

Siedende Urmaterie

Autor(en): **Hagedorn, R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali**

Band (Jahr): **148 (1968)**

PDF erstellt am: **28.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-90676>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Siedende Urmaterie

R. HAGEDORN, CERN (Genève)

1. Einleitung

Die drei Hauptvorträge, deren letzter dieser hier ist, stehen unter der Gesamtüberschrift «Evolution der Materie». Wenn auch niemand dabei war, als das Universum entstand, so erlauben uns doch unsere heutigen Kenntnisse der Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik, verbunden mit der Annahme, dass die Naturgesetze unwandelbar sind, Modelle zu konstruieren, die mehr und mehr auf mögliche Beschreibungen der Anfänge unserer Welt zusteuern. Das haben die beiden ersten Vorträge bereits gezeigt. Wir beginnen die Zusammensetzung und Häufigkeitsverteilung der Atomkerne zu verstehen, und wir wissen, wie die Energie erzeugt wird, die die Sonne und unzählige andere Sterne verpuffen. Das hätten wir niemals erfahren, wenn wir nicht hier auf der Erde die Atomphysik und die Kernphysik vorangetrieben hätten.

Um das sehr Grosse zu verstehen, mussten wir ins sehr Kleine vordringen. Die Objekte, die hier aufeinander bezogen werden, sind unvorstellbar verschieden gross. Im täglichen Leben ist ein Zentimeter eine anschauliche und natürliche Grösse; unsere direkte Vorstellung reicht von «sehr dünn» – ein Blatt Cellophan (10^{-3} cm) – zu einigen hundert Metern (10^4 cm), unterhalb und oberhalb dieser Schranken erfahren wir Längenabmessungen nicht mehr direkt durch unsere Sinne, sondern indirekt durch intellektuelle Hilfsmittel (100 km = 1 Std. auf der Autobahn). Selbst mit solchen Tricks kommen wir nicht weit; denn um auszudrücken, wie klein ein Elementarteilchen und wie gross der zurzeit beobachtbare Teil des Universums ist, müssen wir Zahlen benutzen, die wieder unvorstellbar sind: Es gehen so viele Protonen auf 1 cm, wie Zentimeter auf den Erdbahndurchmesser und wie Erdbahndurchmesser auf die Entfernung von uns bis zu den äussersten beobachteten Spiralnebeln, nämlich etwa 10^{13} – 10^{14} . Wer aber kann sich die Zahl 10^{13} vorstellen? Ich kann mir zur Not 10^6 = eine Million vorstellen: Eine Million Teelöffelchen voll Wasser geben etwa 1 m^3 . Aber schon 10^9 – eine Milliarde – ist schwierig: Wollen Sie Milliardär werden? Legen Sie 32 Jahre lang jede Sekunde einen Franken beiseite – dann sind Sie's. Erst eine Million Jahre geben 3×10^{13} sec. Schnüren Sie also Protonen auf, jede Sekunde eines – in einer Million Jahren ist die Kette knapp 3 cm lang; schnüren Sie zentimetergrosse Perlen auf, jede Sekunde eine, nach einer Million Jahren reicht die Kette von hier bis zur Sonne, und legen Sie

Erdbahn an Erdbahn, jede Sekunde eine dazu, und nach ein paar Millionen Jahren sind Sie bei den fernsten Spiralnebeln (genauer: dort, wo diese vor einigen Milliarden waren, als ihr Licht zu uns aufbrach). Ein letzter Vergleich, wir alle kennen ihn: Fern von hier auf einer Insel im Meer liegt der Diamantberg; alle 100 Jahre wetzt dort ein Vogel seinen Schnabel, und wenn der ganze Berg abgewetzt ist, ist der erste Augenblick der Ewigkeit vergangen. Der Montblanc wäre in 10^{40} sec abgewetzt (unsere Milchstrasse ist erst etwa 10^{17} sec alt!) und ebensolange müsste man Proton an Proton legen – jede Sekunde eines – um bis an die entferntesten Spiralnebel zu kommen.

Nach diesen Versuchen, das Unvorstellbare an Vorstellbares anzulehnen, wiederhole ich meine Feststellung:

Um das ungeheuer Grosse (10^{14} Erdbahndurchmesser) zu erforschen, mussten wir Kenntnisse über das ungeheuer Kleine (10^{-13} cm) erwerben.

Das Universum im Grossen befolgt die Gesetze der Makrophysik: Mechanik, Elektrodynamik, Thermodynamik, Relativitätstheorie und Hydrodynamik. Meist aber sind die Verhältnisse von denen der uns täglich umgebenden Natur so sehr verschieden, dass sie eher denen in einem kernphysikalischen Experiment gleichen, welches freilich kosmische Ausmasse annimmt. Dass dann die innerste Struktur der Materie – das ungeheuer Kleine – den Aufbau des Universums, die Entstehung der Galaxien und Sterne und deren Lebenslauf weitgehend bestimmt, liegt an eben diesen so aussergewöhnlichen Bedingungen, denen dort die Materie unterworfen wird (man sollte sagen: gewöhnlichen Bedingungen – denn im grossen gesehen leben *wir* hier unter aussergewöhnlichen!).

Unter diesen Umständen ist zu erwarten, dass jeder neue Schritt ins ganz Kleine neue Zusammenhänge im ganz Grossen erschliesst und uns auf dem Wege weiterführt, auf dem wir hoffen, zu einer Theorie zu gelangen, die das Universum im Grossen und im Kleinen einheitlich erklärt.

Der letzte Schritt ins ganz Kleine hat vor wenigen Jahren begonnen und noch kaum Konsequenzen für unser Bild vom Universum gehabt; ich glaube aber, dass das bald kommt. Mit diesem letzten Schritt meine ich die Hochenergiephysik. Liebhaber eines präzisen Stils werden bemängeln, dass der Ausdruck «letzter Schritt» falsch verstanden werden kann: Nämlich, als der letzte mögliche statt als der zuletzt getane, den ich doch wohl gemeint haben sollte.

Es liegt kein Stilfehler vor: Ich habe beide gemeint und meine sogar vor allem den letzten möglichen Schritt. Statt eines Stilfehlers handelt es sich um eine Hypothese, deren Beschreibung dieser Vortrag dienen soll. Es scheint, wir haben in der Elementarteilchenphysik eine völlig neue, eine Art Endsituation, erreicht, in der die Frage nach der Zusammensetzung der Materie eine unvorhergesehene und befriedigende Antwort erhält. Das ist eigentlich verwunderlich, denn wir kommen doch scheinbar nicht um die alte Schwierigkeit herum: Wenn immer mir jemand sagt, er habe nun endlich die wahren Atome, die Grundbausteine

aller Materie gefunden, so frage ich ihn, aus was denn diese Dinge bestehen. Man kann schon bei Kant nachlesen, in welche Sackgassen man da gerät. Und nun behaupte ich, die Hochenergiephysik habe – vielleicht! – eine endgültige Auflösung dieses Dilemmas parat? Ich möchte nicht missverstanden werden: Erstens stelle ich hier eine Behauptung auf, die nicht alle meine Kollegen akzeptieren, und zweitens behaupte ich nicht, wir seien nahe daran, nun alles über die Elementarteilchen zu wissen. Aber es zeichnet sich – von einer bestimmten Seite her gesehen – der Rahmen ab, der das Bild aufnehmen könnte.

2. Die neue Situation: Hochenergiephysik

Ich möchte Ihnen zeigen, wieso die Situation neu ist.

Die Frage: «Wie ist die Materie aufgebaut?» ist für den Naturwissenschaftler eine Aufforderung: Nimm sie auseinander, studiere die Bausteine und die Kräfte, die diese Bausteine verbindet, benutze die bereits bekannten Gesetze der Physik soweit möglich, postuliere neue Gesetze nur soweit unvermeidlich und versuche das Ganze widerspruchlos zu verbinden. So wichtig die theoretische Einsicht dabei sein mag – sie erst lässt uns verstehen, wieso das Ganze mehr als seine Teile ist — das erste und das letzte Wort spricht das Experiment; und hier heisst Experiment: zerlegen und Kräfte zwischen den Bausteinen messen, danach die Bausteine in Bausteinchen zerlegen, wieder Kräfte studieren und so fort, ohne Ende. Ohne Ende?

Wir wollen eine solche immer weitergehende Zerlegung verfolgen und dabei darauf achten, welche Energie wir aufwenden müssen, um einen gegebenen Stoff in seine Bestandteile zu zerlegen. Die «neue Situation» wird am klarsten, wenn wir die zur Zerlegung nötige Energie mit der Gesamtenergie vergleichen, die in dem betreffenden Stück Materie gespeichert ist.

Die Relativitätstheorie lehrt uns, dass in einem Stück Stoff der Masse m die Energie $E = mc^2$ enthalten ist (c = Lichtgeschwindigkeit).

Diese Behauptung ist experimentell bestätigt. Die Energie mc^2 ist ungeheuer gross, gemessen an den uns vertrauten Energien. Das werden wir gleich sehen. Wir wollen nämlich einen alltäglichen Stoff – etwa Kochsalz – in seine elementarsten Bausteine zerlegen und jedesmal die aufgewandte Energie mit der in dem zu zerlegenden Stück Stoff enthaltenen Gesamtenergie vergleichen.

Nehmen wir also einen Kochsalzkristall NaCl, etwa faustgross. Wie zerlegen wir ihn? Zunächst lassen wir ihn auf die Erde fallen; bei hartem Boden genügt etwa 1 m Fallhöhe, um ihn in hundert Stücke zerplatzen zu lassen – aber die Splitter sind noch immer Kochsalz. Um das kleinste Kochsalzstückchen, das NaCl-Molekül, in Natrium und Chlor zu zerlegen, müssen wir zu chemischen Prozessen greifen. Jahrhundertelange, vergebliche Bemühungen der Alchemisten haben gezeigt, dass man damit über die Zerlegung $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na} + \text{Cl}$ nicht hinauskommt. Man glaubte

hier wirklich an die Atome, die unteilbaren Elementarbausteine, gekommen zu sein. Die Frage war nur: Warum gibt es 90 verschiedene Atome? Wenn sie verschieden sind, müssen sie doch eine verschiedene Struktur haben, also nicht unteilbar sein. Prompt fand man ein Mittel, auch sie zu zerlegen: Man warf sie wieder auf den Boden – nur diesmal etwas heftiger; oder, was auf das gleiche hinausläuft, man bombardierte sie mit sehr schnellen Geschossen. Es stellte sich heraus, dass alle Atome aus nur drei Bausteinen bestehen: Protonen und Neutronen, die den Kern, und Elektronen, die die Hülle aufbauen. Die sehr lose gebundenen Elektronen sind für die chemischen Prozesse zuständig, die den fest zusammengesetzten Kernen nichts anhaben können – daher die Misserfolge der Alchemie. Erst die energiereichen Geschosse, die aus den modernen Teilchenbeschleunigern auf den zu untersuchenden Kern geschleudert werden, erlauben, ihn zu zerlegen. Als dies gelungen war, versuchte man den nächsten Schritt: Der Elementarbaustein des Kerns, das Nukleon (gemeinsamer Name für Proton und Neutron, die einander sehr ähnlich sind), sollte durch Stoss mit einem zweiten Nukleon aufgebrochen werden – und nun versagte die Methode auf eine Weise, die nahelegt, dass hier etwas fundamental Neues passiert.

Und jetzt wollen wir die Tabelle ansehen, in der für jeden Zerlegungsprozess angegeben ist, welcher Bruchteil der Gesamtenergie des Körpers nötig ist, um ihn zu zerlegen:

- Mechanische Zerlegung eines Kochsalzkristalls in einige Bruchstücke; Fallenlassen aus 1 m Höhe:
 1×10^{-16} der Gesamtenergie des Kristalls
- Chemische Zerlegung $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na} + \text{Cl}$:
 7×10^{-10} der Gesamtenergie des NaCl-Moleküls
- Kernzerlegung $\text{Na} \rightarrow 23$ Nukleonen:
 8×10^{-3} der Gesamtenergie des Na-Kerns
- Zerlegung Nukleon $\rightarrow ?$
 $5 \times$ Gesamtenergie reicht nicht aus!

Diese Zahlen zeigen, wie enorm die Bindungskräfte zunehmen, wenn die zu zerlegenden Objekte kleiner werden. Mit der zur Zerlegung des Kochsalzkristalls nötigen chemischen Energie könnte ich ihn 7000 km hoch heben (wenn die Erdanziehung immer die gleiche bliebe) und mit der zur Zerlegung in Nukleonen erforderlichen Energie noch 10 Millionen mal höher – und immer noch hätte ich nur knapp ein Prozent der in ihm enthaltenen Gesamtenergie $E = mc^2$ aufgebraucht.

Mit so vergleichsweise winzigen – wengleich wachsenden – Bruchteilen der Gesamtenergie gelingt es, alle uns bekannten Stoffe in die Bausteine Elektron und Nukleon zu zerlegen.

Es war vorauszusehen, dass man das Nukleon mit einem noch grösseren Bruchteil seiner Gesamtenergie würde bombardieren müssen, um es in

seine Bestandteile zu zerlegen. Also hat man Hochenergiebeschleuniger gebaut und Nukleonen mit Energien aufeinanderstossen lassen, die höher und höher geschraubt wurden und heute nicht einen Bruchteil, sondern beim neuesten sowjetrussischen Beschleuniger (70 GeV) das Fünffache der in einem Nukleon gespeicherten Gesamtenergie $E = mc^2$ erreichen: Die Nukleonen bleiben heil! Wenn höchstenergetische kosmische Strahlung auf ein Atom trifft, ist die Stossenergie sogar bis zu ein paar hundertmal grösser als die im Nukleon gespeicherte – und bisher deutet nichts darauf hin, dass dabei Nukleonen zertrümmert werden. Im Gegenteil: Es entstehen massenhaft neue Materieteilchen, darunter sogar wieder Nukleonen (und Antinukleonen); die meisten so erzeugten neuen Teilchen sind freilich instabil – sie zerfallen in unglaublich kurzer Zeit, jedoch langsam genug, dass man mit ihnen experimentieren kann. Ich will jetzt nicht auf die Eigenschaften dieser Teilchen eingehen und auf die verblüffende Weise, in der diese Eigenschaften sich in ein einfaches Schema einordnen lassen, welches nahelegt, die Nukleonen sowie alle die neuen Teilchen als aus nur drei fundamentalen Bausteinen zusammengesetzt zu denken (den sogenannten Quarks, die aber noch nie gesehen wurden und vielleicht auch nicht existieren) – diese Dinge sind in einer auch für den Nichtspezialisten verständlichen Weise in mehreren guten Artikeln in «Scientific American» und «Bild der Wissenschaft» beschrieben worden.

Ich möchte auf etwas anderes hinaus: Erstens will ich versuchen klarzumachen, dass hier wirklich etwas radikal Neues vorliegt, zweitens will ich begründen, wieso ich glaube, dass wir hier in einer Endsituation sind, die gleichwohl kein Ende bedeutet.

Zum ersten: Stellen Sie sich vor, beim Zerlegen und Zerlegen und Zerlegen der Materie sei man endlich auf kleine, ungeheuer harte Kügelchen gestossen, sagen wir so gross wie eine Erbse, die weder zu zerstören noch auf irgendeine Weise voneinander zu unterscheiden gewesen seien. Schliesslich habe man solche Kügelchen aufeinander geschossen und dabei Energien aufgewandt, die grösser gewesen seien als die Massenenergie der Kügelchen; jedoch statt zu zerbrechen, hätten sie sich in vier solche Erbsen (davon eine «Antierbse») auf geteilt – *jede genauso gross, genauso schwer, genauso hart wie die beiden ersten* – d. h. zwei seien ganz neu entstanden. Und dazu habe es noch eine Menge Splitter und Funken aus einem bisher unbekanntem Material gegeben, die aber fast augenblicklich unter Knall zersprungen und zum Teil einfach verschwunden seien, zum Teil jedoch nochmals Erbsen der oben beschriebenen Einheitsorte von sich gegeben hätten. Eine solche Situation wäre mit Recht als neuartig angesehen worden.

Für die Physiker kam sie gleichwohl nicht unerwartet: Relativitäts- und Quantenphysik hatten längst gelehrt, dass Energie und Masse äquivalent sind und sich spontan ineinander verwandeln können; setzt man also in einem Stoss Energie frei, so kann sie als Materie auftreten, falls nur der Energiebetrag grösser ist als die Massenenergie mc^2 des neu zu erzeugenden Teilchens.

3. Die Hohlraumstrahlung

Ich muss nun einen Begriff einführen, der in der Physik eine grosse Rolle gespielt hat: An ihm geriet die klassische Physik ins Scheitern, denn er hat PLANCK zur Quantenhypothese gezwungen und damit die Revolution der Physik eingeleitet, die in der Formulierung der Quantentheorie gipfelte und der bisher keine vergleichbare Revolution mehr gefolgt ist. Ich meine den Begriff der «Hohlraumstrahlung».

Wenn man einen völlig leeren Kasten – einen Hohlraum – in ein Wärmebad der Temperatur T steckt, so bleibt er nicht leer, sondern füllt sich mit elektromagnetischer Strahlung an, deren spektrale Zusammensetzung, d.h. die Verteilung auf die verschiedenen Wellenlängen (Radiowellen, Wärme, Licht, UV-Licht, Röntgenstrahlung), durch das Plancksche Strahlungsgesetz genau beschrieben wird. Diese spektrale Zusammensetzung hängt von der Temperatur ab; in der Tat messen wir sehr hohe Temperaturen und/oder solche weit entfernter Objekte (Sterne), indem wir studieren, wie die Strahlung sich über das Spektrum verteilt. Aber nicht nur die spektrale Verteilung, auch die Intensität der Strahlung hängt von der Temperatur ab. So nämlich, dass die gesamte ausgestrahlte Energie proportional zu T^4 ist; oder, was mir besser passt: die Temperatur ist der vierten Wurzel aus der Strahlungsenergie proportional: Wenn die Energie auf das 16fache gestiegen ist, hat sich die Temperatur gerade nur verdoppelt. Aus dem täglichen Leben sind wir gewohnt, dass im grossen und ganzen (d.h. abgesehen von chemischen und Phasenumwandlungen: Schmelzen, Kochen) die Wärmeenergie etwa proportional zur Temperatur ansteigt, d.h. 16fache Wärmeenergie auch 16fache Temperatur bedeutet. Das kommt daher, dass Wärme nichts anderes als ungeordnete Bewegung der Moleküle ist und, da deren Zahl (normalerweise) konstant bleibt, alle zugeführte Energie sich als Wärme wiederfindet und die Temperatur proportional erhöht: Temperatur ist definiert als Mass für die mittlere Bewegungsenergie pro Molekül. Im Strahlungsfeld – auch Lichtquantengas genannt – bleibt die Zahl der «Moleküle», nämlich der Lichtquanten, jedoch keineswegs konstant: Es entstehen ihrer um so mehr, je höher die Temperatur wird, also je mehr Energie ich zuführe. Es müssen sich dann mehr Lichtquanten, als ursprünglich vorhanden waren, in die neu zugeführte Energie teilen; daher bekommt jedes nur einen kleineren Anteil für sich, als es bekommen hätte, wäre ihre Zahl konstant geblieben. Da Temperatur = mittlere Energie pro Lichtquant, ist die Temperatur langsamer gestiegen als im Fall der konstanten Teilchenzahl; ein Teil ist eben in der Erzeugung neuer Lichtquanten investiert worden. Rechnet man das alles genau nach, so findet man das Stefan-Boltzmannsche Gesetz $T = \text{const} \cdot \sqrt[4]{E}$.

Was hat das mit unseren unzerstörbaren Nukleonen und den neu erzeugten Teilchen zu tun?

Wir haben lediglich den Begriff der Hohlraumstrahlung zu erweitern: Wer sagt denn, dass die Strahlung nur aus Lichtquanten bestehen darf? Es gibt kein Gesetz in der Physik, welches verbietet, dass materielle Teil-

chen in dieser Strahlung auftreten dürfen. Ja, die Relativitäts- und Quantentheorie fordern es geradezu: Wenn $E \geq mc^2$, kann ein Teilchen der Masse m spontan entstehen (es gibt da gewisse einschränkende Erhaltungssätze, die aber am Prinzip nichts ändern). Wenn wir also die Temperatur unseres Kastens weiter und weiter steigern, werden in der Strahlung notwendig irgendwann materielle Teilchen (und Antiteilchen) auftreten, und zwar im Prinzip von jeder beliebigen Sorte. Freilich: die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen der Masse m vorzufinden, nimmt mit wachsender Masse ungeheuer schnell ab (nämlich exponentiell).

Studiert man Stossprozesse bei sehr hoher Energie quantitativ, so stellt sich heraus, dass die neu erzeugten Teilchen eben dieselbe Energie- und Winkelverteilung haben, die sie hätten, wenn sie aus einer Hohlraumstrahlung sehr hoher Temperatur stammten¹ (wobei in unserem Zusammenhang nicht interessiert, dass der strahlende Hohlraum sich ausserdem selbst bewegt). Daher kann man diese Temperatur bestimmen, indem man das Plancksche Strahlungsgesetz auf die Strahlung materieller Teilchen ausdehnt: Für jede Plancksche spektrale Energieverteilung gibt es einen bestimmten Temperaturwert T , und man braucht nur die Energieverteilung der in einem bestimmten Stossprozess neu erzeugten Teilchen zu messen, um zu wissen, welche Temperatur beim Zusammenstoss der beiden Geschosse erreicht wurde. Wir können also über die Temperatur, die während der unvorstellbar kurzen Stosszeit von 10^{-23} sec in dem unvorstellbar kleinen Raumgebiet von 10^{-13} cm Radius geherrscht hat², eine ebenso sichere Aussage machen wie über die Temperatur der Oberfläche des Sirius oder des Inneren eines Hochofens. Da die Stossenergie ein Mehrfaches der Massenenergie der stossenden Teilchen beträgt, ist es nicht verwunderlich, dass die so gemessenen Temperaturen alles auf der Erde und am Himmel Bekannte weit, weit übertreffen: Diese Temperaturen (im CERN täglich in Milliarden von Zusammenstössen erzeugt) sind von der Grössenordnung 10^{12} °K. Man versuche sich das vorzustellen: Ein Ofen, der jede Sekunde um 1° heisser wird, würde nach $1\frac{1}{2}$ min Wasser zum Kochen bringen, nach $1\frac{1}{2}$ Std. die Oberflächentemperatur der Sonne, nach einem Jahr deren Innentemperatur, aber erst nach 100000 Jahren die Temperatur erreicht haben, von der wir in der Hochenergiephysik reden!

4. Höchste Temperatur = Siedepunkt der Urmaterie?

Ich sage: Es ist nicht verwunderlich, dass diese Temperatur so hoch ist – im Gegenteil, man hätte erwartet, dass sie viel höher sei und insbesondere dass sie mit der Energie der zusammenstossenden Teilchen anwachsen sollte. So nämlich, wie man es von der Hohlraumstrahlung – und um die handelt es sich ja hier – weiss, also mit etwa der vierten

¹ E. FERMI hat als erster diese Interpretation gegeben.

² 10^{-23} sec ist die Zeit, die das Licht braucht, um das Nukleon (10^{-13} cm) zu durch-eilen.

Wurzel aus der Energie. Stattdessen bleibt sie (von noch nicht recht verstandenen Ausnahmen abgesehen) einfach konstant; genauer: wenn die Stossenergie immer weiter wächst, strebt die Temperatur einem endlichen Grenzwert T_0 zu ($1,8 \times 10^{12}$ °K entsprechend 160 MeV).

Und nun scheint es, dass dieser Umstand ausserordentlich bedeutsam ist und darauf hinweist, dass wir beim Zerlegen der Materie an ein unvorhergesehenes Ende gekommen sind, das gleichwohl kein Ende ist.

Nämlich: die Temperatur der gewöhnlichen Hohlraumstrahlung wächst nur mit der vierten Wurzel der Energie, also recht langsam an, weil ein grosser Teil der Energie statt zur Erhöhung der Temperatur zur Erzeugung neuer Lichtquanten verbraucht wird. Im Fall der in der Hochenergiephysik auftretenden materiellen Hohlraumstrahlung stehen aber nicht nur Lichtquanten, sondern neue Sorten von Teilchen zur Verfügung, und jede Sorte erhebt Anspruch darauf, dass ihr ein Teil der Gesamtenergie zufällt, um ihre Delegation zu erzeugen und in die Diskussion über das Strahlungsgleichgewicht zu entsenden. Je mehr solche Delegationen erforderlich werden – d. h., je mehr verschiedene *Sorten* von «Elementarteilchen» es gibt –, um so weniger Energie erhält jede einzelne und um so weniger bleibt übrig, um die Temperatur zu erhöhen. Nun gibt es in der Tat sehr viele verschiedene Sorten von Teilchen, die in einem hochenergetischen Zusammenstoss erzeugt werden können – man kennt schon über 100 neue «Elementarteilchen» – und alle haben voneinander verschiedene Masse. Um den jetzt erforderlichen Begriff des Massenspektrums zu erläutern, möchte ich einen abwegig scheinenden, aber zutreffenden Vergleich einführen, nämlich den mit Büchern. Es gibt viele verschiedene Titel, jeder hat einen festen Preis (haben zwei den gleichen Preis, so kann man eine weitere unterscheidende Eigenschaft aufführen). Ich vergleiche nun: Buchtitel mit Teilchensorte; Preis mit Teilchenmasse; Auflage mit der Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen dieser Sorte vorzufinden. Ebenso wie man nun – ohne auf die Inhalte der Bücher einzugehen – eine Statistik aufstellen kann, indem man fragt: Wie viele verschiedene Bücher gibt es in jedem gegebenen Preisintervall (also zwischen Fr. 10.— und Fr. 11.— oder zwischen Fr. 31.50 und Fr. 36.75), ebenso kann man die Mächtigkeit des Vorrats an verschiedenen Sorten von «Elementarteilchen» – ohne auf ihre individuellen Eigenschaften einzugehen – charakterisieren, indem man angibt, wie viele Sorten es in jedem Massenintervall gibt; man nennt eine solche Verteilung ein «Massenspektrum», ebenso wie man vom Spektrum der Literatur spricht.

Offenbar wird nun das Strahlungsgleichgewicht in unserem heissen Hohlraum vom Massenspektrum der beteiligten materiellen Teilchen abhängen: Je mehr verschiedene Sorten es gibt, um so weniger wird bei gleicher zugeführter Energie die Temperatur ansteigen. Die präzisen Begriffe «Massenspektrum» und «Strahlungsgleichgewicht im Hohlraum» gestatten nun eine mathematische Behandlung des Problems.

Resultat: Wenn das Massenspektrum der beteiligten «Elementarteilchen» in ganz bestimmter Weise ungeheuer stark zunimmt, dann kann die Temperatur nie über einen festen Grenzwert hinaus wachsen. Diese

Grenztemperatur T_0 taucht als repräsentative Konstante in der mathematischen Beschreibung des Massenspektrums auf: Wenn man in immer gleichlangen Schritten $\Delta m = 2,4 \cdot T_0$ zu höheren Massen aufsteigt, kommen mit jedem neuen Schritt 10mal mehr neue Teilchensorten in den Blick als bei allen bisherigen Schritten zusammengenommen. Man sagt, das Massenspektrum wächst exponentiell wie e^{m/T_0} .

Das können wir nun experimentell nachprüfen: Die im Hochenergieexperiment gemessene Temperatur (die immer nahe beim Grenzwert T_0 liegt) müsste man wiederfinden, wenn man die im Experiment beobachteten neu erzeugten «Elementarteilchen» in ein Massenspektrum sortiert und aus ihm die Konstante T_0 abliest. Natürlich können wir immer nur einen kleinen, auf niedere Massen beschränkten Teil dieses Spektrums beobachten (bei den grösseren Massen geht die «Auflage» rapide zurück, wiederum exponentiell). Man findet:

Soweit das Massenspektrum annähernd vollständig bekannt ist, wächst es in genau der Weise, wie es die Existenz einer Grenztemperatur erfordert, und die Konstante T_0 stimmt numerisch überein mit der gefundenen oberen Schranke der im Zusammenstoss gemessenen Temperaturen.

Nun sind uns einige Grenztemperaturen aus dem täglichen Leben vertraut, am besten vielleicht die des kochenden Wassers: Gleichgültig wie heiss ich den Ofen mache, kochendes Wasser hat (bei normalem Luftdruck) immer gerade 100 °C. Warum? Weil alle zugeführte Wärmeenergie verbraucht wird, um Wassermoleküle aus der Flüssigkeit herauszuheben. Natürlich gehen bei jeder Temperatur Moleküle aus der Flüssigkeit in den Dampf über, und im allgemeinen wird zugeführte Energie aufgeteilt zwischen den beiden Mechanismen, die sich um sie streiten: Temperaturerhöhung und Verdampfung. Bei wachsender Temperatur wird es für ein Molekül aber immer leichter, sich von der Flüssigkeit zu lösen, und wenn sich die Temperatur dem Siedepunkt nähert, wird es so leicht, dass sie alle hinauswollen und auch wirklich nacheinander hinausgehen. Dabei brauchen sie die ganze zugeführte Wärme für sich und lassen den noch Zurückbleibenden nichts, um ihre Temperatur zu erhöhen.

Ganz ähnlich kommt die Grenztemperatur im hochenergetischen Stoss zustande: Man muss nur die Worte «die Flüssigkeit verlassen» ersetzen durch «den Sprung vom Nichtsein ins Sein tun». Zu diesem Sprung braucht ein Teilchen der Masse m die Energie mc^2 , und wenn es so viele verschiedene Teilchen gibt wie oben beschrieben, dann wird die Geburtsrate bei wachsender Temperatur irgendwann so gross, dass die vielen erforderlichen Beträge mc^2 alle Energiezufuhr aufbrauchen und den schon geborenen Teilchen nichts übriglassen, um ihre gemeinsame Temperatur zu erhöhen. Wegen dieser Analogie spreche ich von «siedender Urmaterie».

Freilich: Wenn alles Wasser verkocht ist, wird weitere Energiezufuhr die Temperatur des Dampfes erhöhen. Alles Wasser kann verkochen,

denn eine gegebene Wassermenge hat eine feste Molekülzahl. Unsere siedende Urmaterie kann nie verkochen, *denn es ist die zugeführte Energie selbst*, die sich materialisiert und so dafür sorgt, dass immer neue Teilchen geboren werden. Also kann auch nie der Vorgang eintreten, der dem weiteren Erhitzen des Wasserdampfes entspricht.

Wenn diese Überlegungen richtig sind und wir mit der experimentellen Grenztemperatur T_0 und dem anwachsenden Massenspektrum nicht von der Natur in eine Falle gelockt worden sind (was durch diese Experimente prinzipiell nie ausgeschlossen werden kann), dann ist $T_0 = 1,8 \times 10^{12}$ °K die höchste überhaupt mögliche Temperatur eines stationären thermodynamischen Gleichgewichts. Gelegentliche Überschreitungen von T_0 , die dem wohlbekanntem Siedeverzug analog wären, sind wahrscheinlich.

5. Wird die Frage nach den «letzten Bausteinen» sinnlos?

Es bleibt die letzte Frage: Nehmen wir einmal an, das wäre alles richtig; es gäbe also ein unendliches Massenspektrum neuer Teilchen und eine entsprechende Grenztemperatur – was hat das mit der angekündigten Endsituation zu tun, die doch kein Ende bedeuten soll? Hier begeben wir uns auf das Gebiet der Spekulation, der theoretischen Konstruktion, die aus einer begrenzten Zahl von experimentellen Befunden eine Regel abstrahiert, die dann versuchsweise als allgemeingültiges Prinzip postuliert wird. Damit ist die übliche logische Situation der theoretischen Physik geschaffen: Wir haben ein Modell, dessen weitere Eigenschaften mit den etablierten Methoden der Mathematik und der Annahme, dass im übrigen nur die bereits bekannten Naturgesetze gelten, analytisch abzuleiten sind. So werden experimentell überprüfbare Voraussagen gewonnen oder bereits bekanntes Verhalten erklärt. Übereinstimmung der Voraussagen mit den Fakten ist notwendig, aber nicht hinreichend dafür, dass das Modell stimmt. Das gilt insbesondere für das im Folgenden dargestellte Modell.

Um es in Worten zu beschreiben, muss ich mich weit weniger genau ausdrücken, als es die technischen Hilfsmittel der theoretischen Physik erlauben würden. Ich will aber um jeden Preis den Fachjargon zu vermeiden trachten.

Im hochenergetischen Stoss werden massenhaft neue materielle Teilchen erzeugt (Ereignisse mit hundert und mehr wurden beobachtet). In unserer Terminologie kommen sie aus der im Zusammenstoss erzeugten siedenden Urmaterie. In gewissem (physikalisch durchaus präzisiertem) Sinn waren sie also alle in diesem Stück siedender Urmaterie enthalten. Nimmt man nun eines dieser neuerzeugten Teilchen unter die Lupe (was nicht einfach ist: Lebensdauer $\approx 10^{-23}$ sec), so sieht man, dass es sich selbst wie siedende Urmaterie verhält, nämlich weiter in viele Teilchen zerfallen kann. Diese Tendenz wächst, je grösser seine Masse ist. Solch ein Teilchen mit grosser Masse hat also eine Doppelnatur: Einerseits kann

es als «Elementarteilchen» am Strahlungsgleichgewicht teilnehmen, andererseits kann es selber als ein aus anderen «Elementarteilchen» bestehendes Strahlungsgleichgewicht angesehen werden. Insofern kann man keines dieser Teilchen als elementar bezeichnen, da es ja wiederum aus anderen solchen Teilchen besteht, die selbst um kein bisschen elementarer sind: Jedes besteht gleichzeitig aus allen anderen. Freilich nicht in gleichmässiger Zusammensetzung. So könnten die obenerwähnten Quarks, aus denen «alles aufgebaut ist», ruhig eines Tages entdeckt werden: Sie würden in diesem Bild lediglich eine Vorzugsrolle spielen. Übrigens ist charakteristisch für dieses «Bestehen-aus», dass Zahl und Art der Bausteine irgendeines solchen Teilchens unbestimmt bleiben; es setzt sich einmal so, einmal so zusammen.

Das Modell besteht nun darin, dieses an der begrenzten Zahl bisher bekannter Elementarteilchen beobachtete Verhalten, das mit wachsender Masse immer deutlicher wird, für weiter wachsende Masse (wo wir experimentell noch nichts wissen) als Prinzip zu postulieren. Hat man das einmal getan, so kann man beinahe alles weitere aus den Lehrbüchern der statistischen Thermodynamik abschreiben. Das überraschende Resultat lautet:

Das Massenspektrum dieser Teilchen wächst in genau der Weise (exponentiell) an, die eine absolut höchste Temperatur zur Folge hat.

Damit schliesst sich der Kreis:

- Die Eigenschaft der neuen «Elementarteilchen», dass jedes gleichzeitig in stets wechselnder Weise aus allen anderen besteht
- die mit der Masse ungeheuer (exponentiell) anwachsende Zahl verschiedener Sorten solcher «Elementarteilchen»
- die Existenz eines «Siedepunkts» für diese Urmaterie

Diese drei anscheinend so verschiedenen Dinge stellen sich nur als die verschiedenen Erscheinungsformen einer einzigen Ureigenschaft heraus – wenigstens, wenn man irgendeine dieser drei als allgemein, d. h. nicht nur in dem zurzeit bekannten experimentellen Bereich gültig postuliert. Ein theoretisches Modell, das, wie dieses, das Verhalten im Unendlichen aus dem im Endlichen Bekannten extrapoliert und als Postulat einführt, kann nicht bewiesen werden. Seine Widerspruchsfreiheit, seine formale Einfachheit und die Tatsache, dass seine detaillierten quantitativen Vorhersagen im bisher zugänglichen Experimentierbereich stimmen, macht es interessant und bis auf weiteres glaubwürdig. Sollte es richtig sein, so hebt sich die alte Frage nach den endgültigen letzten Bausteinen der Materie selbst auf: Sie ist in einen endlosen Kreis eingemündet. Nochmals der Vergleich mit Büchern: Es gibt kein «Elementarbuch», aus dem alle anderen aufgebaut sind. Und wenn nur zwei Bücher heftig genug aufeinanderstossen, entstehen spontan viele neue – jedes aber enthält jedes andere irgendwie in sich.

Bevor ich die letzte Frage beantworte: Was hat das alles mit «Evolution der Materie» zu tun? noch ein paar Bemerkungen.

a) Die beschriebene Situation ist typisch für die Physik der «starken Wechselwirkung», an der alle Nukleonen und die für die Kernkräfte verantwortlichen Teilchen teilnehmen. Das Elektron z.B. kümmert sich nicht darum. Der Grund ist: Die starken Wechselwirkungen lassen den elektromagnetischen und schwächeren Kräften in einem so kurzen Zusammenstoß gar keine Zeit, sich am Gleichgewicht zu beteiligen; ehe sie aufwachen, ist alles sozusagen schon seit ein paar Millionen Jahren vorbei.

b) Die hier beschriebene Spekulation postuliert, was für unendlich grosse Massen passieren soll, indem es das extrapoliert, was bei endlichen Massen beobachtet wird. Es gibt ein technisch völlig verschiedenes, in der physikalischen Idee aber sehr verwandtes Verfahren, nach der anderen Seite, nämlich zu den stabilen «Elementarteilchen» Nukleon, Mesonen (stabil unter starker Wechselwirkung) zu extrapolieren und auch hier eine Beschreibung zu versuchen, bei der jedes solche Elementarteilchen gleichzeitig aus allen anderen besteht: Dies ist die sogenannte «Bootstrap-Theorie», auf deutsch am besten «Münchhausen-Theorie». Wie jener Herr versucht man nämlich, sich am eigenen Haar aus dem Sumpf zu ziehen. Ich halte dieses Modell für prinzipiell richtig – es ist im Grunde dasselbe, wie das oben beschriebene – aber es hat, wie ich glaube, wegen eines technischen Fehlers bisher nicht recht funktioniert: Man hat meist nur die paar untersten Massen in eine solche selbstkonsistente Zirkelrechnung aufgenommen, je mehr man mitnimmt, um so besser geht's. Es gehören aber wohl *alle* hinein. In der Tat: Erst wenn man sagt, Münchhausen habe so stark an seinen Haaren gezogen, dass nicht nur er, sondern mit ihm der Sumpf, die Erde, die ganze Welt ein Stück verschoben worden seien – dann kann man eigentlich nichts mehr einwenden.

c) Es ist bemerkenswert, dass in der heutigen Elementarteilchenphysik (oder Hochenergiephysik – wir haben gesehen, dass das dasselbe ist) kein Anzeichen dafür existiert, dass die bisherige Relativitäts- und Quantentheorie in irgendeiner revolutionären Weise zu korrigieren oder zu erweitern wären; und das, obwohl wir uns in einer neuen Situation befinden.

d) Nach meinem Bericht könnte es scheinen, als sei damit ein Ende der Elementarteilchenphysik gekommen. Abgesehen davon, dass es sich teilweise um Hypothesen handelt: Selbst wenn alles stimmte, wären wir nicht an einem Ende, sondern an einem neuen Anfang: In allen obigen Überlegungen war nur von starker Wechselwirkung, aber nicht von speziellen Kräften, nur von der stets wechselnden Zusammensetzung der «Elementarteilchen», nie von ihren individuellen Eigenschaften die Rede – und unsere Schlüsse sind von diesen Dingen sogar völlig unabhängig. Wir haben das Verhalten im grossen und ganzen, nämlich das statistische Verhalten, beschrieben. Das Hauptaugenmerk der Hochenergiephysik liegt aber eben auf diesen individuellen Eigenschaften der neuen Teilchen, den Kräften zwischen ihnen und der Frage: Warum gerade *diese*? Und da stehen wir am Anfang.

e) Viele Physiker glauben nach wie vor an die Möglichkeit, weiter und

weiter zu immer elementarerer Bausteinen vorzudringen. Man muss dieser Linie experimentell folgen und sich nicht von einer intellektuell noch so befriedigenden Spekulation verleiten lassen, die Frage für erledigt zu halten.

f) Ich habe mich bemüht, alles in unserer Alltagssprache zu beschreiben, in Worten, die auch wir Physiker benutzen, wenn wir über solche Dinge beim Tee reden. Ihnen muss notwendig vieles mysteriös vorkommen, besonders die Behauptung, dass jedes «Elementarteilchen» in stets wechselnder Weise aus allen anderen besteht. Nehmen Sie es als eine Als-Ob-Sprechweise, als ein verschwommenes Bild dessen, was sich im Fachjargon und mit Hilfe der Mathematik in wenigen Zeilen präzise formulieren lässt.

Ich glaube, Ihnen mit diesem Bericht ganz nebenbei verständlich gemacht zu haben, warum wir Hochenergiephysiker so dringend nach dem neuen grossen europäischen 300-GeV-Beschleuniger verlangt haben, der nun wahrscheinlich gebaut werden wird.

6. Mögliche Konsequenzen im Grossen?

Was hat das alles mit der Evolution der Materie zu tun? Wenigstens einige Theorien der Entstehung des Universums nehmen einen «Urknall» an, eine Schöpfungsexplosion sozusagen. Nach bisherigen Vorstellungen – basierend auf der althergebrachten Hohlraumstrahlung – begann das Universum mit unendlich hoher Energiedichte, einem dieser Energiedichte proportionalen Druck und unendlich hoher Temperatur. Unter solchen extremen Verhältnissen gibt es aber die alte Hohlraumstrahlung gar nicht mehr, sondern vielmehr diejenige, die im hochenergetischen Zusammenstoss von Nukleonen herrscht. Und dann ist die Temperatur nicht unendlich, sondern nur etwa 10^{12} °K, und der Druck nicht mehr der Energiedichte, sondern nur ihrem Logarithmus proportional. Dann aber hätten die Anfänge des Universums anders ausgesehen, als man bisher annahm: nämlich so, wie in Experimenten bei CERN, wo ein Proton mit einem anderen für 10^{-23} sec zu siedender Urmaterie verschmilzt. Ja, es ist nicht auszuschliessen, dass es ganze Sterne, bestehend aus siedender Urmaterie, gibt.

Nun kann man immerhin sagen, dieser Urknall, mit dem alles, auch die Zeit, angefangen hat, sei eine ebenso unbefriedigende Annahme wie die der Existenz allerletzter Bausteine der Materie. Denn so wie man dort fragt: Und woraus bestehen denn die?, so kann man hier fragen: Und was war vorher? Wie kam es dazu? Wir wissen es nicht. Vielleicht aber finden wir eines Tages, dass diese Frage auf ganz ähnliche Weise gegenstandslos wird wie – möglicherweise – die nach dem letzten Baustein.

Ich schliesse mit einer Anekdote: Am Schwarzen Brett einer deutschen Universität war einmal unter den Vorlesungsankündigungen zu lesen:

Dienstags von 9–11 Uhr, privatissime und gratis: Übungen im Aufbau des Universums – nur für Fortgeschrittene. gez. xxx

Wir aber werden immer Anfänger bleiben.