

## Literatur

- ADLER M (1993) Merkmalsausbildung und Hybridisierung bei den Funariaceen (Bryophyta, Musci). In: SCHERER S (Hg) Typen des Lebens. Berlin, S. 67-70.
- AICHELE D & SCHWEGLER H-W (1978) Unsere Moos- und Farnpflanzen. Stuttgart.
- BREMER K (1985) Summary of green plant phylogeny and classification. *Cladistics* 1, 369-385.
- BRESINSKY A (1991) Eukaryota. In: SITTE P, ZIEGLER H, EHRENDORFER F & BRESINSKY A (Hg) Lehrbuch der Botanik, 33. Aufl. (begr. von E. Strasburger u. a.), Stuttgart – Jena – New York.
- CRANDALL-STOTLER B (1980) Morphogenetic designs and a theory of bryophyte origins and divergence. *Bio Science* 30, 580-585.
- CRANDALL-STOTLER B (1986) Morphogenesis, developmental anatomy and bryophyte phylogenetics: Contraindications of monophyly. *J. Bryol.* 14, 1-23.
- CRANDALL-STOTLER B (1984) Musci, hepatics and anthocerotae – an essay on analogues. In: SCHUSTER RM (Hg) New manual of bryology. Vol. 2. Nichinan: Hattori Botanical Laboratory, pp 1093-1129.
- EDWARDS D, DUCKETT JG & RICHARDSON JB (1995) Hepatic characters in the earliest land plants. *Nature* 374, 635-636.
- FRAHM J-P (1994) Moose – lebende Fossilien. *Biologie in unserer Zeit* 24, 120-124.
- GARBARY WA, RENZAGLIA KS & DUCKETT JG (1993) The phylogeny of land plants: a cladistic analysis based on male gametogenesis. *Pl. Syst. Evol.* 188, 237-269.
- GENSEL PG & ANDREWS HN (1984) Plant Life in the Devonian. New York: Praeger.
- GRAY J & SHEAR W (1992) Early life on land. *Am. Sci.* 80, 444-456.
- KRANZ HD, MIKS D, SIEGLER M-L, CAPESIUS I, SENSEN CW & HUSS VAR (1995) The origin of land plants: Phylogenetic relationships among charophytes, bryophytes, and vascular plants inferred from complete Small-Subunit Ribosomal RNA gene sequences. *J. Mol. Evol.* 41, 74-84.
- LACEY WS (1969) Fossil bryophytes. *Biological Review* 44, 189-205.
- SCHERER S (1993, Hg) Typen des Lebens. Berlin.
- SCHUSTER RM (1984a) Evolution, phylogeny and classification of the Hepaticae. In: SCHUSTER RM (Hg): New manual of bryology. Vol. 2. Nichinan: Hattori Botanical Laboratory, pp 892-1070.
- SCHUSTER RM (1984b) Morphology, phylogeny and classification of the Anthocerotae. In: SCHUSTER RM (Hg): New manual of bryology. Vol. 2. Nichinan: Hattori Botanical Laboratory, pp 1071-1092.
- SPECK T (1988) Fernstudium Naturwissenschaften. Evolution der Pflanzen- und Tierwelt. 5/1 Geschichte der Pflanzen 2. Teil. Deutsches Institut für Fernstudien an der Universität Tübingen.
- STEWART WN & ROTHWELL GW (1993) Palaeobotany and the evolution of plants. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press.
- TAYLOR TN & TAYLOR EL (1993) The biology and evolution of fossil plants. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.

## Wie konstant sind die fundamentalen Naturkonstanten?

Thomas Portmann, Zur Zinsbach 45, 57076 Siegen

**Zusammenfassung:** Die problematische Bedeutung der Konstanz der fundamentalen Konstanten für die Schöpfungsforschung wird behandelt. Isotopengeologie und beobachtende Kosmologie legen ein Kosmosalter von größenordnungsmäßig  $10^{10}$  Jahren nahe, wobei die raumzeitliche Unveränderlichkeit einiger Konstanten vorausgesetzt wird. Daher scheint eine Variabilität dieser Konstanten die Möglichkeit anzubieten, die empirischen Daten mit dem niedrigen Kosmosalter zu harmonisieren, das sich bei einem wörtlichen Verständnis aus der biblischen Überlieferung (den ersten Genesiskapiteln) ergibt. Es wird unter der exemplarischen Erläuterung einer empirischen Schranke und anhand allgemeiner Betrachtungen über den Charakter fundamentaler physikalischer Konstanten gezeigt, warum sich dieser Weg als Sackgasse erweist.

### Einführung

Abgesehen von der grundlegenden Bedeutung der Titelfrage für alle naturwissenschaftlichen Fakultäten spielt die Frage für Untersuchungen im Rahmen der Schöpfungslehre eine besonders problematische Rolle. Einerseits beruhen die radiometrischen Datierungen von terrestrischen und extraterrestrischen Gesteinen unter anderem auch auf der Konstanz der Zerfallsreihen radioaktiver Isotope und der Konstanz der Halbwertszeiten im Verlauf der Erdgeschichte. Die Datierungen hängen also unmittelbar von der Unveränderlichkeit der fundamentalen Konstanten ab, wie z.B. der Elementarteilchenmassen, der elektrischen Elementarladung, der Stärke der Kernkraft (starke Wechselwirkung), der Lichtgeschwindigkeit, der Planckschen Konstanten usw. Andererseits ergibt sich aus der beobachtenden Astronomie ein Bild des uns umgebenden Welt-

alls mit bestimmten Aussagen über seine Ausdehnung und sein Alter. Diese Aussagen basieren ebenfalls empfindlich auf der Stabilität insbesondere der Lichtgeschwindigkeit. Das Problem besteht nun darin, die unter der Voraussetzung dieser Stabilität sich jeweils ergebenden und miteinander in gutem Einklang stehenden, unvorstellbar hohen Alter mit dem verhältnismäßig geringen Kosmosalter aus einer wörtlichen Auslegung der biblischen Überlieferung zu harmonisieren. Man vergegenwärtige sich einmal den Größenordnungsunterschied von mehr als *sechs Zehnerpotenzen*, mit dem ein Harmonisierungsversuch konfrontiert wird!

Vom Standpunkt der biblischen Schöpfungslehre ist eine Harmonisierung aber unbedingt notwendig. Dabei schließe ich die oft vorgeschlagene Lösung, der Schöpfer habe das Universum so geschaffen, daß die wissenschaftlichen Datierungen ein so hohes Alter vortäuschen, als Pseudolösung aus. Den Grund dafür möchte ich am Beispiel der riesigen Laufzeiten des Lichts entfernter Sterne, die sich aus der Annahme der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ergeben und auch ein entsprechend hohes Kosmosalter nahelegen, einmal ausführen: Der Einwand, der Schöpfer habe das Licht auf seinem Wege zu uns vor ein paar tausend Jahren gleich miterschaffen, würde bedeuten, daß dasjenige Sternenlicht, das wir heute sehen, nie wirklich von dem betreffenden Stern ausgegangen wäre. Eine Supernova beispielsweise, die wir heute also nur deshalb sehen, weil sie etwa im heute beim irdischen Beobachter eintreffenden Licht durch die Hand des Schöpfers „aufgezeichnet“ wurde (und zwar zum Zeitpunkt der Schöpfung zwischen explodiertem „Stern“ und Beobachter), wäre nie geschehen, und der vor der Explosion sichtbar gewesene Stern hätte in dieser Form nie existiert. Das erscheint sowohl aus theologischen wie auch aus philosophischen Gründen unakzeptabel (SETTERFIELD 1983).

Theologisch unakzeptabel ist diese Vorstellung, weil sie der Verantwortung widerspricht, in der wir mit der Schöpfungswirklichkeit umgehen, die uns durch unsere Sinne zugänglich ist. Zu diesem Umgang gehört insbesondere auch die Vorstellung, die wir aus unserer Sinneswahrnehmung entwickeln. Wir haben kein Recht dazu, sichtbare, historische Ereignisse, die in der Bibel als Wirklichkeiten angesprochen sind (Gott schuf die Sterne, die wir heute sehen, in ihrer geschichtlichen Wirklichkeit), zu negieren.

Das philosophische Problem ist erkenntnistheoretischer Art und ergibt sich daraus, daß diese Vorstellung prinzipiell nicht widerlegbar ist. Es ist aber nicht möglich, den Wahrheitsgehalt einer Theorie zu beurteilen, die Beobachtungsdaten beschreibt, wenn diese Theorie nicht prinzipiell falsifizierbar ist.

Möchte man an einem physikalisch jungen Uni-

versum festhalten, so wird daher eine echte Harmonisierung erforderlich. Mit genau diesem Ziel ist die Konstanz der fundamentalen Naturkonstanten in Frage gestellt worden. Es sind Szenarien vorgeschlagen worden, in denen die Konstanten früher einen so drastisch anderen Wert gehabt haben, daß die für radiometrische Datierungen relevanten empirischen Daten mit einem  $10^4$  Jahre alten Sonnensystem verträglich werden; entsprechendes gilt für die Lichtgeschwindigkeit und das Alter des Universums (SETTERFIELD 1983; 1987). Eine Alternative mit drastischer Änderung der Lichtgeschwindigkeit findet man auch bei TROITSKII (1987). Alle diese Szenarien mit starker Konstantenvariabilität stehen aber im Widerspruch zu längst etablierten empirischen Schranken für die zeitliche Änderung der fundamentalen Konstanten.

Das Anliegen dieses Artikels besteht darin, diesen Widerspruch zu bewerten, das heißt insbesondere, den Charakter und die Aussagekraft der etablierten Schranken verständlich zu machen. Daher werde ich mich auf die grundsätzliche Art der Argumentation des etablierten Ergebnisses konzentrieren und demgemäß aktuellere Untersuchungen ausblenden, da sie die Schranken im wesentlichen nur quantitativ weitertreiben (enger machen).

Der weitere Artikel ist folgendermaßen aufgebaut: Zunächst wird geklärt, was fundamentale Naturkonstanten im Vergleich zu anderen Konstanten sind und nach welchem Kriterium man eine Konstante als fundamental ansieht. Danach möchte ich auf das Problem einer bestimmten Freiheit in der Wahl der Einheiten (in diesem Aufsatz „Eichfreiheit“ genannt) eingehen, die auch den Autoren der zuzitierenden Arbeiten (zumeist unausgesprochen) bewußt ist. Es stellt sich nämlich heraus, daß mehr fundamentale Konstanten in der Literatur ausgewiesen sind, als zur Naturbeschreibung erforderlich sind. Daraus ergibt sich die künstliche Möglichkeit, die Konstanten variieren zu lassen, ohne mit der Empirie in Widerspruch zu geraten. Diese Variationen entsprechen allerdings bloßen Umrechnungen der Uhren, Maßstäbe usw. und haben keine physikalische Relevanz. Durch eine entsprechende Kritik wird es möglich, die wirklich relevanten Konstanten aufzuzählen, was dann auch geschehen soll. Im darauffolgenden Abschnitt werden dann einige empirische Schranken betrachtet. Abschließend folgt eine Diskussion zweier anderslautender Standpunkte.

## Fundamentale Naturkonstanten

Die Variabilität der fundamentalen Konstanten ist in der Geschichte der modernen Physik immer wieder neu diskutiert worden. Dabei wurde klar, daß die Auswahl derjenigen Größen, die man als „fundamental konstant“ annimmt, eigentlich nicht absolut getroffen werden kann. Vielmehr ist diese Cha-

## Glossar

**H $\alpha$ -Linie:** die langwelligste Linie aus der Balmer-Serie ( $\lambda = 6.5628 \times 10^{-7} \text{ m}$ ); das ist die einzige Serie mit sichtbaren Spektrallinien des Wasserstoffspektrums – z.B. des im heißen Lichtbogen angeregten Emissionsspektrums des Wasserstoffs.

**Inertialsystem:** ein Bezugssystem, in dem sich materielle Körper, auf die keine äußeren Kräfte wirken, geradlinig und gleichförmig bewegen. Ein Bezugssystem ist ein System von drei Raumkoordinaten und einer Zeitkoordinate; zumeist versteht man unter einem Inertialsystem insbesondere ein Inertialsystem mit kartesischen Raumkoordinaten. Zur physikalischen Realisierung eines Inertialsystems benötigt man einen Maßstab und eine Uhr. Da nach der Speziellen Relativitätstheorie die Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c$  in allen Inertialsystemen denselben Wert hat, ist  $c$  ein immer und überall verfügbares Geschwindigkeitsmaß.

**keV:** „Kiloelektronenvolt“ – eine in der Teilchenphysik gängige Energieeinheit für Teilchen. Ein Elektronenvolt ist die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es die Spannungsdifferenz von einem Volt durchläuft.

**Leptonen, Quarks:** nach der derzeitigen Theorie die fundamentalen Materiekonstituenten, d.h. diejenigen Elementarteilchen, aus denen die Materie aufgebaut ist. Das bekannteste Lepton ist das Elektron. Es ist das leichteste stabile Materieteilchen überhaupt, das eine Ruhemasse hat. Leptonen und Quarks sind Fermionen und genügen daher dem Paulischen Ausschließungsprinzip. Es gibt sechs Leptonen und sechs Quarks – und die Antiteilchen dazu. Leptonen und Quarks sind jeweils zu Familien à zwei zusammengefaßt. Der „Partner“ des Elektrons ist das masselose Elektron Neutrino. Drei Leptonen, die Neutrinos, haben keine Masse. Das Proton (Wasserstoffatomkern) ist aus zwei „Up“-Quarks und einem

„Down“-Quark zusammengesetzt, das Neutron aus einem „Up“-Quark und zwei „Down“-Quarks. „Up“-Quarks und „Down“-Quarks bilden die leichteste Familie. Quarks treten im Gegensatz zu Leptonen niemals einzeln auf, sondern immer in Bindung mit weiteren Quarks.

**Paulisches Ausschließungsprinzip:** Das Paulische Ausschließungsprinzip gilt für Fermionen und besagt, daß sich zwei identische Teilchen – etwa zwei Elektronen – niemals im gleichen quantenmechanischen Zustand befinden können. Es muß wenigstens eine Quantenzahl geben, in der sich zwei identische Fermionen unterscheiden müssen. Das Prinzip ist dafür verantwortlich, daß sich nicht alle Elektronen eines Atoms im Grundzustand (dem Zustand mit der niedrigsten Energie) aufhalten, sondern sukzessive „höhere“ Zustände besetzen und so die Atomhülle aufbauen. Das Pauli-Prinzip ist daher die für Materie wohl typischste Eigenschaft: Es ist letztlich dafür verantwortlich, daß sich nicht zwei materielle Körper gleichzeitig am selben Ort aufhalten können. Lichtquanten sind Bosonen und gehorchen daher dem Pauli-Prinzip nicht.

**Plancksche Konstante:** Die Planck-Konstante ist eine Größe mit der Dimension Länge  $\times$  Impuls bzw. Zeit  $\times$  Energie. Diese Dimensionenkombination nennt man auch Wirkung. Man kann sich diese Konstante in gewissem Sinne als die kleinstmögliche Wirkung oder als die natürliche Einheit für die Wirkung vorstellen. Die bekannteste Beziehung, in der sie auftritt, ist die Formel für die Energie eines Lichtquants:  $E = h\nu = \hbar\omega$ ;  $\hbar = h/2\pi$ ,  $\nu$ : Frequenz des Quants.

**Rückwärtslichtkegel:** Ein Lichtkegel ist ein vierdimensionales Gebilde. Er beschreibt die Raum-Zeit-Koordinaten der Lichtwelle eines Lichtblitzes im Verlauf der Zeit. Ein Lichtkegel ist also eine Kugelober-

fläche, deren Radius sich mit Lichtgeschwindigkeit vergrößert. Ein Rückwärtslichtkegel ist ein zeitunggekehrter Lichtkegel: Er beschreibt die Raum-Zeit-Koordinaten einer Kugeloberfläche, die zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort zusammenlaufen wird. Der Rückwärtslichtkegel eines Beobachters ist derjenige Lichtkegel, der im Beobachter zusammenläuft. Alle optisch beobachtbaren Ereignisse liegen also auf dem Rückwärtslichtkegel des Beobachters. Ereignisse, die innerhalb des Rückwärtslichtkegels liegen, sind optisch beobachtbar, wenn man eine Umlenkung des Lichtstrahls ausschließt. Ereignisse, die außerhalb des Rückwärtslichtkegels liegen, sind wegen Nicht-Überschreitbarkeit der Lichtgeschwindigkeit prinzipiell unbeobachtbar.

**Schwarzer Strahler:** Ein schwarzer Strahler ist ein ideal schwarzer Körper, d.h. ein Körper, der jedes einfallende Licht absorbiert. Diese Idealisierung läßt sich näherungsweise recht gut durch einen von innen rußgeschwärzten Kasten realisieren, in den man ein Loch bohrt – ein solches Loch absorbiert Licht sehr gut. Man kann theoretisch und experimentell zeigen, daß ein schwarzer Strahler auch Licht abstrahlt, und zwar mit einem Spektrum, das von der materiellen Realisierung des Strahlers vollkommen unabhängig ist und nur von der Temperatur des Strahlers abhängt.

**Zweikörperproblem:** ist das mechanische Anfangswertproblem für zwei Körper, die eine konservative Kraft aufeinander ausüben, die vom Abstand ihrer Schwerpunkte abhängt. Die bekanntesten Beispiele sind das Keplerproblem (Sonne-Planet, Gravitationskraft) und das Wasserstoffatom (Proton-Elektron, Coulomb-Anziehung).

akterisierung erst durch eine spezifische Theorie gegeben. Die Relativitätstheorie und die Quantentheorie haben in diesem Jahrhundert zu einem umfassenden, tiefgreifenden und quantitativen Verstehen des Aufbaus der Materie und der Struktur der Wechselwirkungen geführt. Mit einem konkreten Modell für die fundamentalen Wechselwirkungen hat man auch eine vorläufige Auswahl fundamentaler Konstanten getroffen.

Eine Konstante hat nicht nur einen zeitlich und räumlich stabilen Wert, sondern sie ist zumeist gleichzeitig der Ausdruck einer bestimmten Gesetzmäßigkeit. So läßt sich beispielsweise die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als Charakteristikum der speziellen Relativitätstheorie verstehen,

oder die Konstanz der Planck-Konstante als Ausdruck der Quantentheorie. Insofern man nun fundamentale Gesetzmäßigkeiten von daraus abgeleiteten Gesetzen oder auch von bloß empirischen Formeln unterscheiden kann, spricht man bei den durch fundamentale Gesetzmäßigkeiten charakterisierten Konstanten von fundamentalen physikalischen Konstanten (bzw. „fundamentalen Naturkonstanten“) im Unterschied zu den Konstanten abgeleiteter Theorien. Die Konstanten abgeleiteter Theorien sind konsequenterweise durch die fundamentalen Konstanten ausdrückbar.

Ist die Charakterisierung einer Konstante als „fundamental“ auf diese Weise geschehen, wird sie durch eine zugehörige Phänomenologie interpre-

tiert und schließlich – davon ausgehend – experimentell getestet. Einerseits ergibt sich aus dieser Situation, daß der experimentelle Test einer Größenkonstanz ein hervorragender Prüfstein für eine Theorie ist, die die Größe als Konstante enthält, andererseits bedeutet aber dieselbe Situation, daß jede Entscheidung für eine definierte Gruppe fundamentaler Konstanten vom Stand des wissenschaftlichen Fortschritts abhängig und damit vorläufig ist. Denn im Verlauf dieses Fortschritts werden alte Theorien zuweilen durch allgemeinere Theorien ersetzt, die ihre eigenen Konstanten haben (insofern sind die alten Theorien als Ableitungen aus den neuen interpretierbar), und es tauchen Beziehungen zwischen alten und neuen Konstanten auf. Dabei kann es sich erweisen, daß einige der alten Konstanten gar keine mehr sind. Ihre Variabilität und Abhängigkeit werden in diesem Fall jedoch durch ein aus der allgemeineren Theorie resultierendes Gesetz bestimmt.

Als Beispiel möchte ich das Wien-Verschiebungsgesetz nennen. Es beschreibt die Wellenlänge  $\lambda_{\max}$ , bei der die Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers maximal ist, als umgekehrt proportional zur absoluten Temperatur  $T$  des Strahlers:

$$\lambda_{\max} T = b, \quad (1)$$

wobei  $b$  eine empirische Konstante ist, die man nicht weiter ableiten und daher als fundamental ansehen konnte.

Als nun PLANCK durch seine Hypothese, daß das elektromagnetische Strahlungsfeld seine Energie bei der jeweiligen Frequenz  $\nu$  nur in „Quanten“ zu  $E = h\nu$  aufnehmen und abgeben kann, die Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers als Funktion von der Wellenlänge (Spektrum) herleiten konnte, war auch die Beziehung (1) ableitbar, und die Konstante  $b$  wurde ausdrückbar als

$$b = \hbar c/xk \quad (2)$$

( $\hbar$ : Planck-Konstante dividiert durch  $2\pi$ ,  $c$ : Vakuumlichtgeschwindigkeit,  $k$ : Boltzmann-Konstante,  $x$  = 0,7902. . . : eine bestimmte irrationale Zahl). Im Rahmen der Quantentheorie ist  $b$  also eine abgeleitete Konstante und keine fundamentale Naturkonstante mehr.

Empirische Daten werden also in einem theoretischen Rahmen interpretiert, und da die Auswahl bestimmter Konstanten als „fundamental“ von diesem Rahmen abhängt, ist sie vom Stand der Forschung abhängig.

Trotzdem bleiben empirische Aussagen über die Konstanz oder Variabilität von Größen, die durch ihren jeweiligen theoretischen Rahmen gegeben sind, absolut, und die Genauigkeit einer solchen Aussage für eine bestimmte Größe kann sich in der Geschichte der Physik nur verbessern – ungeachtet der sich manchmal ergebenden Notwendigkeit, diese empirischen Aussagen in einen anderen Rahmen zu übersetzen.

Von grundlegender Bedeutung für Isotopengeologie, Geophysik und beobachtende Kosmologie sind also *empirisch gewonnene Schranken* für die mögliche Variabilität der heute als fundamental angesehenen Konstanten während der Erd- und späteren Kosmosgeschichte. Da man aus diesen Schranken erst das Kosmosalter ermitteln möchte, sollen sich die Schranken unabhängig von der Größenordnung des *tatsächlichen* Alters auf die ganze Geschichte beziehen. Für unsere Problemstellung interessant sind also Schranken der Art: Änderung des Wertes während der Erdgeschichte, und nicht: Änderung des Wertes pro Zeiteinheit. Die letztere Art würde uns nicht weiterhelfen, da wegen unserer Unkenntnis des tatsächlichen Alters der Rückschluß auf die Variation während der ganzen Geschichte fraglich wäre.

Zu genau dieser Fragestellung sind in den Sechziger Jahren physikalische Arbeiten veröffentlicht worden. Untersucht wurden dabei die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung (d.h. die elektrische Elementarladung bzw., was damit gleichbedeutend ist, die Feinstrukturkonstante  $\alpha$ ), die starke Wechselwirkung (verantwortlich für den Alphazerfall von Atomkernen), die schwache Wechselwirkung (verantwortlich für den Betazerfall) und das Massenverhältnis zwischen Protonen und Elektronen.

Eine sorgfältige Diskussion schloß am Ende jenes Jahrzehnts damit ab, daß die Variationen der diesbezüglichen Konstanten (mit Ausnahme der Gravitationskonstanten) sehr klein gewesen sein müssen. Sehr klein bedeutet dabei, daß die möglichen Änderungen vom Anfang der Erdgeschichte bis heute im Zehntelpromillebereich lagen. Im Abschnitt über empirische Schranken werde ich versuchen, die damaligen Argumente bezüglich der elektromagnetischen und der starken Wechselwirkung grob nachzuzeichnen. Sie sind in dieser Form bis heute gültig.

In den darauffolgenden Jahren ging es dann nur noch um eine Verkleinerung der Schranken. In den Ergebnissen bis heute liegen die noch möglichen Variationen innerhalb des Meßfehlers und sind damit nicht signifikant.

## Eichfreiheit

Wenn man eine Messung machen will, braucht man Maßstäbe wie z.B. Längenmaßstäbe, Uhren und Gewichte. Die klassische, anschauliche Abstraktion idealer Maßstäbe ist eine Fiktion, mit der die moderne Physik aufgeräumt hat. So beginnen sowohl Relativitätstheorie wie auch Quantenmechanik bekanntlich mit einer kritischen Diskussion der realen Maßstäbe und des realen Meßprozesses. In einem vielleicht nicht ganz unähnlichen Sinne muß auch in unserem Fall darauf hingewiesen wer-

den, daß man dimensionsbehaftete Größen (das sind Größen, für deren Bestimmung wir Maßstäbe und somit auch Einheiten benötigen) nicht direkt „messen“ kann. Die Messung solcher Größen ist eigentlich ein Vergleich mit einem realen Maßstab, und das eigentliche, wirklich beobachtete Meßergebnis ein *dimensionsloses Größenverhältnis*. Eine wissenschaftstheoretisch saubere Überlegung hat nun nicht nur das Verhalten der zu messenden Größe, sondern ebenso auch das Verhalten des realen Maßstabes zu erklären bzw. zu berücksichtigen. Eine Theorie hat beides gleichzeitig zu leisten und ihre Prognosen so weit wie möglich mit der Beobachtung vergleichbar zu machen. In diesem Zusammenhang bedeutet das: *Streng genommen sind Prognosen nur dann mit der Beobachtung vergleichbar, wenn sie dimensionslose Größenverhältnisse bzw. reine Zahlen zum Inhalt haben.*

---

**Streng genommen sind Prognosen  
nur dann mit der Beobachtung  
vergleichbar, wenn sie  
dimensionslose Größenverhältnisse  
bzw. reine Zahlen zum Inhalt haben.**

---

Die Messung einer dimensionsbehafteten Größe, also ihr Vergleich mit einem Maßstab, hat als dimensionslose Zahl die sogenannte Maßzahl zum Ergebnis. Die Konstanz oder mögliche Variabilität einer solchen Maßzahl für eine fundamentale Konstante muß mit einer gewissen Vorsicht interpretiert werden. Einerseits muß man bedenken, daß es mehr internationale Einheiten („Dimensionen“) gibt, als man nach dem heutigen Stand der Forschung benötigt. Manche als fundamental ausgewiesene Konstanten sind nach aktuellem Stand nichts anderes als Umrechnungsfaktoren zwischen Einheiten – und somit gewissermaßen trivialerweise konstant, obwohl sie früher, d.h. außerhalb des heutigen theoretischen Rahmens, einen ganz eigenständigen Sinn hatten. Ein Paradebeispiel dafür ist die Lichtgeschwindigkeit, deren Maßzahl man inzwischen international festgesetzt hat, wodurch der internationale Längenmaßstab überflüssig wurde. Andererseits darf man nicht vergessen, daß man bei einer Änderung der fundamentalen Konstanten eine entsprechende Reaktion der Maßstäbe, Uhren usw. auf diese Änderung zu berücksichtigen hat, wobei man die Reaktion nach der heutigen Theorie vorhersagen könnte. Damit würden sich eben auch die Einheiten ändern, zu denen wir die Messung in Beziehung setzen.

Wegen dieser subtilen Zusammenhänge ist es erforderlich, sich genau Rechenschaft darüber zu geben, was man eigentlich meint, wenn man sagt, eine fundamentale Konstante erfahre eine Verän-

derung. Insbesondere muß man in hypothetischen Alternativvorstellungen, in denen man eine Änderung der Konstanten zuläßt, zusätzlich die Frage erörtern, ob eine solche Änderung überhaupt mit physikalischen Methoden meßbar wäre, oder ob sie ein unmeßbares Artefakt in der Hypothese ist. Dieses Artefakt nenne ich im folgenden auch „Eichfreiheit“. Es stellt sich nämlich heraus, daß man tatsächlich fundamentale, dimensionsbehaftete Größen sozusagen „per Hand“ ändern kann, ohne daß sich dadurch die Prognosen der Theorie für wirklich beobachtbare Phänomene ändern. Gerade die beiden im Abschnitt „Diskussion zweier anderslautender Standpunkte“ erörterten Alternativen beruhen auf einer solchen Eichfreiheit.

In diesem Sinne möchte ich die übliche Darstellung

$$\text{Größe} = \text{Maßzahl} \times \text{Einheit}$$

einmal etwas zugunsten der Denkweise

$$\text{Größe} = \text{Maßzahl} \times \text{andere Größe}$$

in den Hintergrund stellen, um damit in Erinnerung zu rufen, daß eine Einheit nicht „vom Himmel fällt“, sondern letztlich auch nichts als eine gleichberechtigte Größe ist, die sich vielleicht auch ändern kann.

Die geforderte Rechenschaft kann man sich zunächst nur ausgehend von einem bestimmten Forschungsstand geben. Zu diesem Zeitpunkt bieten sich dafür eigentlich nur die etablierten, modernen Grundlagen der Physik an: Die fundamentalen Wechselwirkungen, auf die man sich letztlich alle naturwissenschaftlichen Phänomene zurückgeführt denkt, werden durch das Standardmodell der starken, schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung und durch die Einsteinsche Gravitationstheorie beschrieben. Diese vier Theorien haben alle experimentellen Präzisionstests der vergangenen Jahre glänzend bestanden – sind also hart laborgetestet. Das konzeptionelle und mathematische Werkzeug zur Beschreibung dieser vier Wechselwirkungen liefern die zur relativistischen Quantenfeldtheorie vereinigte Quantenmechanik und Spezielle Relativitätstheorie.

Dieser theoretische Gesamtrahmen trifft bereits eine vollständige Auswahl fundamentaler Konstanten, darunter achtzehn dimensionslose Größen. Vier davon charakterisieren die Stärken der genannten Wechselwirkungen, wohingegen die verbleibenden vierzehn Zahlen u.a. Verhältnisse der Massen der fundamentalen Materiekonstituenten (Leptonen und Quarks) sind.

Um nun eine Kritik der Konstanz dieser Größen durchzuführen, darf man die genannten Theorien nicht streng voraussetzen, denn sonst hätte man bereits die Konstanz vorausgesetzt.<sup>1</sup> Man setzt für die folgende Untersuchung lediglich eine etablierte Definition der fundamentalen Konstanten und den empirischen Gesamtbefund voraus, daß zur Beschreibung aller bislang bekannten naturwis-

senschaftlichen Phänomene jener theoretische Gesamtrahmen ausreicht. Insbesondere gehört dazu auch die etablierte, empirisch hart getestete Vorstellung vom Aufbau der Materie, durch die der Bezug aller Phänomene zu den fundamentalen Größen hergestellt wird.<sup>2</sup> Dabei behält man sich vor, daß sich die Werte der Konstanten räumlich und zeitlich allmählich ändern können, während sie durch den gängigen Rahmen weiter gut definiert sind und die Zusammenhänge zwischen nicht-fundamentalen Größen trotzdem durch diesen Rahmen gut beschrieben werden, obwohl dieser streng genommen durch eine Konstantenvariabilität verbesserungsbedürftig wird.

Ich möchte im folgenden zeigen, wie unter der genannten Voraussetzung alle bekannten physikalischen Phänomene außer der Gravitation und der Kern- und Elementarteilchenphysik nur durch die Massen der Teilchen und durch die Feinstrukturkonstante  $\alpha$  als die fundamentalen Konstanten charakterisiert sind. Alle anderen Konstanten sind entweder abgeleitet oder stehen im Zusammenhang mit einer Eichfreiheit.

Ich gehe in zwei Etappen vor: In der ersten Etappe sehe ich einmal vom Magnetismus (also auch der Ausbreitung von Licht) und natürlich von der Gravitation und den Kernkräften ab. Elektrische Kräfte und Quanteneffekte setze ich aber voraus. Wenn man sich den Aufbau der Materie vergegenwärtigt, bleiben einem zur Herstellung realer Maßstäbe, Uhren und Gewichte nur Objekte, deren raumzeitliche Abmessungen und Massen ganz bestimmte, physikalisch wohldefinierte, dimensionslose Vielfache der „atomaren Einheiten“ sind. Hierzu zählt man nicht die Lichtgeschwindigkeit  $c$ , und in diesem Sinne denke ich nicht an die moderne Definition des Meters, die die Ausbreitung von Licht zugrundelegt.

„Physikalisch wohldefiniert“ soll hier erstens heißen: Diese dimensionslosen Vielfachen haben etwas mit der Struktur des Aufbaus der Materie zu tun. Wenn man z.B. als Längenmaßstab die Kantenlänge eines fehlerfreien Kristalls benutzt, so ist diese Länge ein bestimmtes Vielfaches der Abmessung der Atome des Kristallgitters. Dieses Vielfache hängt von der Gitterstruktur und der Anzahl der Atome in der Kante ab; außerdem kann es noch von weiteren dimensionslosen Größen abhängen, wie zum Beispiel den Massenverhältnissen der involvierten Teilchen.

Zweitens soll „physikalisch wohldefiniert“ heißen, daß man die entsprechenden Maßstäbe leicht und reproduzierbar präparieren kann.

Unter den atomaren Einheiten<sup>3</sup> versteht man als Längeneinheit den sog. Bohrschen Radius

$$a = \hbar^2 / m e^2, \quad (3)$$

als Zeiteinheit  $5/144\pi$  mal der Periodendauer der  $H_\alpha$ -Linie (Balmer-Serie; dieser Bruchteil entspricht

der reziproken Ionisierungsenergie des Wasserstoffatoms multipliziert mit  $\hbar = h/2\pi$ )

$$T = \hbar^3 / m e^4 \quad (4)$$

und als Masseneinheit die reduzierte Masse des Zweikörperproblems Proton-Elektron<sup>4</sup> (Wasserstoff)

$$m = m_e m_p / (m_e + m_p) \quad (5)$$

( $m_e$ : Elektronmasse,  $m_p$ : Protonmasse).

Außerdem setze ich noch voraus, daß alle Verhältnisse aller Teilchenmassen konstant bleiben (s.o.), weil ich das der Kürze halber nicht ausführen möchte. Dies ist aber sowohl vom empirischen als auch vom theoretischen Standpunkt (Trägheitsgesetz) auch auf erdgeschichtlichen Zeitskalen eine ziemlich zwingende Annahme (Quellenangaben zu beiden Standpunkten siehe JORDAN 1971, S. 6). Es ist also gleichgültig, welche vorkommende Masse man als Referenzmasse benutzt, und die Wahl der Masse aus (5) ist daher gerechtfertigt.

Weiter ist es eine harte empirische Feststellung, daß das Paulische Ausschließungsprinzip gilt, woraus folgt, daß insbesondere die Massen und Ladungen zweier Fermionen (Protonen, Neutronen, Elektronen usw.) derselben Sorte streng identisch sein müssen. Auch in großen Entfernungen im Weltall muß das Pauli-Prinzip gelten, da wir von dort Spektren laborbekannter Atome empfangen; Atome sind aber nur stabil, wenn das Pauli-Prinzip gilt. Es ist daher sinnvoll, von einer Teilchenmasse als der Masse einer Teilchensorte bzw. einer Elementarladung als der Ladung einer Teilchensorte als *eindeutige Funktionen*  $m(x,t)$ ,  $e(x,t)$  von Ort und Zeit zu sprechen, so daß die atomaren Einheiten überall und immer – zwar a priori variabel, aber – eindeutig definiert sind (MISNER et al. 1970, S. 398f, JORDAN 1971, S. 4).

Aus den bisherigen Überlegungen folgt, daß man alle Größen auf eindeutige Weise aus  $e$ ,  $m$  und  $\hbar$  aufbauen kann. Umgekehrt kann man diese Größen mit Hilfe der Gl. (3) und (4) durch unsere atomaren Einheiten ausdrücken:

$$e^2 = m a^3 / T^2, \quad \hbar = m a^2 / T, \quad m = m. \quad (6)$$

Aus den atomaren Einheiten lassen sich nun keine dimensionslosen Größen zusammensetzen. Den drei Konstanten  $e$ ,  $m$  und  $\hbar$  stehen drei Einheiten gegenüber;  $e$ ,  $m$  und  $\hbar$  lassen sich in unserem bisherigen Szenarium<sup>5</sup> mit nichts anderem in der Natur Vorkommenden außer sich selbst bzw. aus sich selbst aufgebauten, nicht mehr fundamentalen Systemgrößen vergleichen, mithin nicht messen. Beim Vergleich mit Systemgrößen Maße man nur das System. Die Messung des Bohrschen Radius  $a$  z.B. in Metern wäre nichts anderes eine Messung der Länge des Urmeters<sup>6</sup> in  $a$ , was uns nicht interessiert. Denn wir stellten bereits fest, daß die daraus resultierende Maßzahl nur von der Struktur des Festkörpers Urmeter und den Massenverhältnissen

der Teilchen abhängen kann; in Ermangelung anderer dimensionsloser fundamentaler Größen kann die Maßzahl von nichts anderem abhängen. Daher gibt sie keinen Aufschluß über irgendeine fundamentale Größe.

Eine Änderung von  $e$ ,  $m$  und  $\hbar$  läßt sich also unter der bisherigen Voraussetzung prinzipiell nicht messen. Könnte man nämlich die Änderung dieser Konstanten in Termini der atomaren Einheiten doch messen, so würde das eine Widerlegung von (6) und mithin der genannten Voraussetzungen bedeuten.

Zwar ist auch eine *gedachte*, simultane Variabilität aller obigen Größen in Termini fiktiver Einheiten *ohne Verletzung* von (6) „möglich“, aber eben „unphysikalisch“, weil prinzipiell unmeßbar und damit im physikalischen Sinne beliebig, ein Artefakt oder eine Definitionsfrage: man hat eine Art *Eichfreiheit*, die darin besteht, daß eine Änderung oder auch Umzeichnung obiger Größen in Termini fiktiver Einheiten nichts an der Eindeutigkeit der Prognosen bzw. Messungen von beobachtbaren Verhältnissen ändert, da (6) gilt.

Man kommt am Ende der ersten Etappe also zu dem Schluß, daß man aus den genannten Voraussetzungen noch keine fundamentale Konstante bekommen kann, von deren Variabilität oder Konstanz man physikalisch sinnvoll sprechen könnte – von den Teilchenmassenverhältnissen abgesehen.

In einer zweiten Etappe möchte ich nun den Magnetismus als zusätzliche Wechselwirkung hinzunehmen. Dies ist auch notwendig, denn beides, Elektrizität und Magnetismus, begründen erst eine Theorie des Lichtes (Elektrodynamik), die in der Lage ist, auch weiter voneinander entfernte Objekte in ihren Größen zu vergleichen. Sie zeichnet eine vom Inertialsystem unabhängige, physikalisch wohldefinierte Geschwindigkeit  $c$  (eine vierte Größe) aus, mit der man die Größe  $a/T$ , die die Dimension einer Geschwindigkeit hat, vergleicht und so genau eine dimensionslose Zahl

$$\alpha = a/cT = e^2/\hbar c = 1/137,0360 \dots \quad (7)$$

bilden kann. Diese Zahl, genannt „Feinstrukturkonstante“, kann man messen, was man letztlich ihrer Dimensionslosigkeit verdankt. Ihre Variabilität ist unter den genannten Voraussetzungen beobachtbar.

Die Feinstrukturkonstante ist erst diejenige physikalische Größe, die die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung charakterisiert. Denn die anderen, dimensionsbehafteten Größen lieferten bislang nur ein Einheitensystem – mithin kein Charakteristikum der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Die oben genannte Eichfreiheit bleibt ungeachtet dessen weiter bestehen und könnte etwa dazu genutzt werden, eine evtl. Variabilität von  $\alpha$  auf die Variabilität einer oder mehrerer anderer Größen zurückzuführen – oder besser gesagt: zu „schie-

ben“; denn es handelt sich dabei in jedem Fall um einen *willkürlichen Akt*. So wird übrigens in der Literatur oft und gern von der Änderung von  $e^2$  (unter stillschweigender Konstanz von  $\hbar$  und  $c$ ) gesprochen. Für die Autoren versteht es sich aber immer von selbst, daß sie eigentlich  $\alpha$  meinen (vgl. etwa den ersten Satz im Artikel von von BAHCALL & SCHMIDT 1967).

Man beendet die zweite Etappe also mit dem Ergebnis, daß alle physikalischen Phänomene außer der Gravitation, der starken und der schwachen Kräfte durch die Teilchenmassenverhältnisse und die Feinstrukturkonstante (Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung) charakterisiert sind.

Am naheliegenden Beispiel des Wasserstoffatoms möchte ich zeigen, wie es möglich ist,  $\alpha$  zu messen. Denn das ist instruktiv zum Verständnis der empirischen Schranke für  $\alpha$ , die man aus einem astronomischen Atomspektrum gewinnt.

Es ist bezeichnend, daß die Messung von  $\alpha$  auf die Beobachtung eines relativistischen bzw. magnetischen Phänomens hinausläuft.

So tritt im Spektrum des Wasserstoffs eine Aufspaltung der Spektrallinien (Feinstruktur) auf, die durch die Dirac-Theorie (relativistische Theorie für Teilchen mit Spin  $1/2$ ) in guter Übereinstimmung mit der Beobachtung vorausgesagt wird. Das Zweikörperproblem des Wasserstoffs ist in der Dirac-Theorie mit folgendem Ergebnis für die Energieniveaus noch geschlossen lösbar (vgl. ITZYKSON & ZUBER 1980):

$$E_{nj} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{n - \delta_j}\right)^2}} \quad (8)$$

wobei  $\delta_j = j + 1/2 - [(j + 1/2)^2 - \alpha^2]^{1/2}$ ;  $n = 1, 2, \dots$  ist die Hauptquantenzahl und  $j$  die Quantenzahl für den Gesamtdrehimpuls (Bahndrehimpuls und Spin:  $j = 1/2, 3/2, \dots, n - 1/2$ ). Eine Potenzreihenentwicklung in  $\alpha$ , deren Abbruch schon nach wenigen Termen wegen  $\alpha \ll 1$  eine gute Näherung darstellt, und anschließendes Einsetzen von (7) ergibt

$$E_{nj} = mc^2 - \frac{m(a/T)^2}{2n^2} - \frac{m(a/T)^4}{n^3(2j+1)c^2} + \frac{3m(a/T)^4}{8n^4c^2} + O((a/T)^6) \quad (9)$$

Der erste Term auf der rechten Seite der Gleichung ist eine für unsere Betrachtung irrelevante Ruheenergie. Irrelevant ist sie, weil man im Spektrum ohnehin nur die Energiedifferenzen  $\Delta E = E_{n',j'} - E_{n,j}$  zwischen den Niveaus beobachten kann – sie werden in Form von Lichtquanten mit der Frequenz  $\nu = \Delta E/\hbar$  beim Übergang zwischen den Zuständen mit den Quantenzahlen  $n, j$  und  $n', j'$  abgegeben (oder bei Absorptionsspektren aufgenommen) und bilden so das beobachtbare Spektrum.

Der zweite Term ist nichts anderes als das bekannte Ergebnis der nichtrelativistischen Quantentheorie, das von der Lichtgeschwindigkeit nicht abhängt und die Entartung<sup>7</sup> der Niveaus zeigt. Erst die relativistische Korrektur (die Terme ab dem dritten) bringt eine *lichtgeschwindigkeitsabhängige Aufspaltung der Niveaus* nach der Drehimpulsquantenzahl  $j$ , die man auch bei allen anderen

Atomen beobachtet und als Konsequenz der Spin-Bahn- und Spin-Spin-Wechselwirkung auffassen kann, die ja magnetisch ist. Diese relativistische Niveau-Aufspaltung, die wegen  $\alpha^2 \ll 1$  relativ geringfügig ist, nennt man „Feinstruktur“.

Zur Messung von  $\alpha$  kann erst diese Feinstruktur dienen, da erst sie den Vergleich von  $a/T$  mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  zuläßt. Das nichtrelativistische, entartete Spektrum (der zweite Term) allein liefert für  $\alpha$  keine Information, denn die entsprechenden Energiedifferenzen sind einfach nur rationale Zahlen der Gestalt  $1/2n^2 - 1/2n'^2$ , wenn man sie in der atomaren Energieeinheit  $m(a/T)^2$  mißt – und eine andere Einheit steht uns bislang nicht zur Verfügung. Erst die Energiedifferenzen der Feinstruktur, in derselben Einheit gemessen, sind von der Ordnung  $\alpha^2$ . Daher rührt auch der Name „Feinstrukturkonstante“ für  $\alpha$ .

Nach diesem Beispiel möchte ich auf eine Konsequenz der Eichfreiheit für den Umgang mit fundamentalen Konstanten zu sprechen kommen, und zwar auf eine Unterteilung der fundamentalen Konstanten in zwei Klassen (vgl. MELNIKOV 1993).

Die erste Klasse umfaßt Größen, die nichts als Umrechnungsfaktoren in verschiedene Einheitensysteme darstellen und damit der Eichfreiheit Rechnung tragen. In unserem Beispiel ordne ich drei dimensionsbehaftete von insgesamt vier Größen (z.B.  $\hbar, c, m$ ) dieser ersten Klasse zu  $e = (\hbar c \alpha)^{1/2}$  kann man jetzt als nicht-fundamental, also als von den anderen Größen abhängig betrachten – man kann natürlich auch eine andere Wahl treffen. Unabhängig von der konkreten Wahl darf man aber aus den Konstanten der ersten Klasse allein keine dimensionslosen Zahlen bilden können.)

Die zweite Klasse umfaßt diejenigen Größen, deren Wert im obigen Sinne wirklich gemessen werden kann und die daher notwendigerweise dimensionslos sein müssen. Bis jetzt gehören nur  $\alpha$  und alle Teilchenmassenverhältnisse dazu.

In der weiteren Entwicklung der Elementarteilchenphysik hat man außer der Gravitation und dem Elektromagnetismus weitere zwei fundamentale Wechselwirkungen entdeckt, die jede wie die elektromagnetische Wechselwirkung eine entsprechende Kopplungsstärke im Standardmodell der starken und elektroschwachen Wechselwirkung bekommen: die schwache  $G_F$ , die starke  $\alpha_s$ . Diese Kopplungsstärken des Standardmodells und der Gravitation,

$$\alpha, \beta, \alpha_s, \gamma$$

( $\beta = G_F m^2 c / \hbar^3$ ;  $\gamma = G m^2 / \hbar c$ ,  $G$ : Newtonsche Gravitationskonstante) und die Massenverhältnisse aller fundamentalen Konstituenten (Elementarteilchen, aus denen alle anderen Teilchen zusammengesetzt sind) gehören heute in jene zweite Klasse, und *nur die Konstanz bzw. Variabilität der Konstanten dieser Klasse läßt sich im Rahmen des Standardmodells sinnvoll empirisch testen*. Es handelt sich genau um jene achtzehn dimensionslosen Größen, die am Anfang dieses Abschnitts erwähnt wurden.

Der Vollständigkeit wegen sei erwähnt, daß  $G_F$  und  $G$  dimensionsbehaftet sind.<sup>8</sup> Daher bildet man gemäß einem Vorschlag von DYSON (1972) aus ihnen mit Hilfe der Konstanten aus der ersten Klasse die dimensionslosen Kombinationen  $\beta$  und  $\gamma$ , so wie ja auch  $\alpha$  aus  $e^2$  gebildet wurde. Das ist auf eindeutige Weise möglich. Die Zahlen  $\alpha, \beta$  und  $\gamma$  sind daher die Maßzahlen der Größen  $e^2, G_F$  und  $G$  für diejenigen Einheiten, die man als Größen aus den Konstanten aus der ersten Klasse bilden kann.

Wenn ich also im folgenden in laxer Weise davon sprechen werde, daß eine dimensionsbehaftete Größe konstant sei, so tue ich das übereinstimmend mit der allgemeinen Sprechweise in dem Sinne, daß sie konstant sei in den Einheiten der Konstanten der ersten Klasse ( $\hbar, c, m$ ). Die Längeneinheit dieses Einheitensystems ist

$$\lambda = \hbar / mc = \alpha a, \quad (10)$$

die Zeiteinheit

$$\tau = \hbar / mc^2 = \alpha^2 T, \quad (11)$$

die Masseneinheit wähle ich nach wie vor als  $m$ . Diese Sprechweise ist insofern gerechtfertigt, als wir in diesem Abschnitt gesehen haben, daß es wegen der Eichfreiheit keinen Sinn ergibt, von einer Variation der Konstanten aus der ersten Klasse zu sprechen. In dieser Sprechweise ist es dann z.B. gleichgültig, ob ich von der Konstanz von  $\alpha$  oder von  $e^2$  spreche usw. Erfahrungsgemäß geben Autoren, die eine andere, mögliche Wahl der Konstanten in der ersten Klasse vornehmen, diese Wahl explizit an.

Am Ende dieses Abschnitts möchte ich noch bemerken, daß nicht jede der erwähnten achtzehn dimensionslosen, fundamentalen Konstanten eine der vier o.g. Kopplungsstärken oder ein Massenverhältnis ist. Vier der achtzehn Parameter beschreiben, in welchem Maße die schwache Wechselwirkung Übergänge zwischen verschiedenen Quark-Familien ermöglicht.<sup>9</sup> Weder für diese Parameter noch für die Massen der schwereren Quark-Familien habe ich empirische Schranken im Sinne dieses Aufsatzes in der Literatur gefunden. Es muß aber betont werden, daß sie weder für die radiometrischen Datierungsmethoden noch für die beobachtende Kosmologie eine Rolle spielen, da die stabile Materie nur aus Quarks der leichtesten Quark-Familie aufgebaut ist. Erst für die Teilchenphysik bei sehr hohen Teilchenenergien, wie sie für die Beschreibung der Prozesse in den Teilchenbeschleunigern oder zu frühen Zeitpunkten in den Urknallkosmologien herangezogen werden muß, werden jene vier Parameter relevant.

## Empirische Schranken

Ich möchte jetzt am Beispiel von konkreten empirischen Schranken für  $\alpha$  und zweier Argumente für die Konstanz von  $\alpha_s$  zeigen, in welchem Sinn und

Ausmaß und mit welcher Stringenz man heutzutage von der Konstanz der fundamentalen Naturkonstanten auf erdgeschichtlichen Zeitskalen sprechen kann. Von diesen historisch wichtigen Ergebnissen führt eine argumentative Leiter zu sukzessiven Verbesserungen der Schranken für relevante Konstanten der zweiten Klasse mit Hilfe ganz unterschiedlicher Methoden. Darauf will ich nicht eingehen. Auch für die Betrachtung der heute etablierten Schranke für  $\beta$  möchte ich auf die Literatur verweisen (einige Hinweise findet man bei MELNIKOV 1993).

---

**Wenn man so will, hat man  
eine Lichtgeschwindigkeitsmessung  
im Objekt mit den atomaren  
Einheiten dieses Objektes gemacht.**

---

Das klassische Argument für eine enge empirische Schranke für die Änderung von  $\alpha$  liefern Feinstrukturspektren weit entfernter astronomischer Objekte. Deren Licht war lange unterwegs, so daß wir bei ihrer Beobachtung weit in die Vergangenheit des Universums zurückblicken. Eine besonders strenge<sup>10</sup> Überprüfung der Konstanz von  $\alpha$  präsentierten BAHCALL & SCHMIDT (1967) durch Betrachtung eines Feinstrukturlinienpaares von OIII-Emissionsspektren von fünf verschiedenen Radiogalaxien bei einer Rotverschiebung von etwa  $\Delta\lambda/\lambda \approx 0,2$  (entspricht nach dem damaligen Literaturwert der Hubble-Konstanten etwa einem Abstand von  $2 \times 10^9$  Lichtjahren). Sie fanden eine relative Variation von

$$\frac{\alpha_{\text{Objekt}}}{\alpha_{\text{Labor}}} = 1,001 \pm 0,002. \quad (12)$$

Das Bezeichnende an der Bestimmung von  $\alpha_{\text{Objekt}}$  ist, daß es den Abstandsverhältnissen der Spektrallinien der Spektren der weit entfernten Objekte *absolut* entnommen werden kann, d.h. z.B. unbeeinflusst von der Rotverschiebung. Man hat also die dimensionslose Zahl  $\alpha_{\text{Objekt}}$  am Objekt gemessen, ohne irgendwelche Labormaßstäbe zu benutzen. *Wenn man so will, hat man eine Lichtgeschwindigkeitsmessung im Objekt mit den atomaren Einheiten dieses Objektes gemacht*, da gemäß (7) die Feinstrukturkonstante nichts anderes als das Verhältnis der „atomaren Geschwindigkeit“  $a/T$  zur Lichtgeschwindigkeit  $c$  ist.

Somit hat man ferner eine Konstanz der Lichtgeschwindigkeit  $c$  in atomaren Einheiten (3) und (4) für den gesamten kosmologischen Rückwärtslichtkegel vom heutigen Beobachter bis zum Objekt etabliert.<sup>11</sup>

Die Schranke (12) bezieht sich, wie eingangs gefordert, nicht auf eine Zeiteinheit, sondern auf eine ganz bestimmte Geschichte, nämlich einen Zeitraum, der dadurch gegeben ist, daß das Licht des beobachteten Spektrums größenordnungs-

mäßig  $10^{22}$  km zurückgelegt hat. Aus der aus der Schranke resultierenden Konstanz der Lichtgeschwindigkeit während dieser Geschichte, gemessen in atomaren Einheiten, ergibt sich eine Laufzeit des Lichts von  $2 \times 10^9$  a und daraus auch eine Schranke für die relative zeitliche Änderung von  $\alpha$  von

$$\left| \frac{\dot{\alpha}}{\alpha} \right| < 1/10^{12} \text{ a} \quad (13)$$

(a: Jahr), d.h. ein Milliardstel Promille pro Jahr. Anders formuliert bedeutet das, jetzt in laxer Rede-weise, eine entsprechende Konstanz der atomaren Einheiten, s. (10) und (11).

An dieser Stelle möchte ich dem Einwand begegnen, man könne doch keine Größe an einem so entfernten Objekt messen, vielmehr habe man nur die Feinstruktur eines Spektrums vermessen, das man hier und jetzt beobachtet hat – also müsse man sauber zwischen  $\alpha_{\text{Objekt}}$  und  $\alpha_{\text{Messung}}$  unterscheiden.

Prinzipiell ist dieser Einwand richtig. Wenn es aber einen sinnvollen Unterschied zwischen  $\alpha_{\text{Objekt}}$  und  $\alpha_{\text{Messung}}$  geben sollte, dann müßte dieser Unterschied dadurch zustande kommen, daß das Spektrum auf dem Wege zum Beobachter verzerrt wurde oder aber erst auf dem Weg zum Beobachter in dieser Form entstand. Im ersteren Fall müßte es aber notwendigerweise eine aus physikalischen Effekten kommende Verzerrungsvorschrift von Spektren geben, die im Endeffekt Spektren entstehen läßt, die bis auf eine Rotverschiebung wie die Spektren aussehen, die mich auf sehr kurzem Wege (Labor) erreichen.

Lassen wir nun einmal die Möglichkeit zu, Spektren zu empfangen, die auf einen anderen Wert für  $\alpha$  führen würden. Wenn es aber überhaupt einen Sinn haben soll, von einer „Feinstrukturkonstanten“ im Meßobjekt und im Spektrum zu reden, so ist die Verzerrungsvorschrift dadurch eingeschränkt, daß sie während des ganzen Weges vom Meßobjekt bis zum Beobachter die Feinstruktur erhalten, aber das Ausmaß derselben ändern soll. Diese Verzerrung müßte für jedes Spektrum bei jeder Rotverschiebung simultan bewirkt werden. Es müßten also Frequenzverhältnisse unabhängig von der Frequenz, aber abhängig von der Linie und ihrer Zugehörigkeit zu einem Spektrum variieren. Das aber ist unmöglich, wenn das verzerrende Medium, mag es so „böswillig genial“ sein, wie es will, nichts über die Zugehörigkeit eines Photons zu einer Spektrallinie und deren Zugehörigkeit zu einer Lichtquelle „weiß“. Ein Lichtquant ist aber allein durch seine Richtung, Wellenlänge und seine Polarisierung festgelegt und wechselwirkt nicht mit anderen Photonen. Daher kann es keine Information der benötigten Art tragen, denn das ginge über seine aufgezählten Eigenschaften hinaus.

Eine Verzerrung über die Rotverschiebung hinaus kann also nur frequenz-, polarisations- und rich-

tungsabhängig geschehen. Dabei könnte aber  $\alpha_{\text{Objekt}}$  solange rekonstruiert werden, wie man das Spektrum überhaupt als Spektrum eines Atoms identifizieren könnte. Eine Unterscheidung von  $\alpha_{\text{Messung}}$  ist daher sinnlos. Abgesehen davon wird eine solche Verzerrung nicht beobachtet.

Die nächste Schranke, die ich nennen möchte, stammt von DYSON (1967, 1972) und basiert auf irdischem Vorkommen von  $\text{Re}^{187}$ , das durch einen  $\beta$ -Zerfall in  $\text{Os}^{187}$  zerfällt. DYSONS Argumentation liefert eine um drei Zehnerpotenzen engere Schranke

$$\left| \frac{\dot{\alpha}}{\alpha} \right| < 5/10^{15} \text{ a} \quad (14)$$

diese beruht aber, wie er selbst zugibt, erstens auf der absoluten Konstanz von  $\alpha$ , und zweitens auf der Annahme eines Mindestalters der Erde von einer bis drei Milliarden Jahren.

Trotzdem handelt es sich argumentativ um einen sehr wichtigen Beitrag: Er zeigt die starke Verzahnung der Konstanz von  $\alpha$  mit der Konstanz der Kopplungsstärke  $\alpha_s$  der starken Wechselwirkung auf, die sich aus der Kernphysik ergibt: Würde sich das Verhältnis dieser beiden Konstanten auch nur geringfügig geändert haben, so wäre wegen der sich daraus ergebenden starken Verkürzung der Halbwertszeit mit dem irdischen Vorkommen einer der beiden genannten Isotope nicht zu rechnen. Der wesentliche Punkt ist, daß die geringe Energiedifferenz zwischen den beiden Isotopen (2,6 keV) gleichzeitig eine Differenz zwischen zwei großen Energien ist, nämlich zwischen der Isotopendifferenz der anziehenden Kernkraft und der der Coulomb-Abstoßung, wobei nur die letztere von  $e^2$  abhängt. Daher kann die Energiedifferenz nur klein bleiben für einen schmalen Wertebereich für  $e^2$  bzw.  $\alpha$ . Die Zerfallsrate verhält sich aber wenigstens wie die Energiedifferenz, potenziert mit 2,835. Eine andere Überlegung mit einem betragsmäßig ähnlichen Ergebnis gilt für den Fall, daß die Energiedifferenz negativ werden sollte. (Dann zerfällt  $\text{Os}^{187}$  durch Elektroneneinfang in  $\text{Re}^{187}$ .) Aus der Änderung der Coulomb-Energiedifferenz zwischen den beiden Isotopen mit  $\alpha$ , der derzeitigen Halbwertszeit von  $\text{Re}^{187}$  ( $4 \times 10^{10} \text{ a}$ ) und dem Mindestalter der Erde schließt man auf die Schranke (14).

Auch wenn man die beiden im Rahmen dieses Aufsatzes unerwünschten Voraussetzungen fallen läßt, lohnt sich die Betrachtung dieser Art von langlebigen  $\beta$ -Zerfällen. Verkürzt man das Mindestalter der Erde von  $10^9 \text{ a}$  auf  $10^4 \text{ a}$ , so würde  $\text{Re}^{187}$  immerhin auch dann nicht überlebt haben, wenn  $\alpha$  vor  $10^4 \text{ a}$  einen um etwa 10% kleineren Wert gehabt hätte. Drastische Änderungen läßt dieser Befund also auch in einem Kurzzeitmodell nicht zu.

Läßt man nun noch Variationen von  $\alpha$ , zu, so würde DYSONS Argument genau dann fehlschlagen, wenn beide Kopplungskonstanten präzise in der

Weise variiert hätten, daß „the delicate balance“ (wie DYSON sagt) zwischen den beiden Isotopenenergien bewahrt worden wäre. Das scheint aber mehr als unwahrscheinlich zu sein, da die Kernbindungsenergie eine stark nichtlineare Funktion von  $\alpha_s$  ist, wohingegen die Coulomb-Energie in dem in Frage kommenden schmalen Wertebereich für  $\alpha$  nahezu linear mit  $\alpha$  geht. Bedenkt man nun, daß es noch andere  $\beta$ -aktive Kerne gibt, die eine starke Variation von  $\alpha$  ebenfalls nicht überlebt hätten (z.B.  $\text{V}^{50}$ ,  $\text{Rb}^{87}$ ,  $\text{Te}^{123}$ ,  $\text{La}^{138}$  und  $\text{Lu}^{176}$ ), so scheint es nahezu unmöglich zu sein, daß eine solche Balance in all diesen Fällen gleichzeitig erhalten werden kann.

Nimmt man die Schranke (13) auch für die Vergangenheit auf der Erde ernst (und nicht nur auf dem kosmologischen Rückwärtslichtkegel), so folgt aus DYSONS Betrachtung andererseits also eine Schranke für  $\alpha_s$ . Diese wäre in einem Kurzzeitmodell zwar nicht so eng wie (13), aber für eine drastische Variation bleibt hier wiederum kein Platz.

Außerdem sei darauf hingewiesen, daß man aus der Beobachtung von radioaktiven Strahlungshöfen im Gestein weiß, daß die Reichweiten von Alphastrahlern – lax gesprochen – geologisch konstant sind (JORDAN 1971, S. 6f). Daraus folgt, daß das Verhältnis von Kernenergien und Ionisierungsenergien und mithin zwischen  $\alpha_s$  und  $\alpha$  während der Erdgeschichte konstant gewesen ist. Aus der absoluten Konstanz beider Kopplungsstärken schließt man dann auf die Konstanz der Halbwertszeiten und der Zerfallsreihen überhaupt.

Für weitergehende Literatur wird auf MELNIKOV (1993) und die Quellenangaben bei JORDAN, DYSON, BAHCALL & SCHMIDT und TROITSKII (1987), Tabelle I, verwiesen. Bei MELNIKOV findet man auch den aktuellen Stand der Forschungsergebnisse und Schranken in diesem Bereich.

Abgesehen von der heutigen Renaissance der Diskussion um die Konstantenvariabilität während des „frühen Universums“, die keinen empirischen, sondern spekulativen Charakter hat<sup>12</sup>, lautet der allgemein akzeptierte Schluß, daß die einzige Konstante, die während der Erdgeschichte eine nennenswerte Änderung erfahren haben kann, die Gravitationskonstante (bzw. genauer:  $\gamma$ ) ist. Alle anderen berühmten Spekulationen von GAMOW, TELLER, LANDAU, DEWITT usw. (vgl. MELNIKOV 1993), sind bereits ausgeschlossen worden.

## Diskussion zweier anderslautender Standpunkte

Inspiziert von G. GAMOW (1967), auf den sich übrigens alle o.g. Autoren beziehen und der seinen Vorschlag zur Variabilität von  $e^2$  (bzw.  $\alpha$ ) längst wieder zurückgezogen hat, hat nun V.S. TROITSKII (1987) vorgeschlagen, man könne  $e$ ,  $\hbar$ ,  $m$ ,  $c$ , die „Ladungen“

der schwachen und starken Wechselwirkung und die Gravitationskonstante als simultan variabel ansehen dergestalt, daß die dimensionslosen Kopplungsstärken  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\alpha_s$ ,  $\gamma$  stets konstant geblieben sind (um den z.T. oben zitierten Veröffentlichungen Rechnung zu tragen). Er betrachtet ein kosmologisches Modell mit veränderlicher Lichtgeschwindigkeit und einer zur Standardkosmologie konformen Metrik, in der u.U. die Größe des Universums konstant geblieben ist, und interpretiert Beobachtungen wie z.B. die Hubble-Beziehung (Rotverschiebung versus Abstand) in diesem Modell, um eine empirische Evidenz zu erhalten.

Nach obigem ist zu diesem Vorschlag folgendes zu sagen: Da TROITSKII die Konstanz der dimensionslosen Kopplungsstärken, also der einzigen „Konstanten“, deren Veränderlichkeit man maßstabsunabhängig messen kann, aus den bekannten Gründen akzeptiert, ist seine Sichtweise möglich. Sie entspricht einer bestimmten Wahl im Sinne der genannten Eichfreiheit, enthält aber keine neue Physik. Der Vergleich mit Beobachtungen ist daher gegenstandslos, da eine Eichung nicht falsifizierbar ist.

Seine Arbeit ist aber keinesfalls so gemeint. In der Rechtfertigung seiner Metrik benutzt er eine andere Definition der Eigenzeit (oder inhärenten Zeit) als in der Allgemeinen Relativitätstheorie. Er stellt die Behauptung auf, daß diesem anderen Zeitmaßstab eine physikalische Entität zugrundeliegt. Die Existenz einer solchen Entität habe ich allerdings im Abschnitt über die Eichfreiheit bestritten. Aus den Ausführungen TROITSKII (1987, 390) geht hervor, daß er hierfür ein materielles Medium als Äther für die Lichtausbreitung in Betracht zieht. Leider wird nicht gesagt, wie dieses Medium beobachtet werden kann, um eine physikalische Definition eines zusätzlichen Maßstabes abzugeben und jene Eichfreiheit zu reduzieren oder aufzuheben. Daher ist seine Abgrenzung gegen die Standarddefinition der Eigenzeit und der Versuch, sein Modell empirisch abzusichern, zumindest irreführend.

Der Sachverhalt liegt bei B. SETTERFIELD (1983) sehr ähnlich. Er geht von einem jungen Universum mit abnehmender Lichtgeschwindigkeit und zunehmenden radioaktiven Halbwertszeiten aus. Sein Modell läßt sich unter Ausnutzung der Eichfreiheit durch eine zeitabhängige Umskalierung der Zeit aus dem Standardmodell gewinnen. Allerdings streitet er die physikalische Äquivalenz zum Standardmodell ab, indem er behauptet, daß eine Abnahme der Lichtgeschwindigkeit im Verlauf der letzten Jahrhunderte mit herkömmlichen Maßstäben und Uhren tatsächlich gemessen wurde.<sup>13</sup>

Am Beispiel einer mechanischen Uhr, die aus einem zwischen zwei ideal reflektierenden in konstantem Abstand befindlichen Wänden oszillierenden Teilchen T besteht, kann man sich klarmachen, daß unter den theoretischen Voraussetzungen SET-

TERFIELDS eine Abnahme der Lichtgeschwindigkeit nicht hätte gemessen werden können, da die Gruppengeschwindigkeit des Wellenpakets

$$\frac{d\omega}{dk} = \frac{ck}{\sqrt{k^2 + \left(\frac{m_T c}{\hbar}\right)^2}} \quad (15)$$

( $\omega$ : Kreisfrequenz,  $k$ : Wellenzahl,  $m_T$ : Masse des Teilchens), mithin die Geschwindigkeit des Schwerpunktes des Teilchens und damit der Gang der makroskopischen Uhr proportional zu  $c$  abnimmt<sup>14</sup>, genau wie ja auch der Gang der radio-metrischen Uhren in SETTERFIELDS Bild.

Für jede mechanische, makroskopische Uhr läßt sich im Prinzip ein entsprechendes Argument finden. Tatsächlich war der Gang der Uhren der damaligen Zeit durch eine derartige mechanische, makroskopische Uhr geeicht, nämlich durch die Erddrehung: Eine Sekunde war definiert als der 86.400te Teil eines durchschnittlichen Sonnentages. Es muß darauf hingewiesen werden, daß die Gravitationswechselwirkung der Erde mit anderen Himmelskörpern die Rotationsgeschwindigkeit quantitativ nicht nennenswert beeinflusst. Die Erdrotation ist also keine „Gravitationsuhr“.

In einer Tabelle der physikalischen Konstanten mit ihrer angenommenen Variabilität im Vergleich mit der Variabilität von  $c$  (Tab. 10 auf S. 39 a.a.O., 1983; auch in der Revision 1987!) gibt SETTERFIELD gemäß der bekannten Quellen selber zu, daß die Feinstrukturkonstante  $\alpha$  eine echte Konstante sei. Damit bleibt die Abnahme der mit physikalischen Maßstäben und Uhren gemessenen Lichtgeschwindigkeit auch bei SETTERFIELD eine Unmöglichkeit, da (wie schon erwähnt) die Feinstrukturkonstante nichts anderes als das Verhältnis der „atomaren Geschwindigkeit“  $a/T$  zur Lichtgeschwindigkeit  $c$  ist und sich diese mithin nicht gegenüber makroskopischen Maßstäben und Uhren ändert.

## Bewertung und Ausblick

Die angegebenen Schranken sind in dem Sinne empirisch, daß die zugrundeliegenden Beobachtungsdaten im Rahmen der etablierten Vorstellung vom Aufbau der Materie nicht anders gedeutet werden können.

Natürlich kann man diesen Rahmen, etwa am Beispiel von BAHCALL & SCHMIDT, in Frage stellen. Dabei darf man aber folgende Fakten nicht vergessen: Bei der Annahme der Gültigkeit der genannten Theorien für die beobachteten Radiogalaxien handelt es sich nicht einfach um eine unerlaubte Extrapolation von Laborphysik in unerreichbare Entfernungen hinein. Die beobachteten Spektren sind schon für sich allein genommen ein hinreichendes empirisches Zeugnis dafür, daß die moderne Physik eine exzellente Theorie für jene astronomischen Objek-

te ist. Man sollte sich klarmachen, daß etwa die Quantenmechanik in ihrer noch heute gültigen Form zu einer Zeit entwickelt wurde, als Atome ähnlich unerreichbar wie derart weit entfernte Beobachtungsobjekte waren und als man kaum mehr empirische Daten, die für die Quantentheorie relevant waren, von ihnen hatte, als heute von den Sternen: nämlich deren Spektren! Wir haben also darüber hinaus einen ausgezeichneten empirischen Test für die Gültigkeit der modernen Physik für heute beobachtbare astronomische Objekte. Wollte man diesem Test nicht trauen, so müßte man konsequenterweise den Labortests und mithin den Grundlagen der modernen Physik in gleichem Maße – und damit sämtlichen Ergebnissen der darauf aufbauenden Fakultäten – mißtrauen.

---

**Bei der Annahme der Gültigkeit der  
genannten Theorien für die  
beobachteten Radiogalaxien  
handelt es sich nicht einfach um eine  
unerlaubte Extrapolation von  
Laborphysik in unerreichbare  
Entfernungen hinein.**

---

Außerdem wurde schon in der Einleitung ausgeführt, daß solche empirischen Schranken insofern vom theoretischen Rahmen unabhängig sind, als sie in einer verbesserten bzw. allgemeineren Theorie (etwa einer „großen Vereinigung aller Wechselwirkungen“) ein Pendant hätten.

Daher ist mit einer Änderung der Situation nicht zu rechnen. Die sehr geringfügigen empirisch verträglichen Variationen der fundamentalen Naturkonstanten eignen sich in keiner Weise, um das naturwissenschaftlich etablierte Weltalter mit der biblischen Überlieferung zu harmonisieren, und im Blick auf immer weitere Verfeinerungen der Schranken werden sie das in Zukunft noch weniger tun.

Es müssen andere Wege gefunden werden.

## Anmerkungen

<sup>1</sup> Eine Variabilität der fundamentalen Konstanten bedeutet eine Modifikation der genannten Theorien.

<sup>2</sup> So liefert etwa die Vorstellung von der Zusammensetzung des elektromagnetischen Strahlungsfeldes aus Photonen (Lichtquanten) den Bezug des Wienschen Verschiebungsgesetzes zur Planck-Konstanten  $h$ .

<sup>3</sup> Hier ist durchweg die elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0 = 1/4\pi$  gewählt; das ist in diesem Zugang am durchsichtigsten und entspricht übrigens der Wahl vieler Lehrbücher über Elektrodynamik. Im Gegensatz zu dieser Wahl ist die Konstante  $\epsilon$  ebenso wie die Ladungseinheit (die Ampèrese-

kunde As) und auch die magnetische Feldkonstante  $\mu_0$  international über den „Umweg“ der magnetischen Anziehung von stromdurchflossenen Leitern definiert und so implizit von der Lichtgeschwindigkeit abhängig. Daß das Verhältnis  $A^2 s^2 / \epsilon_0$  nicht mehr von der Lichtgeschwindigkeit abhängt, ist auf Anhieb nicht zu sehen. Hier ist es daher viel sinnvoller, die Definition der Ladung als Vielfaches der real in der Natur vorkommenden Elementarladung  $e$  vorzunehmen, so daß die Verwendung der elektrischen Feldkonstanten vollkommen überflüssig ist und auf obige Wahl hinausläuft. Außerdem führt die internationale Definition eine zusätzliche Einheit ( $\epsilon_0$  ist dort dimensionsbehaftet) und damit eine – wie wir sehen werden – unnötige weitere Eichfreiheit ein.

<sup>4</sup> Ich verwende hier die reduzierte Masse, damit die Gl. (3) und (4) exakt stimmen.

<sup>5</sup> Abgesehen von den anderen Teilchenmassen; aber ich setze ja ausdrücklich voraus, daß alle Massenverhältnisse ohnehin konstant sind.

<sup>6</sup> Nach früherer Definition – die heutige scheidet in diesem Stadium unserer Diskussion wegen Einbeziehung der Lichtgeschwindigkeit aus.

<sup>7</sup> Nicht-Aufspaltung der Niveaus nach der Drehimpulsquantenzahl  $j$ .

<sup>8</sup> Um genau zu sein, handelt es sich bei der elektroschwachen Wechselwirkung des Standardmodells um eine vereinigte Theorie der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung, die zwei fundamentale, dimensionslose Kopplungsstärken  $\alpha_{SU(2)}$  und  $\alpha_{U(1)}$  nach dem Muster der Elektrodynamik und der starken Wechselwirkung („Chromodynamik“) hat. Die gruppentheoretischen Bezeichnungen  $SU(2)$  und  $U(1)$  entsprechen bestimmten, die elektroschwache Wechselwirkung definierenden Symmetrien, die aber zum Teil „versteckt“ sind. Die Konsequenz ist, daß die Konstanten  $\alpha_{SU(2)}$  und  $\alpha_{U(1)}$  nicht unmittelbar experimentell zugänglich sind. An deren Stelle nimmt man die experimentell zugänglichen Konstanten  $\alpha$  und  $G_F$ , die theoretisch Funktionen von  $\alpha_{SU(2)}$ ,  $\alpha_{U(1)}$  und bestimmten Teilchenmassen sind. Diese Teilchenmassen sind für die Dimensionsbehaftetheit von  $G_F$  verantwortlich. Die Dimensionsbehaftetheit von  $G$  ist dagegen grundsätzlicher Art.

<sup>9</sup> Ein solcher Übergang ist z.B. der Zerfall eines sog. „seltsamen“ Teilchens in ein Teilchen, das nur aus Quarks derjenigen Familie aufgebaut ist, aus denen auch Protonen und Neutronen bestehen.

<sup>10</sup> „Besonders streng“ nannten die Autoren ihre Überprüfung wegen der bei Radiogalaxien möglichen hohen Genauigkeit der Wellenlängenmessung einerseits und der Klarheit über die Ursache ihrer Rotverschiebung andererseits (dieselbe Ursache wie bei anderen Galaxien) im Gegensatz zu in diesem Zusammenhang bis dahin betrachteten quasistellaren Radioquellen.

<sup>11</sup> Die Konstanz von  $\alpha$  für die Zeit dazwischen ergibt sich aus der Betrachtung von Spektren von Objekten, die nicht so weit entfernt sind.

<sup>12</sup> da sie erst für Teilchenenergien bzw. Temperaturen gelten, die für das hier betrachtete Problem keine Rolle spielen.

<sup>13</sup> Die statistische Signifikanz dieser Feststellung ist zumindest fraglich.

<sup>14</sup> Die Compton-Wellenlänge  $h/m_{TC}$  ist bei SETTERFIELD wie überhaupt jede Länge zeitlich konstant, so daß auch für nichtrelativistische Geschwindigkeiten  $v \ll c$  bzw. kleine  $k$  die Proportionalität zu  $c$  gilt.

**Dank:** Prof. Dr. Peter C. HÄGELE, Dr. Frank MERTINS, Peter SCHULLER und Matthias STEHLE danke ich für wertvolle Hinweise.

## Literatur

- BAHCALL JN, SCHMIDT M (1967) Does the fine-structure constant vary with cosmic time? *Phys. Rev. Lett.* 19, 1294f.  
 DYSON FJ (1967) Time variation of the charge of the proton. *Phys. Rev. Lett.* 19, 1291-1293.  
 DYSON FJ (1972) *Aspects of Quantum Theory*. Cambridge U.P.  
 GAMOW G (1967) Electricity, gravity, and cosmology. *Phys. Rev. Lett.* 19, 759.

- ITZYKSON C, ZUBER J-B (1980) *Quantum Field Theory*. McGraw-Hill, New York.  
 JORDAN P (1971) *The Expanding Earth*, International Series of Monographs in Natural Philosophy 37, Chapter 1. Pergamon Press.  
 MELNIKOVA VN (1993) *Fundamental Physical Constants and Their Stability*. Preprint #CBPF-NF-047/93, ISSN 0029-3865, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro.  
 MISNER CW, THORNE KS, WHEELER JA (1970) *Gravitation*. Freeman and Company, San Francisco.  
 SETTERFIELD B (1983, revidiert 1987) *The Velocity of Light and the Age of the Universe*. Creation Science Association (Inc.), Adelaide.  
 TROITSKII VS (1987) Physical constants and the evolution of the universe. *Astroph. Sp. Sci.* 139, 389-411.

# KURZBEITRÄGE

## WELTRAUMTELEGRAMM

Abb. 1: Der Quasar PKS 2349 (Pfeil), vom Hubble-Space-Telescope aufgenommen. (ESO) Es handelt sich um den kleinen Punkt oberhalb des großen Flecks unterhalb der Bildmitte.

von Norbert Pailer

### Quasare geben neue Rätsel auf Energiesenken am Rande der Welt

Eigentlich hat man noch nie so richtig gewußt, mit welchen Objekten man es bei den Quasaren zu tun

hat. Seit ihrer Entdeckung im Jahre 1960 haben sie die Astronomen genarrt. Ein Hauptarbeitsgebiet der optischen Astronomie war damals, im Optischen sichtbare Objekte auszumachen, die zu den radioastronomischen Signalen gehören. Damit sollte die wahre Natur der Radioemission aufgedeckt werden. Mit dieser Aufgabe schlugen sich nun die Astronomen noch 35 Jahre später herum.

**Hubble-Beobachtungen.** Glücklicherweise haben sie heute ein Instrumentarium zur Hand, das ihnen ungeahnte Möglichkeiten eröffnen sollte. So setzt man große Hoffnungen auf das durch die Reparatur im Weltraum auf Höchstleistungen getrimmte Hubble Space Telescope. Auf der Jahrestagung der Amerikanischen Astronomischen Gesellschaft in Tucson hat John BAHCALL vom Institute of Advanced Study in Princeton über erste Beobachtungen an den 14 hellsten – und daher vermutlich relativ nahen – Quasaren berichtet. Diese Messungen scheinen die bisherigen Modellvorstellungen der Quasare, von deren Aufbau und Energieerzeugung auf den Kopf zu stellen. Dies dürfte eine neue Diskussion über diese rätselhaften Objekte auslösen. Abb. 1 zeigt ein vom Hubble-Space Telescope aufgenommenes Objekt vom Rande der Welt: den Quasar PKS 2349.

Die gewaltigen Energiesenken von Quasaren haben die Astrophysiker von Anfang an verwirrt. In den Anfängen waren es australische und englische Radioastronomen, die mit den damals noch recht bescheidenen Radioantennen auffällige Strahlungsquellen gefunden haben. Das Erstaunliche daran war, daß am vertrauten Sternenhimmel keine optischen Gegenstücke auszumachen waren. Erst mit dem 5m-Spiegel der Mount-Palomar-Sternwarte fand man winzige, sternähnliche Licht-

