sich weiter ausdehnte, nahm die Strahlungsdichte ab und im Universum dominierte fortan die Materie. Die elektrischen und magnetischen

Mond eine Feder und einen Hammer fallen ließ und beide Gegenstände gleichzeitig im Mondstaub landeten. Aber falls sich  $\alpha$  ändert, gilt dieses Prinzip nicht mehr exakt. Die Änderungen erzeugen eine Kraft auf alle geladenen Teilchen. Je mehr Protonen in einem Atomkern sind, desto stärker spüren die Atome diese Kraft. Wenn unsere Quasarbeobachtungen richtig sind, unterscheidet sich die Beschleunigung unterschiedlicher Materialien um einen Teil in  $10^{14}$ . Das ist

senschaftliche Boden verlassen wird, zumindest was  $\alpha$  betrifft. Momentan warten wir auf neue Daten und neue Analysen, welche die Variation von  $\alpha$  entweder bestätigen oder widerlegen. Die Wissenschaftler konzentrieren sich bei diesen Untersuchungen auf die Feinstrukturkonstante, weil astronomische Beobachtungen über sie genauere Ergebnisse liefern als über andere Naturkonstanten. Falls  $\alpha$  anfällig für Änderungen ist, dann sollten sich andere Konstanten ebenfalls ändern. In diesem Fall sind die grundlegenden Mechanismen der Natur variantenreicher als Wissenschaftler je vermuteten.

Um die Naturkonstanten rankt sich ein faszinierendes Geheimnis. In jeder Gleichung der Physik tauchen sie auf. Sie sind so nüchtern, dass man dazu neigt zu vergessen, wie unerklärlich ihre Werte sind. Ihr Ursprung ist eng mit den größten Rätseln der modernen Wissenschaft verbunden, von der Vereinheitlichung der Physik bis zur Expansion des Universums. Vielleicht sind sie nur das schattenhafte Abbild einer Struktur, die größer und viel komplexer als das dreidimensionale Universum ist, das wir kennen. Zu entscheiden, ob die Konstanten tatsächlich ihren Namen zu Recht tragen, ist nur ein kleiner Schritt auf dem Weg zu einem wirklichen Verständnis der Welt. ◀



## Falls die Feinstrukturkonstante Alpha für Änderungen anfällig ist, sollten sich andere Naturkonstanten ebenfalls ändern

Energien wurden ungleich und  $\alpha$  begann, sehr langsam zuzunehmen. Die Wachstumsrate folgte dem Logarithmus der Zeit. Vor etwa sechs Milliarden Jahren übernahm die Dunkle Energie die Führungsrolle und beschleunigte die Expansion. Dadurch wurde es für alle physikalischen Einflüsse schwieriger, sich im Raum auszubreiten. Deshalb wurde  $\alpha$  wieder nahezu konstant.

### Hatte Galilei doch Unrecht?

Dieses Vorhersagemuster passt zu unseren Beobachtungen. Die Spektrallinien in den Quasarspektren repräsentieren die materiedominierte Epoche der kosmischen Geschichte, als  $\alpha$  zunahm. Die Labor- und Oklo-Befunde fallen in eine spätere Epoche, in der die Dunkle Energie dominierte und  $\alpha$  konstant blieb. Die Frage, inwieweit sich eine veränderte Feinstrukturkonstante auf die radioaktiven Elemente in Meteoriten auswirkte, ist besonders interessant, weil sich daraus Aussagen über die Übergangphase zwischen den beiden Epochen ableiten lassen.

Jede Theorie muss, um ernst genommen werden zu können, nicht nur die Beobachtungen reproduzieren, sondern auch überprüfbar Vorhersagen machen. Unserer Theorie zufolge sollten Variationen der Feinstrukturkonstanten dafür sorgen, dass Körper im Schwerfeld unterschiedlich fallen. Galileo Galilei sagte vorher, dass im Vakuum Körper immer gleich schnell fallen, unabhängig davon, woraus sie bestehen. Dies wird das schwache Äquivalenzprinzip genannt. Der Astronaut David Scott von Apollo 15 demonstrierte das, als er auf dem

rund 100-mal kleiner, als im Labor gemessen werden kann, aber groß genug, um von geplanten Raumfahrtmissionen wie etwa Step (*space-based test of the equivalence principle*) erkannt zu werden.

Die Geschichte enthält noch eine letzte Schwierigkeit. Bisherige Untersuchungen über eventuelle Variationen von  $\alpha$  ignorierten einen wichtigen Umstand: die Klumpigkeit des Universums. Wie alle anderen Galaxien ist unser Milchstraßensystem etwa eine Million Mal dichter als der Kosmos im Mittel. Dabei wird es durch die gegenseitige Anziehung seiner Massen zusammengehalten und beteiligt sich deshalb nicht an der allgemeinen Expansion des Universums. 2003 berechneten Barrow und David F. Mota aus Cambridge, dass sich  $\alpha$  innerhalb unserer Galaxis anders verhalten könnte als in den nahezu leeren Bereichen des Alls. Wenn eine junge Galaxie nach ihrer Ausformung einen Gleichgewichtszustand erreicht hat, verändert sich  $\alpha$  in ihr kaum, aber außerhalb davon immer noch. Somit unterliegen irdische Experimente zur Prüfung der Konstanz von  $\alpha$  einem Auswahldefekt. Diesen müssen wir näher untersuchen, um herauszufinden, wie er die Tests des schwachen Äquivalenzprinzips beeinflusst. Bislang wurde keine räumliche Variation von  $\alpha$  entdeckt. Barrow wies kürzlich nach, dass wegen der Gleichmäßigkeit der kosmischen Hintergrundstrahlung  $\alpha$  zwischen Regionen, die am Himmel um 10 Grad auseinander liegen, nicht mehr als um einen Teil in  $10^8$  variiert.

Es stellt sich nun die Frage, wo bei diesen vielfältigen Überlegungen der wis-



**John D. Barrow** (oben) ist Professor für mathematische Wissenschaften an der Universität Cambridge (England). Neben seinen Forschungen zu den Grundfragen der Kosmologie hat er 17 populärwissenschaftliche Bücher veröffentlicht. Der Astrophysiker **John K. Webb** lehrt an der Universität von New South Wales in Sydney (Australien).



Das absolut Unveränderliche. Die letzten Rätsel der Physik. Von Harald Fritzsch. Piper 2005

Das 1x1 des Universums. Neue Erkenntnisse über die Naturkonstanten. Von John D. Barrow. Campus 2004

A simple cosmology with a varying fine structure constant. Von H. B. Sandvik, J. D. Barrow und J. Magueijo in: Physical Review Letters, Bd. 88, Paper Nr. 031302, 2. Januar 2002

Further evidence for cosmological evolution of the fine structure constant. Von J. K. Webb et al. in: Physical Review Letters, Bd. 87, Heft 9, Paper Nr. 091301, 27. August 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de) unter »Inhaltsverzeichnis«.