Teilchenphysik

Sind die fundamentalen Konstanten konstant?

Große vereinheitliche Theorien sagen unter anderem voraus, dass die Feinstrukturkonstante von der Zeit abhängt. Präzisionsexperimente könnten diese Abhängigkeit im Labor nachweisen.

Harald Fritzsch

Die Physik kennt zahlreiche Naturkonstanten wie die Feinstrukturkonstante α, die im Grunde Ärgernisse im Bau der heutigen Theorien darstellen. Einerseits kommt man nicht ohne sie aus, andererseits versteht niemand ihre recht krummen Werte. Bis heute weiß niemand, ob die Werte der Naturkonstanten nur zufällig sind oder sich eventuell aus grundlegenden Prinzipien berechnen lassen. Unter den Stringtheoretikern zählt diese Frage zu den Top Ten der ungelösten Probleme.

Die Feinstrukturkonstante α ist gegeben durch $\alpha = e^2/\hbar c$, wobei $\hbar$ das Plancksche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit bedeuten, während die Elementarladung e die Stärke (Kopplungskonstante) der elektromagnetischen Wechselwirkung beschreibt. Die physikalischen Einheiten kürzen sich in α heraus, sodass sich eine dimensionslose Zahl ergibt, die 1915 von Arnold Sommerfeld bei der Berechnung des Wasserstoffspektrums in die Physik eingeführt wurde. Seitdem rätselt man, warum der inverse Wert von α ganz nah bei 137 liegt. Wolfgang Pauli verfolgte dieser Wert so sehr, dass er schließlich sogar im Zimmer 137 des Züricher Kantonsspitals starb. Auch Werner Heisenberg war von dem Wert so fasziniert, dass er in seiner umfassenden einheitlichen Theorie die Zahl 137 aus einfachen Zahlen wie 2 und 3 kombinierte.

Durch Messen des g-Faktors des Elektrons und Vergleichen mit dem berechneten Wert lässt sich α heute auf etwa 3,7 Milliardstel genau zu 1/137,03599976 bestimmen. Beobachtungen in der Astrophysik legen jedoch nahe, dass die Feinstrukturkonstante früher etwas kleiner war als heute. So hat eine Forschergruppe aus Australien, Großbritannien und den USA am Keck-Teleskop in Hawaii (Abb. 1) die Lichtspektren von ca. 150 Quasaren untersucht, manche bis zu 11 Milliarden Lichtjahre entfernt [1]. Mit Hilfe der sog. „many multiplet“-Methode analysierten sie die Absorptionsspektren dieser fernen Quasare. Die dabei auftretenden Rotverschiebungen von 3,5 bis 0,5 entsprechen etwa einem Alter von 23 bis 87 Prozent des Alters des Universums. Aus den Spektren von Eisen, Nickel, Magnesium, Zink und Aluminium schlossen die Autoren, dass der Wert von α früher nahe bei 1/137,037 statt bei 1/137,036 war – eine kleine Abweichung von

$$\Delta\alpha/\alpha = (-0{,}72 \pm 0{,}18) \times 10^{-5},$$

Abb. 1: Absorptionsspektren von weit entfernten Quasaren, die am Keck-Teleskop auf Hawaii gemessen wurden, deuten darauf hin, dass die Feinstrukturkontante vor einigen Milliarden Jahren etwas kleiner war als heute. (Foto: NASA)

die jedoch große Auswirkungen auf die Theorie haben könnte.

Die Idee, dass gewisse Fundamentalkonstanten letztlich gar nicht konstant sind, sondern eine wenn auch sehr schwache kosmologische Zeitabhängigkeit haben, ist nicht neu. Sie wurde bereits in den 30er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts von Paul M. Dirac [2] und Edward A. Milne [3] diskutiert, und zwar in Bezug auf die Gravitationskonstante. Dirac schrieb seinen Artikel damals in seinen Flitterwochen, was ihm prompt einen Rüffel seines Kollegen George Gamow einbrachte, der äußerte: „Das passiert, wenn Leute heiraten.“

Pascual Jordan erwähnte im Jahr 1937 die Möglichkeit [4], dass auch die Konstanten anderer Wechselwirkungen zeitabhängig sein könnten. Er hielt es jedoch nicht für möglich, dass die Konstante der schwachen Wechselwirkung oder das Elektron-Proton-Massenverhältnis von der Zeit abhängig sein würden. Lev D. Landau betrachtete 1955 in Moskau die Möglichkeit einer Zeitabhängigkeit von α im Zusammenhang mit der Renormierung der elektrischen Ladung [5].

Neben astrophysikalischen Beobachtungen ermöglicht auch die Analyse der Spaltprodukte des in Oklo (Westafrika, Gabun) gefundenen natürlichen Reaktors Rückschlüsse auf die Zeitabhängigkeit von α. Dieser Reaktor war etwa vor 2 Milliarden Jahren aktiv. Die Isotope der Seltenen-Erde-Elemente, z. B. Samarium, entstanden dabei durch die Spaltung von U^{235}. Die beobachtete Verteilung der Isotope ist konsistent mit Berechnungen, die unter der Annahme durchgeführt wurden, dass die Isotope einem starken Neutronenbeschuss ausgesetzt waren. Aus den Oklo-Daten lässt sich damit ein Wert von α bestimmen, der mit dem

Prof. Dr. Harald Fritzsch, Sektion Physik, Universität München, Theresienstr. 37A, D-80333 München

 1617-9439/03/0404-49 $17.50+50/0

heutigen Wert sehr genau übereinstimmt. Die zeitliche Änderung von α müsste demnach kleiner als etwa 10^{-17} pro Jahr sein, wie Thibault Damour und Freeman Dyson 1996 berechneten [6]. Nimmt man sowohl die Quasardaten als auch die Oklo-Daten ernst, ergibt sich die kuriose Möglichkeit, dass der Wert von α im frühen Universum um ein paar hunderstel Promille zugenommen hat, seit zwei Milliarden Jahren jedoch konstant bleibt.

Dieser Schluss aus den Oklo-Daten gilt jedoch nur noch eingeschränkt, wenn neben einer zeitlichen Änderung von α auch zeitliche Änderungen anderer Parameter, etwa für die starke Wechselwirkung, ins Spiel kommen. In die Berechnung geht der Streuquerschnitt für thermische Neutronen ein, die an Samarium-149 gestreut werden. Dieser wird durch eine nukleare Resonanz dominiert. Hat sich deren Position im Verlauf der vergangenen 2 Milliarden Jahre nicht geändert, so ergibt sich die oben angegebene Grenze an die zeitliche Änderung von α, denn ein höherer Wert von α würde wegen der Coulomb-Abstoßung im Kern die Energie der Resonanz erhöhen. Würde sich jedoch die Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung α_s in derselben Zeit etwas verringern, so könnten sich beide Effekte kompensieren.

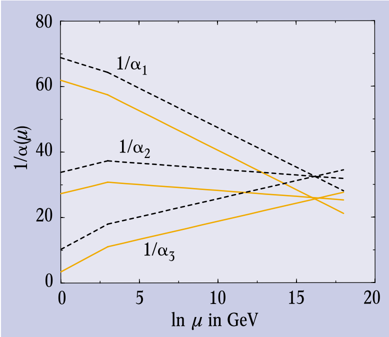


Abb. 2:
Die supersymmetrische Erweiterung des SU(5)-Modells sagt voraus, dass sich die Kopplungskonstanten $\alpha_i = g_i^2/4\pi$ der starken und elektroschwachen Kräfte bei einer Energie von $1{,}5 \cdot 10^{16}$ GeV treffen. Unter der Annahme, dass die vereinigte Kopplungskonstante α_{un} von der Zeit abhängt, zeigen die gestrichelten Linien den Verlauf der Kopplungskonstanten zu einer anderen Zeit.

Ein gewisses Maß an Skepsis hinsichtlich dieser Resultate sollte sicherlich angebracht sein, zumal eine Zeitabhängigkeit von α ein bedeutsames, wenn nicht spektakuläres Resultat wäre. Eine wenn auch nur sehr geringe Zeitabhängigkeit der Konstanten der fundamentalen Wechselwirkungen hätte beispielsweise eine direkte Auswirkung auf unser heutiges theoretisches Bild der kosmologischen Evolution seit dem Urknall. Ernst nehmen sollte man die Resultate jedoch angesichts der Tatsache, dass es von theoretischer Seite eigentlich keine sehr überzeugenden Argumente gibt, warum die Naturkonstanten in der Tat absolut konstant sein sollten.

Die Feinstrukturkonstante α setzt sich aus e, $\hbar$ und c zusammen. Falls α sich tatsächlich in der Zeit ändert, müsste sich demnach zumindest eine dieser Größen ebenfalls ändern. Heute geht man davon aus, dass $\hbar$ und c fundamentale Größen sind, die in geeigneten Maßsystemen auch gleich eins gesetzt werden können. So würde dann eine zeitliche Änderung von α einer zeitlichen Änderung von e entsprechen. Dieser Standpunkt wird im Folgenden angenommen, ebenso wie ein Maßsystem, in dem $\hbar = c = 1$ gilt.

Kopplungskonstanten im Rahmen des Standardmodells

Im Rahmen des heutigen Standardmodells der Teilchenphysik ist die Elementarladung e selbst keine fundamentale Größe. Die Physik der Elementarteilchen wird durch Eichfeldtheorien beschrieben, die analog zur Elektrodynamik aufgebaut sind. Die wesentliche „Zutat“ einer solchen Theorie ist die zugrunde liegende Eichgruppe, die im Fall der Elektrodynamik die Gruppe U(1) der Phasenrotationen ist. Im Standardmodell ist die Eichgruppe gegeben durch $SU(3)^c \times SU(2) \times U(1)$, wobei die „Farbgruppe“ $SU(3)^c$ der Quantenchromodynamik (QCD) zugrunde liegt, die die starke Wechselwirkung beschreibt. Zum Produkt $SU(2) \times U(1)$, das elektromagnetische und schwache Wechselwirkung beschreibt, gehören vier Eichbosonen, zwei geladene schwache Bosonen W^+ und W^- sowie zwei neutrale Eichbosonen, als Vermittler der elektroschwachen Kraft. Dabei mischen die neutralen Bosonen, d. h. als Masseneigenzustände und damit beobachtbare Teilchen erscheinen das Z-Boson (Masse M_Z) und das Photon (Masse 0). Daher ist die elektrische Kopplung e (und damit die Feinstrukturkonstante α) keine fundamentale Kopplungskonstante. Sie hängt mit der fundamentalen Kopplung g_2, der Kopplung der SU(2)-Eichtheorie, über einen Parameter zusammen, der als schwacher Mischungswinkel Θ_w bezeichnet wird:

$$e = g_2 \sin\Theta_w .$$

Das Standardmodell bietet den Rahmen für eine Vereinheitlichung der Kräfte bei hohen Energien. Daher hängen die Kopplungskonstanten der starken und elektroschwachen Wechselwirkungen g_3, g_2 und g_1 von der betrachteten Energie ab und konvergieren, wenn man sie zu sehr hohen Energien (etwa 10^{16} GeV) extrapoliert. Für α bedeutet dies, dass der eingangs erwähnte genaue Wert die Stärke der Wechselwirkung für ruhende oder schwach bewegte Teilchen bestimmt. In Teilchenkollisionen bei hohen Energien wird α jedoch größer. Zum Beispiel wächst α bei Kollisionen, die einem Impulsübertrag von der Größe der Masse der W-Bosonen ($M_W \approx 80{,}4$ GeV) entsprechen, auf ca. 1/128 an. Somit hängt auch der schwache Mischungswinkel Θ_w von der untersuchten Energie ab. Da am LEP-Beschleuniger am CERN Prozesse mit dem Z-Boson sehr genau gemessen wurden, ist der Wert von Θ_w bei M_Z sehr genau bekannt:

$$\sin^2 \Theta_w(Q^2 = M_Z^2) = 0{,}2113 \pm 0{,}00015$$

Als kleiner Exkurs sei angemerkt, dass das Konzept der großen Vereinheitlichung bedeutet, dass sowohl die Eichgruppe der starken Wechselwirkung SU(3) als auch die beiden Eichgruppen SU(2) und U(1) der elektroschwachen Wechselwirkungen Untergruppen einer einzigen Gruppe sind, die die Vereinheitlichung der Kräfte bewirkt. Es bieten sich hierbei die Gruppen SU(5) [7] und SO(10) [8] an. Die Gruppe SO(10) hat die schöne Eigenschaft, dass alle Leptonen und Quarks einer Generation durch eine Darstellung, die 16-Darstellung, zusammengefasst werden. Diese enthält zum Beispiel für die Teilchen der ersten Generation sechs Quarks (u und d in drei Farben) mit ihren Antiquarks, das Elektron, das Positron, das linkshändige „normale“ Neutrino ν_e sowie ein rechtshändiges Neutrino (N_e), das in der normalen schwachen Wechselwirkung nicht in Erscheinung tritt. Seine Existenz ist allerdings relevant für das Auftreten einer Masse der Neutrinos, die man im Rahmen der SO(10)-Theorie erwartet, ganz im Einklang mit den gegenwärtigen Experimenten.

Die Kopplungskonstanten des Standardmodells scheinen in der Tat zu konvergieren, wenn man sie zu sehr hohen Energien extrapoliert. Im einfachsten Modell, basierend auf der Gruppe SU(5), treffen sich sich jedoch nur dann bei ca. 10^{16} GeV genau in einem Punkt, wenn bei Energien über ca. 1 TeV Supersymmetrie realisiert ist. In Modellen, die auf der Eichgruppe SO(10) beruhen, lässt sich eine Konvergenz der Kopplungskonstanten auch ohne Supersymmetrie erreichen, da bei hohen Energien eine weitere Energieskala eine Rolle spielt.

Nimmt man die Idee der großen Vereinheitlichung ernst, so bedeutet dies insbesondere, dass eine zeitliche Variation von α einher gehen sollte mit einer zeitlichen Variation der einheitlichen Kopplungskonstanten g_{un} (un für *unified*) [9]. Anderenfalls würde die große Vereinheitlichung der Kräfte nur an einem bestimmten Zeitpunkt funktionieren. Wir würden deshalb erwarten, dass letztlich alle drei Kopplungskonstanten g_1, g_2 und g_3 von der Zeit abhängen. Von besonderem Interesse ist hierbei eine zeitliche Varianz der QCD-Kopplungskonstante, also von $\alpha_s = g_3^2/4\pi$, denn diese bestimmt die Massenskala der Hadronen und eine ganze Palette weiterer Parameter der Hadronen- und Kernphysik.

In der QCD sind die Protonenmasse m_p sowie die Massen der anderen Hadronen keine fundamentalen Größen wie die Elektronenmasse m_e in der Quantenelektrodynamik, sondern dynamische Größen, die eng mit der Bindungsstruktur zusammenhängen. Falls sich die QCD-Kopplung α_s oder der weiter unten eingeführte QCD-Skalenparameter Λ als Funktion der kosmologischen Zeit etwas ändern, würden daher sowohl die Nukleonenmassen als auch die Massen der Atomkerne von der Zeit abhängen, nicht aber die Elektronenmasse. Solch eine Änderung könnte man daher über eine Messung des Massenverhältnises m_e/m_p nachweisen.

Doch zunächst betrachten wir die Energieabhängigkeit der QCD-Kopplungskonstanten α_s, die besonders stark ausgeprägt ist. In niedrigster Ordnung als Funktion der Energie μ ist α_s gegeben durch:

$$\alpha_s(\mu) \cong \frac{4\pi}{\beta_0 \ln\left(\Lambda^2/\mu^2\right)},$$

wobei $\beta_0 = -11 + 2n_f/3$ (n_f: Anzahl der Quark-Typen) und Λ ein Skalenparameter ist, dessen Größe experimentell bestimmt werden muss. Wenn man die Quarkmassen außer Acht lässt, ist die Protonenmasse proportional zu Λ. Tatsächlich sind die Massen der leichten Quarks m_u, m_d und m_s zwar ungleich Null, jedoch tragen die entsprechenden Massenterme nur wenig zur Gesamtmasse bei (weniger als 10 %). Wir werden deshalb hier diese Beiträge nicht betrachten. Auch erhält die Nukleonenmasse einen kleinen Beitrag elektromagnetischen Ursprungs (etwa 1%), den wir hier ebenfalls vernachlässigen werden.

Die Experimente, insbesondere die mit Hilfe von LEP am CERN durchgeführten Messungen, ergeben $\alpha_s = 0{,}116+0{,}003-0{,}005$ (exp.) $+/-0{,}003$ (theor.) bei $\mu = M_Z$ und für den Skalenparameter $\Lambda = 213+38/-35$ MeV. Falls α_s nicht nur eine Funktion der Referenzskala ist, sondern auch von der kosmologischen Zeit abhängt, ergibt sich zwangsläufig, dass auch der Skalenparameter Λ zeitabhängig ist. Wir erhalten für die zeitliche Abhängigkeit

$$\frac{\dot{\alpha}_s}{\alpha_s} = \frac{2}{\ln\left(\mu^2/\Lambda^2\right)} \frac{\dot{\Lambda}}{\Lambda}$$

sodass die relativen zeitlichen Änderungen verknüpft sind durch

$$\delta\Lambda/\Lambda = (\delta\alpha_s/\alpha_s)\ \ln(\mu/\Lambda)\,.$$

Daher kann die relative Änderung von α_s nicht uniform sein, d. h. identisch für alle Referenzskalen, sondern sie ändert sich logarithmisch, wenn sich die Referenzskala ändert. Beispielsweise könnten wir eine relative Änderung von α_s bei sehr hohen Energie betrachten, etwa in der Nähe der Vereinigungsenergie. Die entsprechende Änderung von Λ wäre dann größer um den Faktor $\ln(\mu/\Lambda) \cong 38$.

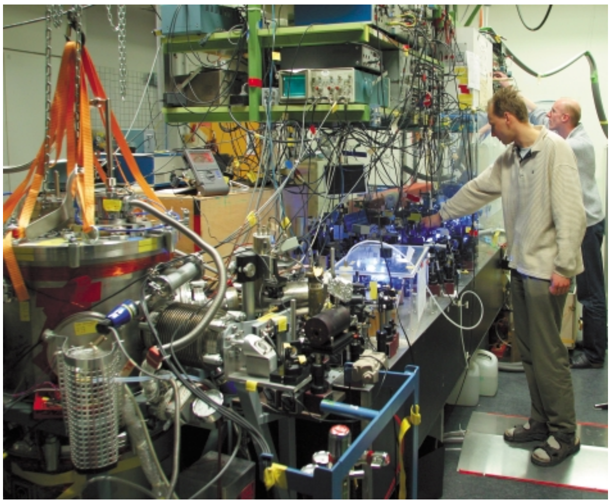


Abb. 3: Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching (M. Fischer, N. Kolachevsky) am Wasserstoffspektrometer, an dem der 1s-2s-Übergang von Wasserstoff mit bislang unerreichter Präzision gemessen werden soll, um eine Zeitabhängigkeit der fundamentalen Konstanten nachzuweisen. (Foto: MPQ)

Unabhängig von den Details der Vereinheitlichung würde man erwarten, dass eine zeitliche Änderung vor allem die einheitliche Kopplungskonstante betrifft, definiert zum Beispiel am Punkt der Vereinheitlichung. Um spezifisch zu sein, betrachten wir als Beispiel die SU(5)-Theorie mit Supersymmetrie, die bei ca. 1 TeV gebrochen wird, sodass man bei relativ niedrigen Energien das Standardmodell erhält. Die Vereinheitlichung findet bei $\Lambda_{GUT} = 1{,}5 \cdot 10^{16}$ GeV statt, wobei die Kopplungskonstante $\alpha_{un} = g_{un}^2/4\pi = 0{,}03853$ ist (Abb. 2).

1) Λ_{GUT} und Λ sind im Prinzip voneinander unabhängige Größen.

Eine Zeitabhängigkeit im Rahmen der einheitlichen Theorie kann sowohl durch eine Zeitabhängigkeit der vereinigten Kopplungskonstante α_{un} als auch durch eine Zeitabhängigkeit der Energie Λ_{GUT}, bei der die Vereinigung stattfindet, auftreten. Wir betrachten beide Möglichkeiten und finden für α und α_s

$$\frac{1}{\alpha}\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = \frac{8}{3}\frac{1}{\alpha_s}\frac{\dot{\alpha}_s}{\alpha_s} - \frac{10}{\pi}\frac{\dot{\Lambda}_{GUT}}{\Lambda_{GUT}}\,.$$

Für den Spezialfall, dass nur die Kopplungskonstante von der Zeit abhängt, erhält man

$$\frac{1}{\alpha}\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = \frac{8}{3}\frac{1}{\alpha_s}\frac{\dot{\alpha}_s}{\alpha_s}\,.$$

Ist jedoch die Kopplungskonstante α_{un} zeitunabhängig und nur die Vereinigungsenergie hängt von der Zeit ab, so ergibt sich

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = -\frac{6}{\pi}\alpha\frac{\dot{\Lambda}_{GUT}}{\Lambda_{GUT}} \approx -0{,}014\frac{\dot{\Lambda}_{GUT}}{\Lambda_{GUT}}\,.$$

Dieser Fall ist von besonderem Interesse, denn einheitliche Theorien könnten durchaus den Wert der Kopplungskonstante festlegen, aber eine zeitliche Variation der Energieskala zulassen, bei der die Vereinigung geschieht. In spezifischen Modellen könnte dies durch eine zeitliche Variation der Erwartungswerte skalarer Felder geschehen, die die Symmetriebrechungen der Theorie regulieren. Da das Universum expandiert, könnte man erwarten, dass sich die Energieskala der Vereinigung absenkt, da die betreffenden skalaren Felder mehr und mehr ausgedünnt werden.

Falls $\dot{\Lambda}_{GUT}/\Lambda_{GUT}$ negativ ist, würde $\dot{\alpha}/\alpha$ in der Zeit zunehmen, was konsistent mit der Beobachtung ist. Letztere ergibt: $\Delta\Lambda_{GUT}/\Lambda_{GUT} = 5{,}1 \cdot 10^{-4}$. Falls die Rate linear extrapoliert wird, würden wir erwarten, dass sich die Vereinigungsenergie verringert entsprechend: $\dot{\Lambda}_{GUT}/\Lambda_{GUT} = -7 \cdot 10^{-14}$ / Jahr.

Experimenteller Nachweis

Für einen möglichen experimentellen Nachweis wichtiger ist die zeitliche Änderung von Λ. Man findet:

$$\frac{\dot{\Lambda}}{\Lambda} \approx -30{,}8\,\frac{\dot{\alpha}}{\alpha}$$

Aufgrund des entgegengesetzten Vorzeichens der relativen Änderungen von Λ und α würde sich Λ und entsprechend auch die Nukleonenmasse mit einer Rate von etwa $2 \cdot 10^{-14}$/Jahr verringern, wenn α mit einer Rate von ca. 10^{-15}/Jahr zunimmt. Die magnetischen Momente des Protons und der Atomkerne würden daher langsam wachsen:

$$\frac{\dot{\mu}_p}{\mu_p} \approx 30{,}8\,\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} \approx 3{,}1 \cdot 10^{-14} \text{ / Jahr}$$

Diese zeitlichen Variationen der Protonenmasse und von α könnte man durch präzise Messungen an Übergängen in Atomen nachweisen, indem man die zeitliche Änderung eines atomaren Übergangs mit derjenigen eines Hyperfein-Übergangs vergleicht. Die Wellenlänge λ_{at} des Lichtes, das in atomaren Übergängen erzeugt wird, ist proportional zu α^{-2}, d.h.

$$\frac{\dot{\lambda}_{at}}{\lambda_{at}} = -2\,\frac{\dot{\alpha}}{\alpha}$$

Im Gegensatz hierzu hängt die Wellenlänge λ_{hf} des Lichtes, das in Hyperfein-Übergängen abgestrahlt wird, neben α auch von Λ ab, denn in die Hyperfein-Aufspaltung geht das magnetische Moment des Atomkerns ein, das eine Funktion der Kernmasse ist. Die Wellenlänge λ_{hf} ist proportional zu $\alpha^4 m_e/\Lambda$.

Ein Vergleich der zeitlichen Variationen gibt

$$\frac{\dot{\lambda}_{hf}/\lambda_{hf}}{\dot{\lambda}_{at}/\lambda_{at}} = -\frac{4\dot{\alpha}/\alpha - \dot{\Lambda}/\Lambda}{2\dot{\alpha}/\alpha} \approx -17{,}4\,.$$

In einem Experiment, das derzeit am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching durchgeführt wird, sucht die Arbeitsgruppe von Theodor Hänsch nach Hinweisen auf diese Zeitabhängigkeit (Abb. 3). Die Idee beruht darauf, den atomaren 1s-2s-Zweiphotonen-Übergang von Wasserstoff mithilfe einer Cäsium-Atomuhr hochpräzise zu messen [10]. Da die Sekunde definiert ist als die Dauer von 9.192.631.770 Zyklen von Mikrowellenlicht, das in den Hyperfeinübergängen von Cäsium-133-Atomen abgestrahlt oder aufgenommen wird, würde ein zeitabhängiges Λ bedeuten, dass der Zeitfluss, der mit Hilfe von Cäsiumuhren gemessen wird, nicht genau dem Zeitfluss entspricht, der in atomaren Übergängen getestet wird. Sollte sich α tatsächlich um ca. 10^{-15}/Jahr ändern, dann sollte sich der Gang der Cäsiumuhr relativ zur Frequenz des Wasserstoffs um mehr als 10^{-14}/Jahr verlangsamen.

Sollte man einen Effekt finden, wäre es wichtig, das Doppelverhältnis $(\dot{\Lambda}/\Lambda)/(\dot{\alpha}/\alpha) = R$ zu bestimmen, sowohl in der Größe als auch im Vorzeichen. Erhält man $R \cong -20$, wäre dies insbesondere ein starker Hinweis auf eine Vereinigung der starken und elektroschwachen Wechselwirkungen bei hohen Energien im Rahmen der SU(5)-Theorie mit Supersymmetrie. Aber auch wenn der Wert dieses Doppelverhältnisses von –20 stark abweicht, wäre er von großer Bedeutung für die Details der großen Vereinigung, die man auf andere Weise nicht oder nur unvollständig erhalten könnte. Darüber hinaus wäre dieser Wert von hohem Interesse bezüglich eines besseren Verständnisses der zeitlichen Variation von Naturkonstanten.

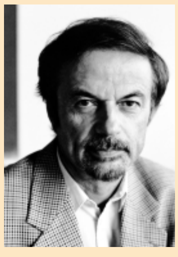
In den Superstring-Theorien erhält man tatsächlich zusätzliche Motivation für „variable Konstanten". Dimensionslose Kopplungsparameter wie α sind in diesen Theorien Funktionen von Vakuum-Erwartungswerten skalarer Felder, die i. a. von der Zeit abhängig sind. Eine Zeitabhängigkeit der Kopplungskonstanten würde man auch erwarten, wenn es neben den drei vorhandenen Raumdimensionen weitere Dimensionen im Verborgenen gibt.

In jedem Fall wäre es wichtig, weitere Hinweise auf eine zeitliche Varianz von α oder α_s zu finden, insbesondere in der Frühzeit des Kosmos. Eine direkte Messung ist hier jedoch nicht möglich. Jüngste Messungen des kosmischen Mikrowellenhintergrundes, dessen Ursprung in die Frühzeit des Universums hineinreicht, zeigen allerdings innerhalb einer Genauigkeit von ca. 10 % keine Anzeichen für eine Veränderlichkeit von α. Die Daten des im Jahre 2001 gestarteten MAP-Satelliten werden es erlauben, diese Grenze deutlich zu verbessern.

Literatur

[1] *J. K. Webb* et al., Phys. Rev. Lett. **67**, 091301 (2001)
[2] *P. A. M. Dirac*, Nature **192**, 325 (1937)
[3] *E. A. Milne*, Proc. Roy. Soc. A**3**, 242 (1937)
[4] *P. Jordan*, Naturwiss., **25**, 513 (1937), U. Physik, **1113**, 660 (1939)
[5] *L. D. Landau*, in *W. Pauli* (Hrsg.), Niels Bohr and the Development of Physics, McGraw-Hill, New York, 52 (1955)
[6] *T. Damour* und *F. Dyson*, Nucl. Phys. **B480**, 37 (1996)
[7] *H. Georgi* und *S. L. Glashow*, Phys. Rev, Lett. **32**, 438 (1974)
[8] *H. Fritzsch* und *P. Minkowski*, Annals Phys. **93**, 193 (1975)
[9] *X. Calmet* und *H. Fritzsch*, Phys. Lett **B540**, 173 (2002), Eur. Phys. J. **C24**, 639 (2002)
[10] *T. Udem*, *R. Holzwarth* und *T. W. Hänsch*, Physik Journal, Februar 2002, S. 39

Der Autor



Harald Fritzsch war nach dem Physikstudium in Leipzig und der Promotion in München mehrere Jahre als Research Associate in den USA und am CERN in Genf tätig. Seit 1979 ist er Ordinarius für theoretische Physik in München. Sein Forschungsinteresse gilt, neben der starken und der schwachen Wechselwirkung, Theorien der großen Vereinheitlichung. Er ist Autor zahlreicher an die Öffentlichkeit gerichteter wissenschaftlicher Bücher und Beiträge in Zeitungen, im Radio und im Fernsehen.