

Der Strichcode der **Quasare**

Die Feinstrukturkonstante Alpha ist der Topkandidat bei der Suche nach veränderlichen Naturkonstanten. Kernphysiker fahnden in einem einst aktiven natürlichen Reaktor, Astronomen im Licht weit entfernter Galaxien nach Belegen dafür, dass sich Alpha geändert hat und somit vor Urzeiten die Atome anders aufgebaut waren.

Alpha ist keine schöne Zahl: 0,007 297 352 568 oder ungefähr $1/137$. Solche krummen Werte lassen das Herz eines Physikers nicht gerade höher schlagen. Und doch: Bei den Theoretikern ist die Feinstrukturkonstante äußerst beliebt: Sie sei eine „magische Zahl“, schrieb zum Beispiel der Nobelpreisträger Richard Feynman. Auch für den Kosmologen John Barrow von der Universität Cambridge hat sie einen „legendären Status“. Kein Wunder: Von Alpha – genauer gesagt, von Alphas Unveränderlichkeit – hängt nichts weniger als das Schicksal der Physik ab. Sollte Alpha sich als veränderlich erweisen, dann wäre das unter anderem ein Hinweis für eine Physik jenseits des Standardmodells, mit einem Universum mit mehr als vier Dimensionen. Aber es wäre noch viel mehr: Das ganze Weltbild der Physiker würde ins Wanken geraten. Was bisher als unveränderlich gegolten hat, ist es vielleicht gar nicht – eine atemberaubende Vorstellung. „Es geht nur um winzige Abweichungen“, erklärt der Hamburger Astrophysiker Dieter Reimers. „Doch jede noch so kleine Veränderung von Alpha wäre eine Sensation.“



nicht irgendeine Zahl, sondern sie gibt das Verhältnis zwischen drei Naturkonstanten an: der Lichtgeschwindigkeit c , der Elementarladung e und des Planckschen Wirkungsquantums h . Schwankungen von Alpha würden anzeigen, dass sich das Verhältnis dieser Größen verändert hat, also dass mindestens eine der drei Konstanten nicht konstant ist. Welche das ist, müsste man dann noch herausfinden.

Spuren im Reaktor: Alpha geschrumpft?

Der zweite Vorteil der Feinstrukturkonstante ist, dass sie in vielen verschiedenen physikalischen Gleichungen auftaucht. So öffnen sich den physikalischen Detektiven mehrere Möglichkeiten der Spurensuche. Die erste führt in den Kern eines Atoms. Weil Alpha als Kopplungskonstante die elektromagnetische Kraft regelt, die alle Atome und Moleküle zusammenhält, spielt sie auch bei Kernreaktionen eine Rolle. Und die haben an einem Ort der Erde schon vor langer Zeit und ohne Zutun des Menschen stattgefunden: In den 1970er Jahren stellte sich heraus, dass eine Uran-Lagerstätte im westafrikanischen Gabun vor rund zwei Milliarden Jahren ein natürlicher Kernreaktor war, der Oklo-Reaktor. Er lief etwa eine Million Jahre lang und verbrannte dabei einige Tonnen Uran-235. Dieser Reaktor ist heute so etwas wie ein Archiv, das einen früheren Wert von Alpha aufgezeichnet hat: Man kann hier ablesen, ob eine solche Kernreaktion damals genauso abließ, wie sie heute ablaufen



Foto: François Gauthier-Lafaye/Centre de Géochimie de la Surface, Strasbourg

Uranmine bei Oklo im afrikanischen Gabun

Alpha ist aus zwei Gründen prädestiniert, um Veränderungen der Naturkonstanten auf die Spur zu kommen: Erstens muss man sich nicht mit Einheiten abmühen, denn die Feinstrukturkonstante ist eine einfache Zahl. „Misst man dagegen die Lichtgeschwindigkeit c zweimal hintereinander und erhält verschiedenen Werte,“ sagt der Astrophysiker Michael Murphy aus Cambridge, „dann könnte man daraus schließen, dass sich c wirklich geändert hat. Genauso gut könnte sich aber auch die Zeit verlangsamt oder beschleunigt oder der Metermaßstab verändert haben.“ Alpha ist natürlich



würde. Wenn nicht, wäre das ein Hinweis auf Veränderungen von Alpha.

Schon 1976 wies der russische Physiker Alexander Shlyakhter vom Institut für Kernphysik in Leningrad darauf hin, dass der Oklo-Reaktor sich gut eignet, um eine Veränderung von Alpha zu testen. Anhand einer Elementanalyse in der Umgebung des Reaktors wies er nach, dass Alpha sich in den vergangenen zwei Milliarden Jahren höchstens um zwei Hundertmillionstel verändert haben kann. Der Physiker Steve Lamoreaux vom Los Alamos National Laboratory analysierte die Oklo-Daten 2004 zusammen mit Kollegen neu und kam zu dem Ergebnis, dass Alpha seit der Aktivitätsphase des Reaktors um bis zu 4,5 Hundertmillionstel kleiner geworden sei.

Spuren im All: Alpha gewachsen?

Eine andere Spur führt weg vom Atomkern zur Atomhülle. Denn die Feinstrukturkonstante bestimmt auch die Lage der Energieniveaus in den Atomen. Springt ein Elektron von einem Energieniveau in ein anderes, dann sendet es entweder ein Lichtteilchen aus oder absorbiert eins. Die Wellenlänge dieser Photonen hängt direkt von Alpha ab. Also lohnt es sich, Wellenlängen zu beobachten, denn sie führen die Forscher direkt zu kleinsten Veränderungen in der Struktur der Atomhülle.

Wenn Alpha früher einmal anders aussah, dann sahen auch Atome früher etwas anders aus. Also muss man Nachrichten von Atomen aus der Vergangenheit suchen. Die Forscher finden sie im All: verschiedenste Elemente in galaktischen Staubwolken, die sie mit dem Licht von riesigen natürlichen „Glühbirnen“ sichtbar machen: dem Licht von Quasaren, das die Astronomen

mit ihren besten Teleskopen auffangen. Quasare sind Schwarze Löcher mit einer Masse von Milliarden Sonnen. Sie befinden sich bis zu zwölf Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt im Zentrum einer Galaxie und verschlingen große Mengen Staub und Gas. Weil sich die angesaugte Materie extrem aufheizt, strahlen Quasare heller als die umgebende Galaxie. Sie geben Licht in vielen Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums ab. Das Quasar-Licht, das heute auf der Erde ankommt, stammt aus einer Zeit, in der das Universum noch in den Kinderschuhen steckte. Dieses Licht spalten die Forscher mit einem Spektrographen in seine Wellenlängen auf. Ein Spektrograph funktioniert ähnlich wie ein Prisma, das sichtbares Licht in die Farben des Regenbogens zerlegt. Und dieses Licht erzählt eine Geschichte: Hat das Quasarlicht auf seinem Weg zur Erde eine galaktische Staubwolke durchquert, dann haben die darin enthaltenen Atome (zum Beispiel Magnesium, Aluminium oder Silizium) einige Wellenlängen aus dem Spektrum des Quasars absorbiert und so das Quasarlicht verändert – sie prägten dem Licht quasi einen Strichcode auf. Dieser Strichcode ist sehr charakteristisch für die einzelnen Elemente. Er zeigt ihre Energieniveaus, wie sie damals aussahen, als das Quasarlicht die Atome getroffen hat. Vergleicht man diesen Strichcode mit einem aus heutiger Zeit (bei denselben Elementen im Labor gemessen), kann man direkt erkennen, ob sich die Struktur der Atome – und damit auch Alpha – geändert hat.



Foto: David Nunuk/SBL/Agentur Focus

Die Observatorien Keck I und Keck II mit dem Kometen Hale-Bopp

Alles noch unklar

Die bisherigen Ergebnisse der Quasarstudien sind widersprüchlich: Ein Team um John Webb von der University of New South Wales in Sydney, darunter auch John Barrow und Michael Murphy, verkündete im August 2001 in den *Physical Review Letters* die Sensation: Laut ihren Ergebnissen haben sich die Strichcodes im Laufe der Zeit verändert – und Alpha sei vor 12 Milliarden Jahren um etwa ein hunderttausendstel kleiner gewesen als heute. Die Forscher nahmen sich für diese und andere Studien insgesamt 128 Absorptionslinien von 75 Quasaren vor, die sie mit dem größten optischen Teleskop der Welt, dem Keck-Teleskop auf Hawaii, untersuchten. Niemand fand bisher einen systematischen Fehler. Trotzdem konnte seitdem keine weitere Gruppe von Astrophysikern das Anwachsen von Alpha bestätigen. Ein Team um Patrick Petitjean vom Observatoire de Paris benutzte den UVES-Spektrographen am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte in Chile und stellte fest, dass Alpha sich, wenn überhaupt, in den letzten zehn Milliarden Jahren um höchstens 0,6 Teile von einer Million verändert haben kann – also deutlich weniger, als das Team um Webb es behauptet. Ein anderes Team um Jeffrey Newman vom Lawrence Berkeley National Laboratory untersuchte Emissionslinien von 300 Galaxien in einer Entfernung von vier bis sieben Milliarden Lichtjahren – ebenfalls ohne Ergebnis. Dieter Reimers nahm sich den hellsten Quasar am Südhimmel

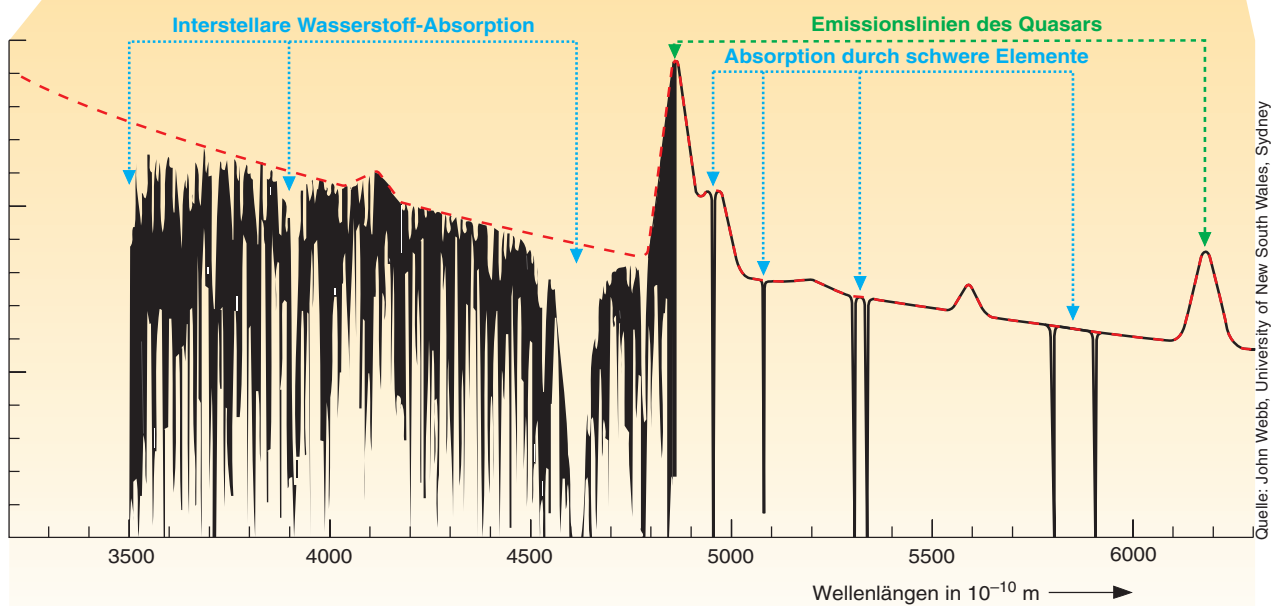
ebenfalls mit dem Very Large Telescope vor und untersuchte speziell die Absorptionslinien von Eisen-Ionen. „Die Qualität der Daten ist sehr gut, aber im Rahmen der Messunsicherheit ist keine Änderung von Alpha zu sehen“, resümiert der Leiter der Hamburger Sternwarte.

Angesichts der widersprüchlichen Messungen sieht es so aus, als würde die Feinstrukturkonstante ihre mystische Stellung noch eine Weile behalten. „In der nächsten Zeit wird es bei den Quasar-Messungen keine entscheidenden Fortschritte geben, die Instrumente sind jetzt ausgereizt“, prognostiziert Dieter Reimers. Doch noch lassen sich die Verfechter einer neuen Physik nicht so leicht entmutigen. John Barrow vertritt die Theorie, dass Alpha nach der Entstehung des Universums zuerst langsam anwuchs, seit sechs Milliarden Jahren aber wohl konstant bleibt. So will er die Oklo- und die Quasar-Ergebnisse vereinbar machen. Andere gehen davon aus, dass Alpha oszilliert. Aber etwas unsicher sind sie alle. Der 2005 verstorbene Physiker John Bahcall vom Institute for Advanced Studies in Princeton sagte just in dem Moment, nachdem er anhand einer Studie mit 165 Quasaren Änderungen von Alpha für die letzten drei Milliarden Jahre ausgeschlossen hatte, dem britischen Magazin *New Scientist*: „Ich habe den Verdacht, dass Alpha sich tatsächlich mit der Zeit ändert“. Der Strohhalm, an den er sich klammerte: „Das Ausmaß der Variationen dürfte jenseits der derzeit möglichen Messmöglichkeiten liegen.“

UTE KEHSE

Von fernen Quasaren ist das Licht Milliarden Jahre bis zu uns unterwegs. Alle „Hindernisse“, wie interstellare Gaswolken, hinterlassen in diesem Licht ihren Fingerabdruck – einen

Strichcode aus Absorptionslinien. Das Bild zeigt die Simulation eines solchen Spektrums. Die rotgestrichelte Linie entspricht dem Lichtkontinuum, das der Quasar aussendet.





Ansprechpartner in der PTB

Folgende Mitarbeiter der PTB sind in den Beiträgen dieses Heftes namentlich erwähnt:

S. 28-29: Die „Liste“

Dr. Wolfgang Wöger (im Ruhestand)
Dr. Winfried Michaelis (winfried.michaelis@ptb.de)
Arbeitsgruppe: „Quantitative Mikroskopie“

S. 30-32: Die K&k-Connection
Dr. Bernd Fellmuth (bernd.fellmuth@ptb.de)
Christof Gaiser (christof.gaiser@ptb.de)
Arbeitsgruppe „Tiefemperaturmetrologie“

S. 33-35: Atome hinter Gittern
Dr. Peter Becker (peter.becker@ptb.de)
Fachbereich „Quantenoptik und Längeneinheit“
Dr. Arnold Nicolaus (arnold.nicolaus@ptb.de)
Arbeitsgruppe „Interferometrie an Maßverkörperungen“

S. 36-39: Im Räderwerk der Quantennormale
Dr. Franz Josef Ahlers (franz.ahlers@ptb.de)
Fachbereich „Elektrische Quantenmetrologie“

S. 51-53: Unser Wissen von der Welt ist vorläufig
Dr. Ekkehard Peik (ekkehard.peik@ptb.de)
Arbeitsgruppe „Optische Uhren mit einzelnen Ionen“

Impressum

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

Redaktion

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB
Postfach 3345, 38023 Braunschweig
Telefon: (05 31) 592-30 06
E-Mail: presse@ptb.de
Redakteure: Jens Simon (jes, verantwortlich), Erika Schow
Autoren: Birgit Ehlbeck, Julia Förster, Frank Frick,
Anne Hardy, Andrea Hoferichter (ah), Ute Kehse,
Jan Oliver Löffken, Brigitte Rötthlein, Dörte Saße,
Rainer Scharf, Axel Tillemans
Layout: Jörn-Uwe Barz
Grafik: Alberto Parra del Riego (alb),
Björn Helge Wysfeld (wysi)
Fact checker: Bernd Warnke
Redaktionsassistentin: Cornelia Land

Druck

Druckverlag Kettler, Bönen/Westf.

Auszüge der „maßstäbe“ im Internet unter www.ptb.de

© PTB. Alle Rechte vorbehalten.
Bitte geben Sie bei einem auszugsweisen Nachdruck
Quelle und Autor an und benachrichtigen Sie die Redaktion.
Braunschweig, September 2006