Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *78/79(2005), 259–276*

J. Michael Köhler

Masse und Energie im Universum – Diskussion eines alternativen Ansatzes

1. Einleitung

Die moderne Kosmologie basiert auf drei fundamentalen Erkenntnissen, die 1905 durch Albert Einstein veröffentlicht wurden: dem Quantencharakter des Lichtes (Einstein 1905a), der speziellen Relativitätstheorie (Einstein 1905b) und der Äquivalenz von Masse und Energie (Einstein 1905c). Die bahnbrechenden Arbeiten erschlossen eine neue Sichtweise auf das Verständnis der Natur. Ihre praktische Umsetzung führte zu neuen Instrumenten, mit deren Hilfe Beobachtungen möglich wurden, die diese Sichtweise bestätigten und weitergehende Beobachtungen ermöglichten, die zu neuen Denkansätzen und Fragestellungen führen (vgl. dazu Hörz 2003).

In Übereinstimmung mit der Theorie können viele Phänomenen, die im Kosmos beobachtet werden, mit Gesetzen erklärt werden, die durch Experimente auf der Erde bestätigt worden sind. In den letzten Jahrzehnten ist durch die Erweiterung des spektralen Fensters der astronomischen Beobachtung eine Vielzahl neuer Objekte und Prozesse im Universum entdeckt und näher charakterisiert worden. Das von den meisten Forschern favorisierte Standardmodell geht dabei u.a. von folgenden Prämissen aus:
die Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit
die Konstanz des Planckschen Wirkungsquantums
der Masse/Energieerhaltungssatz (erster Hauptsatz der Thermodynamik)
die Konstanz der Ruhemassen der Elementarteilchen
die Konstanz der Elementarladung
die Konstanz der elektrischen Feldkonstante
der zweite Hauptsatz der Thermodynamik (Zunahme der Entropie in abgeschlossenen Systemen)
die Erklärung der kosmischen Rotverschiebung durch den Dopplereffekt.

Daraus leiten sich wichtige Schlußfolgerungen für das Weltall als Ganzes ab:

- Die Gesamtenergie (einschließlich der Äquivalentenergien aller Massen) des Universums ist konstant.
- Die Gesamtmasse des Universums ist soweit konstant, wie nicht Masse und Energie entsprechend der Einsteinschen Beziehung $E=mc^2$ ineinander umgewandelt werden.
- Das Universum hat sich seit seiner Entstehung ausgedehnt.
- Das Universum hat ein endliches Alter.
- Der Anfang des Universums lag in einem Raumpunkt.
- Durch die Expansion des Universums hat sich die Massen/Energie-Dichte annährend mit der dritten Potenz der Zeit vermindert.
- Durch die Expansion hat sich das Universum von anfänglich sehr hohen Temperaturen (im Mittel) fortwährend abgekühlt.
- In seiner ersten Phase muß das Universum extrem dicht und extrem heiß gewesen sein.
- In der Anfangsphase waren massebehaftete Elementarteilchen und Photonen nicht unterscheidbar.
- Eine Serie von Symmetriebrüchen hat zur Entstehung des Spektrums an Elementarteilchen und zu dem heute beobachteten, hochgradig strukturierten Universum geführt.

Zu Anfang des 20. Jahrhunderts herrschte die Vorstellung weitgehend konstanter Verhältnisse im Universum vor. Das Weltall wurde zunächst als dynamischer Fließgleichgewichtszustand angesehen („steady-state-Modell”). Dieses Modell geriet jedoch durch die Beobachtung der mit der Entfernung kosmischer Objekte zunehmenden Rotverschiebung und dem Nachweis der kosmischen Hintergrundstrahlung in Zweifel. Als Konsequenz wurde auf ein fortwährend expandierendes Universum geschlossen. Die postulierte Gleichmäßigkeit der Expansion wird jedoch durch neuere Messungen an Supernovae aus Galaxien mit hohen z-Werten in Frage gestellt, die sich im Rahmen des Standardmodells nur durch die Annahme einer Beschleunigung der Expansion erklären läßt (Riess et al. 1998).

2. Ausgangssituation

2.1. Das Problem der Anfangssingularität („Urknall”) im kosmologischen Standardmodell

Nach dem Standardmodell waren im Gegensatz zur heutigen Situation in der Initialphase des Universums die bekannten und immer wieder bestätigt gefundenen Naturgesetze (wie etwa der Energieerhaltungssatz) offensichtlich ungültig. Die massive Verletzung wird durch die Definition einer Ausnahmesituation gerechtfertigt. Diese Ausnahmesituation wird durch die Annahme erklärt, daß zu dem extrapolierten Zeitpunkt, in dem die Masse des Universums in einem Raumpunkt integriert gewesen sein muß, eine Singularität erreicht ist, in der die Gültigkeit der ansonsten gültigen physikalischen Gesetze nicht mehr gegeben ist. Trotz der Leistungsfähigkeit des Standardmodells in vielen Details bleibt es wegen der Aussagen zur frühen Entwicklungsphase unbefriedigend (Cole 1998).

Betrachtet man den Übergang in diese Anfangssingularität retrospektiv, so bedeutet die Extrapolation des Universums in einen Raumpunkt die instantane Bildung von Masse und Energie und das Auftreten annährend unendlich hoher Energie- bzw. Massendichte in der Initialphase. Es gibt mit der Zeit jedoch eine Größe, die sich einigermaßen exakt dieser Singularität zuordnen läßt. Die astrophysikalischen Beobachtungen legen nach den oben rekapitulierten Annahmen die Entstehung des Weltalls und damit seines Raumes aus einem Punkt an einem bestimmten Zeitpunkt nahe. Gleichzeitig gestatten sie, den größten Teil des Expansionsprozesses zeitlich zu überblicken. Durch die Extrapolation in eine räumliche Singularität, wie sich aus der Beobachtung erschließt, ist aber eine zeitliche Singularität keineswegs automatisch gegeben. Im Gegenteil, es gibt keinen Anhaltspunkt dafür, daß nicht auch eine Zeit vor der Anfangssingularität existiert hat. Folglich ist es sinnvoll, über Bedingungen, Zustände, Prozesse nachzudenken, die vor der Anfangssingularität eine Rolle spielten oder diese beeinflußten.

Das erneute Nachdenken über die Anwendbarkeit des Standardmodells wird zudem durch jüngere Beobachtungen herausgefordert. Dazu gehört z.B. die Identifizierung von Galaxien mit hoher Rotverschiebung, d.h. weit entfernten und demzufolge jungen Galaxien, die sich entgegen der Erwartung als bereits hoch entwickelt erweisen (Cimatti et al. 2004).

2.2. Fundamentale Größen

Die Zweifel an dem in vielerlei Hinsicht bewährten Standardmodell haben immer wieder zu seiner kritischen Hinterfragung geführt (z.B. Görnitz 1986). Ein wichtiges Indiz für eine Verletzung wäre der Nachweis, daß zumindest eine der als konstant angenommenen Größen in Wirklichkeit nicht konstant ist. Ein entsprechender Nachweis würde Korrekturen erfordern, die gegebenenfalls zu einem verbesserten Modell führen.

Die Zurückführung realer Strukturen auf Fundamentalgrößen wurde bereits verschiedentlich diskutiert (so etwa Dirac 1938, Dicke 1961, Weinberg 1988), mündete aber nicht in alternative Modellansätze. In den letzten Jahren hat es eine ganze Reihe von Untersuchungen gegeben, die sich der Untersuchung der tatsächlichen Konstanz von Naturkonstanten widmeten (z.B. Bize et al. 2003, Ashenfelter et al. 2004, Ubachs und Reinhold 2004). Bisher sind dabei jedoch trotz zum Teil extrem hoher Genauigkeit der Messungen noch keine Abweichungen vom Konstanzpostulat sicher nachgewiesen worden. Dieser Befund läßt drei mögliche Schlußfolgerungen zu:

1. Die sogenannten Konstanten sind wirklich konstant.
2. Die sogenannten Konstanten verändern sich, jedoch so langsam, daß wir es mit den heutigen Meßmethoden bisher nicht nachweisen können.
3. Die Veränderungen der Konstanten weisen untereinander derartige Beziehungen auf, daß sie nicht detektiert werden können, wenn die Konstanz der jeweils anderen Konstanten vorausgesetzt wird.

Die als konstant angesehenen Größen lassen sich in vier Gruppen einteilen:

1. dimensionsbehaftete Größen, die mikroskopische Objekte betreffen, wie die Elementarteilchenmassen und die Elementarladung
2. dimensionsbehaftete Größen, die Kraftwirkungen über Entfernungen betreffen, wie die Gravitationskonstante, die elektrische (bzw. magnetische) Feldkonstante
3. dimensionsbehaftete universelle Konstanten, die zwischen dem Mikro- und dem Makrokosmos vermitteln, wie die Lichtgeschwindigkeit und das Plancksche Wirkungsquantum
4. dimensionslose Verhältniszahlen, wie die Sommerfeldsche Konstante des elektromagnetischen Feldes

Unter diesen Konstanten stellen diejenigen der dritten Gruppe die Verbindung von Massen und Frequenzen zur Energie her. Die Verbindung der elementaren Größen Masse m, Zeit t (Frequenz ν) und Länge l mit der Energie muß für die Diskussion des Energieerhaltungssatzes besonders wichtig sein. Die Beschreibung erfolgt durch eine allgemeine Gleichung für die Äquivalenz der Energie E mit den Elementargrößen X, wobei ein größenspezifischer Parameter a_i auftritt:

$$E = a_i * X \qquad (2\text{-}1)$$

Die Lichtgeschwindigkeit ist der Parameter der Masse-Energie-Äquivalenz ($a_1 = c^2$) . Das Plancksche Wirkungsquantum ist der Parameter der Frequenz -(Zeit-)Energie-Äquivalenz ($a_2 = h$). Ein entsprechender Parameter für die Länge ist uns nicht so geläufig. Er ergibt sich aber zwanglos als der Quotient der vierten Potenz der Lichtgeschwindigkeit und der Gravitationskonstante ($a_3 = c^4/G$). Ihre Quadratwurzel soll hier im folgenden als abgeleitete Gravitationskonstante f bezeichnet werden.

Die drei entsprechenden Gleichungen lauten:

$E = a_1 * m = c^2 * m$ (2-2)

$E = a_2 * \nu = h * \nu$ (2-3)

$E = a_3 * l = f^2 * l$ mit $f = c^2 / G^{1/2}$ (2-4)

So wie der erste Parameter das Verhältnis von Energie pro Masse und der zweite Parameter das Verhältnis von Energie pro Frequenz beschreiben, gibt der dritte Parameter das Verhältnis von Energie pro Länge an.

Mit der Annahme, daß die Lichtgeschwindigkeit als Fundamentalgröße durch das Produkt einer fundamentalen Länge und einer fundamentalen Frequenz gegeben ist, erhält man den Satz der Planck-Größen von Masse, Frequenz (reziproke Planck-Zeit t_p) und Länge als Funktion einer fundamentalen Energie E_p:

Planckmasse: $m_p = E_p / c^2$ (2-5)

Planckfrequenz: $\nu_p = 1/t_p = E_p / h$ (2-6)

Plancklänge: $l_p = E_p / f^2$ (2-7)

In analoger Weise läßt sich eine fundamentale Temperatur angeben, wobei die Boltzmannkonstante k_B als Parameter fungiert:

Fundamentaltemperatur: $T_p = E_p / k_B$ (2-8)

Die Boltzmannkonstante stellt sich als fundamentale Entropie dar.

Die Reihe der fundamentalen Energiebeziehungen wird durch das Coulombgesetz für die elektrostatische Wechselwirkungen komplettiert (q_e...Elementarladung, α... Feinstrukturkonstante):

$E = [\alpha * h * c/(q_e^2*2*B)] * q^2/r$ (2-9)

Die Energie E_e für die Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen ergibt sich zu:

$E_e = [\alpha * h * c/(q_e^2*2*B)] * q_e^2/r = [\alpha* h * c/(2*B*r)] = \alpha/(2*B) * h * c/r$ (2-10)

Die daraus abgeleitete Fundamentalenergie für einen Abstand von $r=l_p$ führt zu einer Gleichung, die bis auf den Vorfaktor $\alpha/2B$ mit Gleichung (2-6) identisch ist:

$E_{ep} = \alpha/(2*B) * h / t_p$ (2-11)

Im folgenden wird die Entwicklung eines expandierenden, massegenerierenden Universums auf der Basis dieser fundamentalen Größen diskutiert. Von den Naturkonstanten werden zur Definition der drei Planckschen Fundamentalgröße l_p, t_p und m_p lediglich das Plancksche Wirkungsquantum, die Lichtgeschwindigkeit und die Gravitationskonstante benötigt. Diese drei Parameter werden im folgenden als wirkliche Konstanten betrachtet.

3. Kosmogenese unter Massenbildung

3.1. Die Anfangsfluktuation

Der Energie- und Massenerhaltungssatz wurden experimentell immer innerhalb gegebener Räume bestätigt. Es wird hier vorsichtig die Möglichkeit in Betracht gezogen, daß dieser Befund so nicht gelten muß, wenn der Raum selbst veränderlich ist. Die Entstehung von Masse im Universum scheint im Widerspruch zum ersten Hauptsatz der Thermodynamik. Sie wird jedoch im Zusammenhang mit der Interpretation der kosmischen Isotopenverteilung diskutiert (G. Burbidge et al. 1999). Deshalb soll im folgenden der Gedanke einer allmählichen Massenzunahme in einem expandierenden Universum als Denkmodell vorgestellt werden.

Die Quantentheorie lehrt das Auftreten von kleinen reversiblen, spontanen Veränderungen, d.h. Fluktuationen. Fluktuationen setzen Zeit voraus. Wenn man davon ausgeht, daß eine Fluktuation zur Entstehung eines Universums führen kann, so erscheint es am vernünftigsten, nach den oben gemachten Voraussetzungen über fundamentale Konstanten anzunehmen, daß am Anfang des Universums eine Fluktuation mit der Amplitude der Planckgrößen vorgelegen hat. Unter dieser Grundannahme muß nur die Zeit als präexistierende Größe überhaupt vorausgesetzt werden. Die einfachste vorstellbare Fluktuation besteht in einer Energieamplitude E_p über einen Zeitraum von t_p. Dieser Energiefluktuation entspricht eine Äquivalentmassenfluktuation von m_p sowie eine Raumfluktuation auf der Länge von l_p.

Die so beschriebene Fluktuation ist unabhängig davon, ob man keinen Raum oder einen fiktiven Raum vor dem Beginn unseres Universums voraussetzt. Kosmischer Raum ist keine Voraussetzung für die Fluktuation. Ebenso werden weder Masse noch Energie vorausgesetzt. Aber es wird angenommen, daß wegen der oben genannten Verknüpfung von Masse, Frequenz und Länge über die Energie die Fluktation ihrem Charakter nach alle diese Größen gleichermaßen betrifft. Die Anfangsfluktuation ist eine Energie-Masse-Frequenz-Längen-Fluktuation. Die verschiedenen Größen sind dabei Ausdruck ein und desselben Prozesses. Die Fluktuation betrifft aber tatsächlich nur elementare Einheiten: das kleinste denkbare Zeitintervall, aber damit verbunden die größte denkbare Frequenz; die kürzeste denkbare Längeneinheit und das kleinste denkbare Rauminkrement, aber damit verbunden die kürzeste denkbare Wellenlänge.

Das Auftreten einer fundamentalen Masse m_p, die sehr viel größer ist als die Massen der Elementarteilchen erklärt sich aus den extrem kleinen Zeit- und Längeninkrementen, die durch l_p und t_p gegeben sind. Die Massenfluktuation kann wegen der Bedingungen der Raumfluktuation nicht kleiner als die Fundamentalmasse sein. Kleinere Energie- und Massenportionen sind zwingend an größere Längen und niedrigere Frequenzen gebunden.

Als erster Schritt zu einem Universum wäre somit eine Fluktuation vorzustellen, die ein Rauminkrement mit der Länge l_p und damit vermutlich ein Volumenelement von der Größenordnung l_p^3 entstehen läßt. Dieses Volumenelement korrespondiert dabei mit einer Energiefluktuation von E_p, die der Äquivalentmasse m_p entspricht. Fluktuationen sind Ereignisse mit temporärem Charakter und (zumeist) vernachlässigbarer Wirkung. Ein Universum kann nur entstehen, wenn die Fluktuation eine Veränderung bewirkt. Da die Zeit vorausgesetzt wurde, muß für das Schicksal der Fluktuation im weiteren nach der Entwicklung von Länge, Energie und Masse gefragt werden.

3.2. Die Expansion

Die Beobachtung, daß sich weit entfernte kosmische Objekte annähernd mit Lichtgeschwindigkeit von uns fortbewegen, wird im Standardmodell als eine Ausbreitung von Masse und Energie in einem präexistierenden Raum angesehen. Die Existenz des Raumes ist nur insofern in Frage gestellt, als Raum ohne Materie und Energie als irrelevanter Raum betrachtet werden. Da wir in unterschiedlichen Raumrichtungen sehr weit entfernte Objekte sehen können, ist die Annahme eines in sich gekrümmten Raumes angenehm, weil in einem solchen Raum zwei in entgegengesetzten Richtungen von uns weit entfernte Objekte einander nahe stehen könnten und es dadurch nicht zu relativen Geschwindigkeiten oberhalb der Lichtgeschwindigkeit kommen muß. Materie bewegt sich diesem Bild zufolge mit Geschwindigkeiten bis knapp unter der Lichtgeschwindigkeit, Photonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit durch diesen Raum.

Nimmt man jedoch an, daß am Anfang kein Raum existierte, in den sich die Massen und Energien des Universum ausbreiten konnte, so muß der Verteilungsprozeß der Massen und Photonen im Zusammenhang mit der Raumentstehung selbst betrachtet werden. Der Raum kann sich nicht langsamer ausbreiten als die am schnellsten bewegten Objekte. Deshalb ist die Annahme einer Raumausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit sinnvoll. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Raumes ist gerade gleich der Lichtgeschwindigkeit, wenn in jedem Zeitintervall t_p eine Zunahme des Raumes um die inkrementale Längeneinheit l_p stattfindet.

Dieses Modell ist mit dem Wachstum eines in sich gekrümmten Universums gut verträglich. Das eindimensionale Modell eines solchen dreidimensionalen Raumes wird durch einen unendlich dünnen ringförmigen Gummifaden gegeben, der sich so dehnt, daß die maximale Geschwindigkeit, mit der sich zwei Objekte auf entgegengesetzten Punkten des Rings voneinander entfernen, gerade gleich der Lichtgeschwindigkeit ist:

$$(dl/dt)_{max} = c \tag{3-1}$$

Die Dehnungsgeschwindigkeit $(dl/dt)_{cs}$ des Ringdurchmessers beträgt in diesem Modell:

$$(dl/dt)_{cs} = 2^* c/B \tag{3-2}$$

Die Länge jeden Halbelements des Rings nimmt in jedem Zeitinkrement um l_p zu, d.h. der Ring als Ganzes wächst in jedem Zeitinkrement um 2^*l_p. Die relative Ausdehnungsrate r_{exp} ist leicht aus dem Verhältnis des in jedem Zeitinkrement hinzukommenden Längeninkrementes l_p und der Gesamtausdehnung des Rings l_{univ} (Umfang) zu bestimmen:

$$r_{exp} = 2 * l_p/l_{univ}/t_p \tag{3-3}$$

Von einem Beobachter wird in solch einem Raum nur ein Halbmesser als maximale Entfernung l_{oo} wahrgenommen:

$$l_{oo} = l_{univ} \tag{3-4}$$

mit

$$r_{exp} = l_p/(l_{oo}*t_p) \tag{3-5}$$

Überträgt man die maximale Tiefe des so expandierenden Raumes im eindimensionalen Modell auf das beobachtbare Universum ($l_{oo} = 1.3 * 10^{26}$ m; Konstanten hier und im folgenden zitiert nach Mohr und Taylor 1998), so erhält man als gegenwärtige relative Expansionsrate:

$$r_{exp} = 1{,}6*10^{-35}\,m / (1.3 * 10^{26} m * 5{,}4*10^{-44}\,s) = 0{,}57 * 10^{-18}\,s^{-1} \tag{3-6}$$

Das entspricht gerade der wahrgenommenen Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit. Mit dem Alter des Universums t_h ist mit

$$t_h = l_{oo}/c \tag{3-7}$$

die Zahl der Zeitinkremente N seit der Anfangsfluktuation gegeben:

$$N = t_h/t_p = 8 * 10^{60} \tag{3-8}$$

Das Volumen des entstandenen Raumes V_{oo} wird durch eine Kugelnäherung mit dem Radius l_{oo} beschrieben:

$$V_{oo} = 4/3 * B* l_{oo}^3 = 4/3 * B* N^3 * l_p^3 \tag{3-9}$$

3.3. Raumverspannung

In den nächsten Abschnitten werden drei Betrachtungsweisen für den Eintrag von Energie bzw. Masse als Kompensation für den sich bildenden Raum während der Expansion des Universums diskutiert: ein Raumspannungsmodell, die Lorentztransformation für eine bewegte Masse und eine Photonenkonversion.

Der oben dargestellten Hypothese der Entwicklung des Weltalls entspricht eine zahlenmäßige Zunahme der Zahl elementarer inkrementeller Raumeinheiten in den Schritten der elementaren Zeiteinheiten. Als Basis werden dafür Kuben mit der Seitenlänge der Plancklänge l_p und die Planckzeit t_p vorausgesetzt. Ferner wird angenommen, daß am Startpunkt von einem einzigen Raumelement ausgegangen wird, und die Zahl der Rauminkremente in allen Raumrichtungen im Takt der Zeitinkremente zunimmt, d.h. – zumindest annähernd – eine Kugelform hervorbringt. Die Zahl der Raumelemente N_r wächst kubisch mit der Zahl der Zeitelemente N:

$$N_r \sim N^3 \quad (3\text{-}10)$$

Wegen der Orthogonalität der drei Raumachsen einerseits und der konzentrischen Ausbreitung der Raumentwicklung andererseits, resultiert bei jedem inkrementellen Zeitschritt eine Volumendifferenz zwischen idealen Kugelschalen V_{ks} und einer Monolage von Elementarkuben V_{mk}, die auf einer ebenen Fläche gleichen Inhalts wie die Kugeloberfläche unterzubringen wären. Wegen des vorausgesetzten elementaren Charakters der Rauminkremente ergibt sich als Konsequenz aus dieser Volumendifferenz eine Verspannung des Raumes σ an der Oberfläche der expandierenden Kugel, die der in jedem Zeitinkrement generierten Elementarverspannung σ_p, d.h. gerade der Elementarenergie E_p (= m_p*c^2) auf einer Elementarfläche ($l_p{}^2$) entspricht:

$$\sigma = \sigma_p * (V_{ks} - V_{mk}) = (E_p/l_p{}^2) * (V_{ks} - V_{mk}) = (m_p/t_p{}^2)* (V_{ks} - V_{mk}) \quad (3\text{-}11)$$

Mit den Gleichungen für das Kugelschalenvolumen bei einem Kugelausgangsradius von r

$$V_{ks} = 4/3\ \pi *[(r + lp)^3 - r^3) \quad (3\text{-}12)$$

und für das Volumen einer kugeloberflächenäquivalenten Monolage von Elementarkuben

$$V_{mk} = 4*\pi * lp * r^2 \quad (3\text{-}13)$$

und

$$r = N * lp \quad (3\text{-}14)$$

errechnet sich das Verspannungsvolumen für die N-te Kugelschale

$$V_p = (V_{ks} - V_{mk}) = \{4/3\ \pi *[(N*lp + lp)^3 - (lp*N)^3) - 4* \pi * N^2 * l_p{}^3 \quad (3\text{-}15)$$

Unter Vernachlässigung von $1/3N^2$ gegenüber 1/N für sehr große N erhält man in guter Näherung:

$V_p = 4 * \pi * N * l_p^3$ (für N >>1) (3-16)

Die Verspannungsenergie ergibt sich zu:

$E_{ges} = F_p/l_p * V_p = 4\,\pi * F_p\,/l_p * N*lp^3 = 4\,\pi * m_p/t_p{}^2 * N*l_p^2$ (3-17)

$E_{ges} = 4\,\pi * m_p * c^2 * N$ (für N >>1) (3-18)

Das entspricht einer Verspannungs-Äquivalentgesamtmasse m_{ges} von:

$m_{ges} = 4\,\pi * m_p * N$ (für N >>1) (3-19)

Mit $N \approx 10^{61}$ erhält man eine Äquivalentgesamtmasse von größenordnungsmäßig 10^{55} kg. Dieser Wert entspricht grob dem abgeschätzten Wert für die angenommene energieäquivalente Gesamtmasse unseres Weltalls m_k. Er liegt jedoch um etwa eineinhalb Größenordnungen (ca. Faktor 8 π) über dem aus der Lorentztransformation erhaltenen Wert m_{oo}.

3.4. Abschätzung der relativistischen Massenzunahme

Für die weitere Betrachtung ist es sinnvoll, zwischen einem fiktiven äußeren und einem inneren Beobachter zu unterscheiden. Was geschieht mit einer anfangs vorhandenen Masse, die während der Entstehung des Raumes mit annähernd Lichtgeschwindigkeit in dem entstehenden Raum verteilt wird? Ein äußerer Beobachter wird möglicherweise gar nichts wahrnehmen, wenn der entstehende Raum durch die entstehende Energie ausgeglichen wird. Er erfährt wahrscheinlich maximal eine Fluktuation mit der Wirkung h, die t_p andauert, eine Länge von l_p und eine Massenfluktuation von m_p betrifft:

$m_p = h*t_p/l_p^2$ (3-20)

Ein innerer Beobachter, der die Gesamtheit der Ereignisse einschließlich der Grenzen erfährt, könnte einen Prozeß erleben, in dem sich der wesentliche Teil der Masse mit annähernd Lichtgeschwindigkeit oder genauer gesagt mit einer Geschwindigkeit bewegt, die für jedes Zeitintervall genau ein zulässiges Inkrement unter der Lichtgeschwindigkeit bleibt. Für ihn stellt sich im ersten Zeitintervall die gleiche Fluktuation dar. Im folgenden wird jedoch nicht ein echtes $l_{p,}$ sondern ein aufgrund der hohen Geschwindigkeit der Expansion relativistisch kontrahiertes $l_{p,rel}$ wahrgenommen wird, das zu einer anderen wahrgenommenen Masse m_{oo} führt:

$m_{oo} = h*t_p/l_{p,rel}^2$ (3-21)

Die relativistische Länge kann nun leicht durch die Lorentztransformation beschrieben werden. Für eine Bewegung der Masse im Inneren mit einer Geschwindigkeit v_{max}, die jeweils nur ein Geschwindigkeitsinkrement unter c liegt, gilt:

$$v_{max} = c - c/N \tag{3-22}$$

Dabei ist N die Zahl der Zeit- und Längeninkremente seit dem Beginn der kosmischen Entwicklung.

Die scheinbar kontrahierte Elementarlänge ergibt sich mit der Lorentztransformation zu:

$$l_{p,rel} = l_p * [1- (v_{max})^2/c^2]^{0,5} \tag{3-23}$$

$$l_{p,rel} = l_p * [1- (c-c/N)^2/c^2]^{0,5} = l_p * (2/N - 1/N^2)^{0,5} \tag{3-24}$$

Die Bedeutung von m_{oo} muß in einer Masse zu suchen sein, die sich aufgrund der schnellen Verteilungsbewegung innerhalb des entstehenden Kosmos' ergibt. Diese Masse wird direkt eine Funktion der Anzahl der Elementarintervalle seit der Anfangsfluktuation:

$$m_{oo} = h * t_p / l_{p,rel}^2 = h * t_p / [l_p^2 * (2/N - 1/N^2)] \tag{3-25}$$

Für größere Werte von N ist $1/N^2$ gegenüber 2/N vernachlässigbar. Im Ergebnis erhält man eine lineare Abhängigkeit von m_{oo} von der Zahl der Elementarintervalle N:

$$m_{oo} = h * (t_p/l_p^2) *N/2 \text{ für } N>>1 \tag{3-26}$$

Wendet man diese Hypothese auf unser Universum an, so ist für N der oben genannte Wert (3-19) von etwa 10^{61} anzusetzen. Mit den bekannten Werten für h, t_p und l_p erhält man:

$$m_{oo} = 10^{53} \text{ kg.} \tag{3-27}$$

Dieser Wert entspricht größenordnungsmäßig dem abgeschätzten Wert für die angenommene Gesamtmasse unseres Weltalls m_k.

3.5. Eintrag von Energie durch Raumentstehung

Geht man von einem inkrementellen Wachstum des Kosmos aus, so bildet sich in jedem Zeitintervall t_p genau eine Schicht von Rauminkrementen mit der Dicke von l_p. Der generierte Raum oder die generierte Verspannung einer Schicht wird durch die Freisetzung von Energie/Masse im Inneren des Kosmos kompensiert. Die kleinsten dabei denkbaren Energieportionen entsprechen dem Kompensationsanteil eines einzelnen Rauminkrements. Ist N_i die Zahl der in einem Zeitinkrement neu gebildeten Rauminkremente, so wird die inkrementelle Kompensationsenergie der Rauminkremente E_i durch das Verhältnis des Gesamtenergiezuwachses ($m_p * c^2$) zu N_i bestimmt:

$$E_i = m_p * c^2 / N_i \quad (3\text{-}28)$$

Diese Größe läßt sich für den gegenwärtigen Zustand des Universums leicht abschätzen, da N_i durch die scheinbare geometrische Oberfläche des Universums geteilt durch die Seitenfläche eines Elementarkubus gegeben ist:

$$N_i = 4 * B * (N * l_p)^2 / l_p^2 = 4 * B * (10^{61})^2 \approx 10^{123} \quad (3\text{-}29)$$

Die pro generiertem Elementarkubus gegenwärtig freigesetzte Einzelenergie ergibt sich dann zu

$$E_i \approx m_p * c^2 / 10^{123} \,.\, 10^{-8}\,\text{kg} * 10^{17}\,\text{m}^2/\text{s}^2 * 10^{-123} = 10^{-114}\,\text{J} \quad (3\text{-}30)$$

Es erscheint plausibel, daß die Freisetzung der Energie nicht lokal, sondern im Raum verschmiert erfolgt. Die maximale Verschmierung der Energie läßt sich anhand von elektromagnetischen Photonen vorstellen, die die maximal mögliche Wellenlänge 8_{max} besitzen. Die größte denkbare Wellenlänge entspricht dem Durchmesser des Universums. Während energiereichere Photonen wegen ihrer kürzeren Wellenlängen endliche Zeiten für ihren durch die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit bestimmten Weg durch das Universum benötigen, kann man davon ausgehen, daß diese extrem langwelligen Photonen überall gleichzeitig existieren. Ihre Energie E_{min} beträgt größenordnungsmäßig:

$$E_{min} = h * c/8_{max} \,.\, 6.6*10^{-34}\,\text{Js} * 3 * 10^8\,\text{m/s} / 1,3*10^{26}\,\text{m} \approx 10^{-51}\,\text{J} \quad (3\text{-}31)$$

Aus (3-30) und (3-31) läßt sich die Zahl von Elementarkuben N_{kj} abschätzen, die zur Zeit für die Bildung eines Photons mit niedrigster Energie und maximaler Verschmierung gebildet werden müssen:

$$N_{kj} = E_{min} / E_i \approx 10^{63} \quad (3\text{-}32)$$

Diese Kuben bilden insgesamt ein Volumen von ca. 10^{-42} m^3. Diese Zahl stieg während der Expansion des Universums an. N_k kann für beliebige N angegeben werden:

$$N_k = (h * c/\lambda_{max}) / (m_p * c^2 / N_i) = (h * c / (l_p * N) / [m_p * c^2 / (4 * \pi * N^2)] \quad (3\text{-}33)$$

$$N_k = 4 * \pi * N * h * t_p / (m_p * c^2) \quad (3\text{-}34)$$

Die Kubikwurzel des diesem Wert entsprechenden Volumens ($N_k^{1/3} * l_p$) liegt etwa bei 10^{-15} m und damit bei der Comptonwellenlänge bzw. dem Durchmesser von Nukleonen.

Die Zahl der pro Zeitinkrement gebildeten energieärmsten Photonen N_e ergibt sich als Quotient der Zahl von Kuben in der zur Ausdehnung des Universums hinzutretenden Kubenschale und der Zahl der für die Energie eines Photons minimaler Energie nötigen Elementarkuben:

$N_e = N_i / N_k$(gegenwärtig $\approx 10^{61}$) (3-35)

Diese Zahl beschreibt die in jedem elementaren Zeitintervall primär gebildeten Photonen minimal möglicher Energie.

3.6. Photonenkonversion

Aus der Laserphysik ist bekannt, daß bei gleichzeitiger inelastischer Wechselwirkung von zwei energieärmeren Photonen mit einem Chromophor resonante Anregungen möglich sind, bei denen Energieniveauunterschiede der doppelten Photonenenergie überwunden werden. Voraussetzung für eine solche Zwei-Photonen-Anregung ist lediglich, daß während der Verweildauer eines Photons im Chromphor ein zweites Photon ebenfalls das Chromophor passiert. Wegen der geringen Ausdehnung der Chromophore sind sehr hohe Laserleistungsdichten erforderlich, um eine Zwei- oder Mehrphotonenabsorption zu realisieren.

Es erscheint naheliegend, daß eine Photonenenergiekonversion mit gewisser Wahrscheinlichkeit auch ohne Chromophor abläuft, wenn sich hinreichend Photonen gleichzeitig in einem bestimmten Raumbereich aufhalten. Für extrem energiearme, d.h. besonders langwellige Photonen ist diese Wahrscheinlichkeit wegen ihrer Verschmierung über den Raum viel größer als für kurzwellige Photonen.

Falls die oben gemachte Annahme zutrifft, daß bei der Expansion des Universums der gebildete Raum durch die Bildung von Photonen sehr geringer Energie kompensiert wird, so hätten diese wegen ihrer extremen Langwelligkeit und hohen Dichte die besten Voraussetzungen für eine Konversion. Es ist dabei jedoch zu fordern, daß die Bedingung der Gleichzeitigkeit nicht das Universum als Ganzes betrifft, sondern einen Raumbereich, dessen Durchmesser der Wellenlänge der kürzerwelligen Photonen entspricht, die durch die Konversion der langwelligen Photonen gebildet werden, d.h. eine Entfernung über die die sekundär gebildeten Photonen verschmiert sind.

Die Wahrscheinlichkeit der Umwandlung der energiearmen Photonen in Photonen der Wellenlänge λ_1 wird dementsprechend durch die Gleichzeitigkeit und die Feldkonstante α bestimmt. Dazu ist die entsprechende Wechselwirkungslänge zu betrachten. Für die Zahl N_1 der gebildeten kürzerwelligen Photonen gilt:

$N_1 = \lambda_{max} / (\lambda_1 * \alpha/2\pi)$ (3-36)

Damit existiert ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Energieeintrag durch die Raumbildung während der Expansion des Universums und der Wellenlänge der sekundär gebildeten Photonen.

Wegen ihrer extrem niedrigen Energie entziehen sich die primär gebildeten Photonen der Beobachtung. Besteht jedoch die Möglichkeit, sekundär gebildete Photonen zu beobachten? Dazu muß die Energiebilanz erfüllt sein. Die Produkte aus der Zahl der primär gebildeten Photonen N_0 und deren Energie E_{min} und der entsprechenden Werte $N_1 * E_1$ muß gleich sein und dem Energieäquivalent einer Planckmasse entsprechen:

$$E_{min} * N_0 = E_1 * N_1 \text{ oder: } N_0 * h * c / \lambda_{max} = N_1 * h * c / \lambda_1 = m_p * c^2 \quad (3\text{-}37)$$

Nach Einsetzen von (3-36) in (3-37) erhält man:

$$N_0 / \lambda_{max} = \lambda_{max} / (\lambda_1 * \alpha/2\pi) / \lambda_1 \quad (3\text{-}38)$$

$$\alpha/2\pi * (\lambda_1 / \lambda_{max})^2 = 1/N_0 \quad (3\text{-}39)$$

und daraus die Wellenlänge der mit größter Wahrscheinlichkeit sekundär gebildeten Photonen:

$$\lambda_1 = \lambda_{max} / \sqrt{} (\alpha/2\pi * N_0) \quad (3\text{-}40)$$

Für die bekannten Werte (N_0 . 10^{61}, $\alpha = 1/137$, $\lambda_{max} = 1{,}3 * 10^{26}$ m) läßt sich diese Wellenlänge gut abschätzen ($\lambda_1 \approx 1{,}35$ mm).

Dieser Wert ist eine gute Näherung für die Wellenlänge der kosmischen Hintergrundstrahlung (CMB) im Mikrowellenbereich (zur Bedeutung des CMB für kosmologische Parameter vergleiche: Lineweaver et al. 1998, Webster et al. 1998, DeBernardis et al. 2000).

Die Intensität der gemessenen Hintergrundstrahlung ist viel niedriger, als es zu erwarten wäre, wenn die gesamte aus der Raumentstehung freigesetzte Energie ausschließlich in Hintergrundstrahlung umgewandelt wird. Wenn das diskutierte Modell gültig sein soll, muß es demzufolge noch andere Prozesse geben, die einen Teil der konvertierten Photonen in andere Energieformen umwandeln.

4. Entropie und massebehaftete Teilchen

4.1. Belegung von Raumpunkten durch schwere Baryonen

Geht man von der oben gemachten Annahme von ca. 10^{53} kg für die aktuelle Masse des Universums m_{oo} und nimmt man an, daß diese Masse im wesentlichen durch Baryonen (vor allem Nukleonen, d.h. Protonen und Neutronen) repräsentiert wird, so läßt sich die Zahl dieser Baryonen N_B leicht anhand ihrer Masse m_B abschätzen:

$$N_B \,.\, m_{oo} / m_B \approx 10^{53}\,\mathrm{kg}/1{,}7*10^{-27}\mathrm{kg} \approx 10^{80} \qquad (4\text{-}1)$$

Die durch die Verteilung der Baryonen in das Universum maximal eingebrachte Entropie S_{max} ist gegeben durch die Zahl der Baryonen und die Zahl der möglichen Raumpunkte, die durch die Baryonen besetzt sein können. Die Zahl möglicher (unterscheidbar besetzbarer) Raumpunkte N_{pos} wird durch die Größe des Universums [V_{oo} . $(N{*}l_p)^3$] und die maximale Positionsgenauigkeit festgelegt, die durch die Unschärferelation gegeben ist, wobei 8_{pr} der Comptonwellenlänge eines Nukleons (1,3 * 10^{-15} m) entspricht:

$$N_{pos} \approx V_{oo}/\lambda_{pr}^{3} \qquad \approx 10^{123} \qquad (4\text{-}2)$$

$$S_{max} = k_B * N_B * \ln (N_{pos}) \qquad \approx 4 * 10^{59}\ \mathrm{J/K} \qquad (4\text{-}3)$$

Wenn man annimmt, daß die gesamte evolvierte Energie/Masse zur Entropieentstehung beigetragen hat, so läßt sich eine Konversionstemperatur für die Nukleonenbildung T_k abschätzen:

$$T_k = m_{oo}{*}c^2 / S_{max} \approx 2{,}3 * 10^{10}\ \mathrm{K} \qquad (4\text{-}4)$$

Da das Weltall in Wirklichkeit keine chaotische Verteilung von Nukleonen darstellt, sondern hochgradig strukturiert ist, liegt die reale Gesamtentropie unter S_{max} und die Konversionstemperatur muß dementsprechend noch höher sein.

Für die Nukleonen existiert aufgrund der Comptonwellenlänge die oben verwendete Unsicherheit in der Bestimmung ihrer Position. Mißt man die Länge mit dem Rastermaß der Fundamentallänge l_p, so ergibt sich als Maß für die Positionsunsicherheit Δx in einer Dimension

$$\Delta x = \lambda 8_{pr}/l_p = 8{,}25 * 10^{19} \qquad (4\text{-}5)$$

und im Volumen:

$$\Delta N = (\lambda_{pr}/l_p)^3 = 5{,}6 * 10^{59} \qquad (4\text{-}6)$$

Dieser Wert liegt fast in der Größenordnung der oben angesetzten Elementarintervalle. Deshalb kann darüber spekuliert werden, ob die schweren Elementarteilchen sich als eine Art Zustand des Raumes verstehen lassen. Nukleonen wären demnach Teilchen, die dadurch charakterisiert sind, daß ihre Positionsunsicherheit im Raum gerade gleich der Zahl der Elementarintervalle N ist. Die Konsequenz einer solchen Annahme führt ebenfalls zu einer Veränderung der Comptonwellenlänge und damit auch der Masse der Nukleonen mit der Zeit.

4.2. Zusammenhang zwischen Protonenmasse, Elektronenmasse und Planckmasse

Die folgenden Überlegungen schließen an die oben diskutierte Möglichkeit der Annahme veränderlicher Teilchenmassen an. Sie gehen dabei von einer einfachen Annahme aus: Protonen und Elektronen stellen Teilchen dar, die aus der fundamentalen Planckmasse m_p hervorgegangen sind. So lassen sich Elementarteilchen in für kosmologische Verhältnisse befriedigender Näherung als Funktionen der Planckmasse darstellen. Als Parameter gehen lediglich die dimensionslose kosmologische Zeit N und die dimensionslose Konstante des elektromagnetischen Feldes α ein:

$$N = 2 * m_p^3/(m_{el} * m_{pr}^2) = 8 * 10^{60} \qquad (4\text{-}7)$$

Es läßt sich dabei eine Näherung für die Protonenmasse angeben:

$$m_{pr} \,.\, m_{p} * {}^3\sqrt{}\,[8*\pi/(N*\alpha] = 1.6 * 10^{-27}\ \mathrm{kg} \qquad (4\text{-}8)$$

mit $\alpha = 1/137.036$
und

$$N \approx 8 * 10^{60} \approx 8 * B * e^{(1/\alpha)} = 8.21 * 10^{60} \qquad (4\text{-}9)$$

Die Näherung für die Elektronenmasse lautet:

$$m_{el} \approx 2 * m_p^3/(N * m_{pr}^2) = 1 * 10^{-30}\ \mathrm{kg} \qquad (4\text{-}10)$$

Dieser näherungsweise gegebene Zusammenhang läßt sich als Abhängigkeit der Teilchenmassen vom Weltalter interpretieren, wenn N die Zahl der Zeitinkremente seit der Entstehung des Universums darstellt. Konsequenz wären Protonen- und Elektronenmassen, die sich mit $N^{(-1/3)}$ aus der Planckmasse entwickelt haben.

Wenn c, G und h konstant sind, müßte die Feinstrukturkonstante α einer allmählichen Veränderung mit der Zunahme der Raum- und Zeitinkremente unterliegen. Nach dem oben Gesagten sollte sie logarithmisch vom Weltalter abhängig sein, sich also in ihrer Funktion analog zur Abhängigkeit der Entropie von der Zahl möglicher Zustände in einem System verhalten:

$$1/\alpha \approx \ln(N) \qquad (4\text{-}11)$$

Unter Annahme eines konstanen Wertes für die Elementarladung ändern sich μ_o und ε_o mit α. Für die Anfangssituation ($\alpha \rightarrow 1$) geht Gleichung (2-11) in (2-6) über, wodurch auch der Elektromagnetismus und die elektrische Wechselwirkung ineinander übergehen.

4.3. Überprüfbarkeit anhand von astrophysikalischen Meßdaten

Die unterschiedlichen Anregungszustände von Atomen und Molekülen sind von den Massen der beteiligten Atome und damit der Elementarteilchen, aus denen diese bestehen, und von der Sommerfeldschen Konstante α abhängig. Sowohl für Rotations-, für Oszillations- als auch für elektronische Anregung gehen in die Energiedifferenzen zwischen den unterschiedlichen Anregungszuständen N und α ein. Die Funktionen sind dabei jedoch für die verschiedenen Anregungsarten unterschiedlich.

Bei einer Änderung von α sollten sich die Spektren ändern. Die Rydbergkonstante R_{00} hängt von der Elektronenmasse und bei deren Veränderlichkeit von N sowie von α ab:

$$R_{00} = m_e * \alpha^2 * c^2 / (2 * h) \qquad (4\text{-}12)$$

Bei Annahme eines Kosmos mit zunehmender Masse sollte α in der frühen Phase näher an 1 gelegen haben, also größer gewesen und auch die Elektronenmasse größer gewesen sein, so daß im frühen Universum auch die Rydberg-Konstante größer war als heute. Photonen, die in früher Zeit emittiert wurden, müßten demzufolge energiereicher sein, als bei den heutigen Konstanten zu erwarten wäre. In der Konsequenz erscheinen die Rotverschiebungen (z-Werte) weit entfernter Objekte geringer, als sie auf Grund der Entfernung zu erwarten wären.

Es ist deshalb denkbar, daß die anhand der beobachteten z-Werte weit entfernter Galaxien ermittelten Entfernungen geringer ausfallen als erwartet, weil die Rydbergkonstante für diese Objekte, deren Licht früh in der Entwicklung des Weltalls entstand, deutlich größer war als heute. Die aus der Abweichung der gemessenen von den erwarteten Entfernungen postulierte Zunahme der Expansionsgeschwindigkeit und die damit verbundene Wiederbelebung der Einsteinschen Idee der Einführung einer kosmologischen Konstante (vgl. S. M. Carroll 2003) würde dann geringer ausfallen oder wäre möglicherweise gar nicht erforderlich, um die Daten zu interpretieren. Durch präzise Messung der Entfernungen von Objekten mit hohem z-Wert, könnte es bei Verzicht auf die Diskussion einer Beschleunigung der Expansion im Umkehrschluß möglich sein, auf Veränderungen der Elementarteilchenmassen und von α im Laufe der Evolution des Weltalls zu schließen oder auch solche ggf. im oben diskutierten Umfang auszuschließen.

Danksagung

Für freundliche Ermutigung und Diskussion danke ich Gerd Lassner und Thomas Görnitz.

Literatur

Ashenfelter, T.; Mathews, G.J.; Olive, K.A.: Chemical evolution of Mg isotopes versus the time variation of the fine structure constant, Phys. Rev. Lett. 92,4 (2004), 041102

Bize, S.; Diddams, S.A.; Tanaka, U. et al.: Phys. Rev. Lett. 90, 15 (2003), 150802

Carroll, S.M.: Why is the universe accelaterating? ArXiv: astro-ph/0310342 v2 (18 Nov 2003)

Burbidge, G.; Hoyle, F.; Narlikar, J.V.: A different approach to cosmology, Physics Today (April 1999), 38

Cimatti, A.; Daddi, E.; Renzini, A. et al.: Old galaxies in the young universe, in: arXiv: astro-ph/0407131 v1 (07 Jul 2004)

Coles, P.: Nature 393 (1998), 741–744

De Bernardis, P., Ade, P.A.R., Bock, J.J. et al.: Nature 404 (2000), 955–959

Dicke, R.H.: Nature 192 (1961), 440

Dirac, P.: Proc. Royal Soc. A 165 (1938), 199

Einstein, A.: Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, Ann. Phys. 17 (1905a), 132

Einstein, A.: Zur Elektrodynamik bewegter Körper, Ann. Phys. 17 (1905b), 891

Einstein, A.: Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? Ann. Phys. 18 (1905c), 639

Görnitz, Th.: Internatl. J. Theor. Phys 25 (1986), 8

Hörz, H.: Kosmische Rätsel in philosophischer Sicht. Bemerkungen zu philosophisch-kosmologischen Betrachtungen von Hans-Jürgen Treder, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät 61, 5 (2003), 17–34

Lineweaver, Ch. H., Barbosa, D.: Astrophys. J. 496 (1998), 624–634

Mohr, P.J.; Taylor, B.N.: CODATA. Recommended Values of the Fundamental Physical Constants (1998), zit.nach www.pro.physik.de

Riess, G.A. et al.: Astronomical J. 116, 3 (1998), 1009

Ubachs, W.; Reinhold, E.: Highly accurate H_2 Lyman and Werner Band laboratory measurements and improved constraint on a cosmological variation of the proton-to-electron mass ratio, Phys. Rev. Lett 92,10 (2004), 10302

Webster, A.M., Bridle, S.L., Hobson, M.P., Lasenby, A.N., Lahav, O., Rocha, G.: Astrophys. J. 509 (1998) , L65–L68

Weinberg, S.: Rev. Mod. Phys. 61 (1988), 1