Der Aufbau der Sonne.

Von

Prof. Dr. Adolf Hnatek.

Vortrag, gehalten am 19. Februar 1936.

Kurz nach der im Jahre 1610 erfolgten Erfindung des Fernrohrs wurden die Sonnenflecken nahezu gleichzeitig von Galilei, Scheiner und Fabritius entdeckt. Diese Entdeckung brachte es mit sich, daß man zunächst nach einer Erklärung dafür suchte, was man sich unter diesen dunklen Flecken auf der Sonnenscheibe vorzustellen habe, und zwangsläufig mußte man dann dabei auch zu Vorstellungen über die Konstitution des Sonnenkörpers geführt werden. Daß die Sonnenflecken dunkle Flecken sind, war offenbar die Ursache, daß man sich die Sonne zunächst als einen an sich dunklen Körper vorstellte, der von einer Art Hülle blendenden Lichtes umgeben sei. Der erste, der diese Meinung äußerte, dürfte der Franzose Cassini gewesen sein, der die Sonnenflecken für die Spitzen hoher, auf der Oberfläche der dunklen Sonnenkugel stehender Berge hielt, die zeitweise aus dieser Lichthülle herausragen.

Fast immer bestehen die Sonnenflecken aus zwei Teilen, nämlich einem besonders dunklen Kern, den man *Kernschatten* oder *Umbra* nennt, und aus einer diesen Kern umgebenden Zone geringerer Dunkelheit, dem sogenannten Halbschatten oder der *Penumbra*. Infolge der Rotation des Sonnenkörpers tauchen diese Fleckengebilde am Ostrand der

Sonnenscheibe auf, und sie ziehen dann in rund 12 bis 13 Tagen quer über die Sonnenscheibe gegen den Westrand derselben, wo sie dann wieder auf die Rückseite der Sonnenkugel gelangen und für uns verschwinden. In der Mehrzahl der Fälle zeigen die Sonnenflecken während dieser Wanderung über die Sonnenscheibe ganz typische Formveränderungen. Jeder Sonnenfleck, der auf der Mitte der Sonnenscheibe, wo wir fast senkrecht auf ihn blicken, nahezu kreisrund erscheint, wird natürlich am Sonnenrand wegen der dort schrägen Aufsicht immer perspektivisch zur Ellipse verzeichnet erscheinen müssen. Gleichzeitig zeigt sich dann aber auch fast immer die Umbra in der Penumbra mehr oder weniger stark in der Richtung gegen die Mitte der Sonnenscheibe verlagert, und es entsteht dadurch der Eindruck, als wären die Sonnenflecken nichts anderes als trichterförmige Einsenkungen, Vertiefungen in der Sonnenoberfläche.

In der Tat würden wir eine solche trichterförmige Vertiefung bis nahe senkrechter Aufsicht in den Trichter, also auf der Mitte der Sonnenkugel, so sehen, daß das Trichterloch als Umbra gleichmäßig umgeben erscheint von der die Penumbra vorstellenden Trichterwand. Am Sonnenrand dagegen, wo wir schräg von der Seite her in den von der Mitte der Sonnenscheibe abgewendeten Trichter blicken, müßte die äußere Trichterwand verbreitert, die innere verschmälert und das Trichterloch scheinbar gegen die Mitte der Sonnenscheibe verschoben erscheinen.

Diese von dem Engländer Wilson entdeckte und danach Wilsonsches Phänomen genannte Erscheinung hat ihren Entdecker im Jahre 1769 zur Anschauung geführt, daß über dem dunklen Sonnenkörper zwei Schichten leuchtender Wolken liegen, deren untere etwas weniger hell leuchtet, während der äußeren oberen die blendende Helligkeit zuzuschreiben sei, die wir an der Sonnenscheibe beobachten. Reißen diese Wolkendecken irgendwo auf, so sehen wir dann durch die Wolkenlücke den dunklen Sonnenkörper als Kern eines Sonnenflecks, und wenn das Loch in der äußeren Wolkendecke größer ist als das in der unteren, so erscheint uns dieser Kern dazu noch umgeben von den weniger leuchtenden Teilen der unteren Wolkendecken als Halbschatten.

Heute wissen wir, daß die Sonnenflecken Wirbelgebiete in der gasigen Sonnenoberfläche sind, die eine gewisse entfernte Ähnlichkeit mit den wirbelartigen Tiefdruckgebieten in unserer Atmosphäre besitzen, Wirbelgebiete, in denen die Sonnengase aber oben einströmen und unten ausströmen. Auch solche Gaswirbel erscheinen ja im durchgehenden Licht dunkel, und der Kernschatten eines Sonnenflecks kommt dadurch zustande, daß eben die Wirbelbewegung im Innern eines solchen Wirbels besonders turbulent ist. Aber die Wilsonsche Vorstellung von der an sich dunklen Sonne, die von zwei hellglänzenden Wolkendecken umgeben ist, hat sich noch bis zu Beginn der sechziger Jahre des vorigen Jahrhunderts halten können, also bis zu der Zeit, wo Kirchhoff gezeigt hat, wie das Sonnenspektrum richtig gedeutet werden muß. Läßt man Sonnenlicht durch ein Prisma hindurchgehen, so wird es bekanntlich in seine farbigen Bestandteile, in das sogenannte Spektrum, zerlegt. Wir sehen dann ein kontinuierliches Farbenband, in dem alle Regenbogenfarben von Rot bis Violett durch alle Zwischennuancen hindurch aufeinander folgen, und außerdem zeigt sich dieses Farbenband quer zur Farbenfolge noch durchzogen von einer großen Anzahl mehr oder weniger breiter und dunkler Linien. Das kontinuierliche Farbenband rührt von dem Licht her, das aus dem Sonneninnern kommt, und da ein solches kontinuierliches Spektrum immer von einem festen oder flüssigen glühenden Körper oder auch von einem glühenden Gas geliefert wird, das stark verdichtet ist, so muß also der Sonnenkern offenbar selbst glühend sein. Die dunklen Linien aber, die zu Beginn des vorigen Jahrhunderts von dem Münchner Optiker Fraunhofer ihrer Lage im Spektrum nach genauer vermessen worden sind und daher Fraunhofersche Linien genannt werden, entstehen in den über dem Sonnenkern lagernden Atmosphärenschichten ebenfalls glühender Gase, die sich dort aber bereits im Zustand entsprechender Verdünnung befinden. Jedes Gas zeichnet in das Spektrum eine Anzahl von Linien ein, die für dieses Gas typisch sind, so daß aus dem Auftreten bestimmter Linien auch auf das Vorhandensein eines bestimmten Gases geschlossen werden muß. Aus den Fraunhoferschen Linien läßt sich also auch die chemische Zusammensetzung der Sonnenatmosphäre ermitteln. Wasserstoff, Kalzium, Eisen und Titan, überhaupt fast alle chemischen Elemente, sind danach in der Sonnenatmosphäre und damit wohl auch im Sonnenkörper vorhanden. Was sagt uns das Spektrum nun weiter über die Konstitution des Sonnenballs?

Kirchhoff, der Begründer der Spektralanalyse, hielt den Sonnenkern einfach für glühend fest oder flüssig, und die Sonnenflecken wären nach ihm als Wolkenbildungen in der den Kern umgebenden glühenden Sonnenatmosphäre zu deuten, die durch lokale Temperaturerniedrigungen entstehen und deren besonders dichte mittlere und untere Teile die Umbra bilden, während die dünneren oberen Partien als Penumbra erscheinen. Zöllner, der um dieselbe Zeit lebte, hielt den Sonnenkörper für durch und durch flüssig und umgeben von einer Atmosphäre, in der eine kumulusartige (Cumulus = Haufenwolke) Wolkendecke schwebt. Wenn die Wolkendecke an irgendeiner Stelle reißt, verursacht dann die Ausstrahlung in den Weltraum durch die Lücke hindurch Abkühlung und Schlackenbildung auf dem flüssigen Sonnenkern, und diese kälteren, also auch dunkleren Schlacken wären dann das, was wir als Sonnenflecken erblicken. Aber schon damals hat es nicht an Astrophysikern gefehlt, die den Sonnenkörper für durch und durch gasförmig hielten. So hat der Italiener

Secchi schon 1877 darauf hingewiesen, daß die Temperatur des ganzen Sonnenkörpers offenbar so hoch sei, daß es auch beim größten Druck, der im Sonneninnern herrschen möge, zu einer Verflüssigung der gasförmigen Sonnenmaterie überhaupt nicht mehr kommen könne. Tatsächlich gelingt ja auch die Verflüssigung von Gasen durch Drucksteigerung im physikalischen Laboratorium nur dann, wenn dabei eine gewisse Höchsttemperatur, die sogenannte kritische Temperatur, nicht überschritten wird. Nach den Laboratoriumserfahrungen liegen diese kritischen Temperaturen für die einzelnen Gase zudem noch keineswegs hoch, ja in den meisten Fällen müssen die betreffenden Gase sogar sehr tief abgekühlt werden, wenn ihre Verflüssigung möglich werden soll. Mit Rücksicht darauf, daß die Temperatur der Sonnenoberfläche, also die sogenannte wirksame oder effektive Temperatur, die wir bei der Sonne aus der von ihr ausgestrahlten Wärmemenge exakt messen können, bei rund 6000° liegt, gewinnt der Gedanke, die Sonne sei durch und durch gasförmig, also sehr an Wahrscheinlichkeit, um so mehr, als wir ja dazu weiter annehmen müssen, daß die Temperatur nach dem Sonneninnern zu offenbar noch stark ansteigen wird, so daß wir im Sonnenmittelpunkt, wie sich später zeigen wird, wohl Temperaturen von mehreren Millionen Graden werden zu erwarten haben.

Aber die Vorstellung von einer durch und durch gasförmigen Sonne bringt sofort eine Schwierigkeit mit sich. In einem solchen glühenden Gasball steigt natürlich die Dichte von außen nach innen stetig an, und man könnte da denken, daß uns die Sonne statt der scharf gerandeten Scheibe, die sie uns zeigt, als verwaschenes Gebilde erscheinen müßte, in dem die Helligkeit von der Mitte gegen den Rand stetig abnimmt, um schließlich langsam in die Helligkeit des die Sonne umgebenden Tageshimmels überzugehen. Es fragt sich also, wie man unter der Annahme einer durchaus gasigen Beschaffenheit des Sonnenkörpers die Beobachtungstatsache des scharfen Sonnenrandes erklären soll.

Schmidt hat zu dem Zweck den Gang der Lichtstrahlen in den äußeren Schichten einer solchen Gaskugel genauer verfolgt. Wenn ein Lichtstrahl aus einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium übergeht, so wird er an der Trennungsfläche der beiden Medien immer so gebrochen, daß er sich dabei mehr der zur Trennungsfläche Senkrechten, dem sogenannten Einfallslot, nähert. Das hat in einem kugelförmig geschichteten Medium von nach innen zu stetig wachsender Dichte zur Folge, daß sich ein Lichtstrahl bei schrägem Eindringen in die Gaskugel krümmt, und zwar so, als würde er von deren Mittelpunkt angezogen werden. Diese Krümmung wird natürlich um so beträchtlicher sein müssen, je rascher die Dichte in der Gaskugel von außen nach innen zu wächst. Umgekehrt gelten diese Verhältnisse ebenso für Lichtstrahlen, die den entgegengesetzten Weg nehmen, also aus irgendeiner im Innern der Kugel liegenden Schicht herauskommen und die immer dünner werdenden folgenden Schichten nach außen zu durchlaufen.

Wir denken uns nun also die Sonne als geschichtete Gaskugel und blicken zunächst gegen einen Punkt in entsprechend großer Entfernung von der Mitte derselben, also etwa gegen den Rand der gasförmigen Sonnenkugel. An der Oberfläche unserer gasförmigen Sonne sind natürlich die Dichten noch gering und daher bleibt auch die brechende Wirkung klein. Der Sehstrahl von der Erde her dringt also in die äußersten Schichten ein, krümmt sich in ihnen etwas, und zwar so, wie ein gespannter Bindfaden sich krümmt, den man mit einer Kugel seitwärts drückt, und tritt an der Rückseite der Sonne wieder aus. Wir sehen also durch die äußersten, wegen der geringen dort herrschenden Dichte auch nur schwach leuchtenden Schichten der Sonnenkugel hindurch in den hinter der Sonne liegenden dunklen Weltraum und sehen daher relative Dunkelheit. Wir blicken nun nach und nach gegen Stellen unserer Sonnenkugel, die immer näher an der Mitte der scheinbaren Sonnenscheibe gelegen sind. Diese Sehstrahlen dringen also in immer tiefer im Sonneninnern gelegene Schichten ein, in Schichten von immer höherer Dichte und stärker brechender Wirkung, und sie erfahren demnach auch eine um so stärkere Krümmung, je näher sie gegen die Mitte der Sonnenscheibe zielen.

Bei dem schon in den äußeren Schichten der Sonnenkugel herrschenden starken Dichteanstieg muß es nun in einer bestimmten Distanz von der Mitte der Sonnenscheibe, und zwar etwa dort, wo wir deren scharfe Begrenzung sehen, einen Sehstrahl geben, der eine Krümmung erfährt, die ihn gerade noch aus der Sonnenkugel wieder in den dunklen Weltraum austreten läßt, während ein um eine Kleinigkeit näher gegen die Mitte der Sonnenscheibe auftreffender Sehstrahl bereits in Tiefen gelangt, wo er so stark gekrümmt wird, daß er in der Sonnenkugel verbleibt und in ihr um den Sonnenmittelpunkt kreist. Während der vorhergehende, aus der Sonnenkugel austretende Sehstrahl uns noch die Dunkelheit des Weltraumes vermittelt, bringt uns der nächste, bereits im Sonneninnern weiterlaufende dessen volle Helligkeit; zwischen beiden liegt der Sprung von Hell auf Dunkel, also der scharfe Sonnenrand, der eigentlich in Wirklichkeit gar nicht vorhanden ist, sondern uns nur durch den eigentümlichen Strahlenverlauf in der gasförmig geschichteten Sonnenkugel vorgetäuscht wird.

Diese von Schmidt im Jahre 1891 versuchte Erklärung des scharfen Sonnenrandes erscheint zwar durchaus plausibel, nur ist bei ihr keine Rücksicht genommen auf die im Innern der ganzen Sonnenkugel herrschende Absorption, die ja auch mit der Dichte zunimmt und das Endergebnis in dem einen oder anderen Sinn beeinflussen kann. Auch bleibt noch die Frage offen, ob der Übergang von Dunkelheit in Helligkeit genügend rasch erfolgt, also sich in einer genügend dünnen Schichte abspielt, so daß dabei auch wirklich die scheinbar vollständige Schärfe des Sonnenrandes entsteht.

Schwarzschild hat daher im Jahre 1906 versucht, noch eine andere Erklärung für den scharfen Rand der Sonnenscheibe zu geben. Die Tatsache, daß die Helligkeit eines glühenden Gasgemisches steigt, wenn die Dichte zunimmt, hat uns schon früher zur Meinung geführt, daß die gasförmige Sonnenkugel verwaschen erscheinen müßte. Außerdem muß auch die Temperatur nach dem Innern einer solchen Gaskugel ansteigen, und mit der steigenden Temperatur muß dann neuerlich die Helligkeit wachsen, und zwar in ganz besonderem Ausmaß, weil ja die Strahlung sogar proportional der vierten Potenz der Temperatur anwächst. Bei Zunahme von Dichte und Temperatur nach dem Sonneninnern wird also die Helligkeit noch unverhältnismäßig stärker anwachsen.

Schwarzschild hat nun unter verschiedenen vereinfachenden Annahmen, die gewissermaßen Grenzfälle darstellen, das Zunehmen von Dichte und Temperatur nach dem Sonneninnern, wie es in den äußeren Schichten der Sonnenkugel erwartet werden muß, zu berechnen versucht. Man darf allgemein wohl voraussetzen, daß die Gase der äußeren Schichten, die durch Ausstrahlung in den Weltraum abgekühlt werden, herabsinken, während dafür aus den tieferen Schichten heißere Gase aufsteigen und an die Oberfläche gelangen. Dazu können wir nun einmal annehmen, daß sich die auf- und absteigenden Ströme gegenseitig so ausgleichen, daß die äußeren Schichten der Sonnenkugel schließlich eine ganz gleichmäßige Temperatur annehmen. Wir nennen einen solchen Zustand isothermes Gleichgewicht. Nach Schwarzschilds Rechnungen muß nun in einer aus atmosphärischer Luft gebildeten Kugel von der Größe unserer Sonne bei Isothermie die Dichte nach innen zu schon für je 15 km um etwa das Zehnfache anwachsen. Der Dichteanstieg ist also außerordentlich rasch, und da die Helligkeit mit der Dichte wächst, scheint auch der Helligkeitsanstieg derart rapid vor sich zu gehen, daß sich der Übergang von der Dunkelheit zur vollen Helligkeit für unser Auge fast sprungweise vollziehen dürfte.

Als Gegenteil zur früheren Annahme vollständigen Wärmeausgleiches können wir nun den zweiten Fall annehmen, daß die aneinander auf- und absteigenden Gasströme gegenseitig und mit der sonstigen Umgebung überhaupt keine Wärme austauschen. Jedes Gas ändert sich also beim Aufsteigen oder Herabsinken so, als würde es weder Wärme irgendwie zugeführt erhalten noch irgendwohin abgeben. Für diesen anderen Grenzfall des sogenannten adiabatischen Gleichgewichtes stellte Schwarzschild durch Rechnung fest, daß dabei die Temperatur gegen das Sonneninnere bereits für je 3·63 m um 1°, also für je 3½ km um rund 1000° anwachsen müßte. Wir ersehen daraus, daß Druck und Temperatur unter allen Umständen gegen das Sonneninnere derart rasch ansteigen, daß sich das Anwachsen der Helligkeit von der Dunkelheit weg bis zur vollen Helligkeit der Sonnenscheibe, die dort in der Sonnenkugel erreicht wird, wo die Sonnengase der großen Dichte wegen bereits undurchsichtig geworden sind, auf einem Weg von weniger als 100 km Tiefe gegen das Sonneninnere zu abspielen dürfte. Eine Strecke auf der Sonnenoberfläche von etwa 700 km Länge erscheint uns, von der Erde aus gesehen, aber unter einem Winkel von nur etwa 1″, und die ganze wirkliche Unschärfe des Sonnenrandes schrumpft also auf Bruchteile einer Bogensekunde zusammen. Es ist also keineswegs verwunderlich, wenn wir die Sonnenscheibe trotz der gasförmigen Natur des Sonnenballs scharf begrenzt sehen.

Unter der Voraussetzung, daß die Sonne rein gasförmig sei, läßt sich aber der Verlauf der Temperatur gegen den Sonnenmittelpunkt zu durch Rechnung verfolgen und so die Vorstellung von Secchi, daß ihre Mittelpunktstemperatur mehrere Millionen Grade betragen dürfte, kontrollieren. Wir müssen dazu nur versuchen, ein Sonnenmodell als Gaskugel von gleicher Masse und Größe aufzubauen, allerdings wieder unter gewissen generalisierenden und vereinfachenden Voraussetzungen, um die Rechnung nicht allzusehr zu komplizieren und damit das Problem überhaupt lösbar bleibe.

Zunächst sei angenommen, daß unser Gasball keine Rotation besitzen soll. Durch die Rotation werden ja Fliehkräfte ausgelöst, und diese führen dazu, daß sich die rotierende Gaskugel abplattet und zum Rotationsellipsoid wird. Wir dürfen diese vereinfachende Annahme der Rotationslosigkeit deswegen ohneweiters machen, weil es bekanntlich bis heute nicht gelungen ist, bei der Sonne eine Abplattung nachzuweisen. Tatsächlich erfolgt auch die Rotation der Sonne — sie dreht sich in rund 25 Tagen einmal um ihre Achse — sehr langsam, und wir setzen die Sonne also als kugelförmig voraus.

Die astronomischen Beobachtungen zeigen außerdem, daß die einzelnen chemischen Elemente in der Sonnenatmosphäre keineswegs innig vermischt sind. Wasserstoff und insbesondere Kalziumdämpfe, aber auch die Dämpfe anderer Elemente zeigen sich an verschiedenen Stellen der Sonnenoberfläche, und zwar besonders in der Nähe von Sonnenflecken, wolkenförmig zusammengeballt. Wir können aber auf diese nicht gleichmäßige Verteilung der Elemente im Sonnenkörper keine Rücksicht nehmen, weil diese Verteilung eben ständig wechselt. Wir müssen daher mit einem mittleren Zustand rechnen und führen in unsere Berechnungen daher ein mittleres Atomgewicht ein, wie es etwa einer völlig gleichmäßigen Durchmischung aller in der Sonne vorhandenen Stoffe entsprechen würde.

Wir müssen nun fragen, was für Kräfte in irgendeinem Punkt einer solchen ruhenden, aus einem mittleren einheitlichen Gasgemisch aufgebauten Gaskugel wirksam sein werden. Zunächst wird jedes Teilchen im Innern eines solchen Gasballes eine Anziehung gegen den Kugelmittelpunkt erfahren, ebenso wie ja jeder Körper auf der Erde oder in deren Innern durch die Anziehung der Erdmasse gegen den Erdmittelpunkt gezogen wird. Unter dem Einfluß dieser Gravitationswirkung der Gaskugel auf sich selbst lasten natürlich die äußeren Schichten auf den inneren mit ihrem Gewicht auf und pressen sie zusammen. Der Effekt ist der gleiche, wie wir ihn in der Erdatmosphäre beobachten können, wo ja auch jede Schicht durch das Gewicht der über ihr befindlichen Luftmasse zusammengedrückt wird. Druck und Dichte werden in unserer Gaskugel also ebenso wie in unserer Atmosphäre von oben nach unten oder von außen nach innen entsprechend zunehmen müssen. Wäre die Gravitationswirkung nicht vorhanden, so müßte sich eine solche zusammengepreßte Gaskugel unter dem Einfluß des nach innen zu größer werdenden Gasdruckes natürlich wieder ausdehnen. Gravitation und Gasdruck wirken also einander entgegengesetzt, die Gravitation zusammenziehend, der Gasdruck wieder ausdehnend, und eine solche Gaskugel kann offenbar nur dann im Gleichgewicht oder stabil sein, das heißt ihre Größe und Gestalt unverändert beibehalten, wenn sich Gravitation und Gasdruck in ihrem Innern überall gerade die Waage halten. Denn wäre die Gravitation stärker, so würde sie den kleineren Gasdruck überwinden, die Gaskugel würde sich zusammenziehen, so lange, bis der dabei steigende Gasdruck die Gravitation wieder gerade kompensieren würde, bis also wieder Gleichgewicht eingetreten wäre. Wäre dagegen die Gravitation kleiner, so würde der größere Gasdruck die Gaskugel wieder bis zum Eintritt des Gleichgewichtszustandes ausdehnen und vergrößern.

Unter diesem Gesichtspunkt des Gleichgewichtes zwischen Gravitation und Gasdruck ist seit den siebziger Jahren des vorigen bis in das erste Jahrzehnt des laufenden Jahrhunderts insbesondere von Ritter, Lane und Emden versucht worden, den Verlauf von Druck, Dichte und Temperatur im Innern solcher Gaskugelmodelle zu verfolgen.

Gegen 1910 erkannte Schwarzschild, daß noch ein dritter Umstand berücksichtigt werden müsse, wenn man zu einwandfreien Ergebnissen kommen will, nämlich der sogenannte Strahlungsdruck. Daß jede Strahlung, die auf eine Fläche auftrifft, also auch das Licht, auf diese Fläche einen Druck ausübt, läßt sich nicht nur aus der Theorie der Strahlung folgern, sondern ist auch durch das Experiment nachgewiesen. Dieser Strahlungsdruck ist zwar bei niedrigen Strahlungstemperaturen verschwindend klein, wächst aber mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur und nimmt somit bei steigender Temperatur rasch zu. Das Licht unserer Sonne z. B. übt auf jedes Quadratmeter der Erdoberfläche bei senkrechtem Auftreffen einen Druck aus, der einem Gewicht von nur etwa 0·4 mg gleichkommt; hätte unsere Sonne aber statt ihrer Oberflächentemperatur von rund 6000° eine solche von einer Million Graden, dann wäre dieser Druck ihres Lichtes bereits dreiviertelmilliardenmal größer und würde pro Quadratmeter fast 300 kg ausmachen! Wenn also die Temperatur gegen das Sonneninnere zu stark ansteigt, so muß also auch der Druck der Strahlung im Innern der Sonnenkugel außerordentlich hohe Werte erreichen. Da der Strahlungsdruck ebenso wie der Gasdruck nach innen zu wächst, so wirken beide in gleichem Sinn. Bei den neueren Untersuchungen über den inneren Aufbau der Sonne und der Fixsterne ist daher als Gleichgewichtsbedingung die Forderung eingeführt, daß in jedem Punkt einer solchen Gaskugel die Gravitationskräfte der Summe aus Strahlungsdruck und Gasdruck das Gleichgewicht halten sollen, wenn die Gaskugel unverändert und stabil bleiben soll.

Zu alldem sagt uns noch die Erfahrung, daß sich die Sonnenstrahlung anscheinend seit sehr langer Zeit, vielleicht einige tausend oder noch mehr Jahre hindurch, kaum geändert hat, daß also die Sonnentemperatur während dieser Zeit auf derselben Höhe geblieben ist. Das ist aber wieder nur möglich, wenn kein Volumselement der Sonne von der aus dem Innern der Sonne kommenden und durch dieses Volumselement nach außen hindurchgehenden Strahlung etwas für sich behalten hat, ohne es nach außen weiterzugeben. Bliebe in einem solchen Volumselement Strahlung zurück, so müßte dabei ja seine Temperatur steigen, und es müßte sich umgekehrt abkühlen, wenn es mehr Strahlung nach den äußeren Schichten abgeben würde, als ihm von den inneren her zufließt. Da die Sonnentemperatur nun aber anscheinend konstant bleibt, kein Volumselement in der Sonne also eine Temperaturerhöhung oder eine Abkühlung erleidet, so muß also sogenanntes Strahlungsgleichgewicht herrschen, d. h. jedes Volumselement muß so viel Strahlung nach außen weiterleiten, als es von innen her erhält.

Unter Berücksichtigung des Strahlungsdruckes und des ebenfalls von Schwarzschild eingeführten Strahlungsgleichgewichtes haben nun Eddington, Milne u. a. gefunden, daß im Mittelpunkt einer Gaskugel von der Größe und Masse der Sonne bereits eine Temperatur von rund 40 Millionen Graden herrschen muß. Wir kommen also bei der Vorstellung einer durch und durch gasförmigen Sonne tatsächlich für das Sonneninnere zu so hohen Temperaturen, wie sie erforderlich sind, damit der gasförmige Zustand trotz der hohen in der Sonne herrschenden Drucke erhalten bleibt. Ob infolge der Veränderungen, die die Atome bei so hohen Temperaturen erleiden können, die Materie im Sonneninnern aber nicht schon anderweitige Formen annimmt, die wir hier auf der Erde natürlich nicht vorfinden können, das ist eine Frage, die momentan zwar vielfach erörtert wird, bisher aber eine befriedigende und sichere Antwort noch nicht gefunden hat.

Soeben wurde von der Konstanz der Sonnenstrahlung gesprochen, wie wir sie aus verschiedenen geologischen und geschichtlichen Anzeichen für eine Zeit von mindestens mehreren Jahrtausenden folgern müssen. Nun sendet unsere Sonne einem Quadratzentimeter, das wir auf der Erdoberfläche so aufstellen, daß es von den Sonnenstrahlen senkrecht getroffen wird, in einer Minute eine Wärmemenge von rund zwei Grammkalorien zu, also einen Wärmebetrag, der genügt, um die Temperatur von 2 cm^3 Wasser um 1^0 C zu erhöhen. Wir nennen diesen Betrag die S o l a r k o n s t a n t e. Natürlich erhält aber jedes Kubikzentimeter einer Kugel, die wir um die Sonne mit der Entfernung Erde—Sonne von 149·5 Millionen Kilometern oder rund 15 Billionen Zentimetern als Halbmesser legen können, genau den gleichen Wärmebetrag. Das gibt für die Sonne einen Gesamtwärmeverlust von 90 Quatillionen oder 9×10^{25} cal pro Sekunde. Der Strahlungs- oder Wärmeverlust der Sonne ist also derart hoch, daß eine Temperaturerniedrigung oder Abkühlung des Sonnenkörpers in absehbarer Zeit wohl unbedingt erwartet werden müßte, wenn nicht irgendwelche Quellen in der Sonne vorhanden wären, aus denen dieser Strahlungsverlust wieder ersetzt wird.

Die Frage nach diesen Energiequellen, die den Strahlungsverlust der Sonne und der Fixsterne decken, so daß deren Temperatur über lange Zeiträume hinweg nahe konstant bleiben kann, ist zuerst von Helmholtz näher erörtert worden. Wir stellen uns bekanntlich vor, daß die Bildung eines Sterns aus einem Gasnebel in der Weise erfolgt, daß sich dieser Nebel unter dem Einfluß seiner eigenen Massenanziehung auf sich selbst zunächst kugelförmig zusammenballt und dann weiter langsam zusammenzieht. Dabei wird der Gasball immer dichter und dichter, aber auch heißer und heißer, so daß er schließlich zu leuchten beginnt und nun als Stern erscheint. Die Kontraktion geht dann natürlich weiter vor sich, so daß die Temperatur des Gebildes ständig steigen müßte, wenn nicht gleichzeitig wieder der Wärmeverlust durch Strahlung vorhanden wäre. Je dichter das Gebilde nun wird, desto langsamer wir die Kontraktion, und es muß schließlich ein Zustand eintreten, wo die Temperatursteigerung durch Kontraktion und die gleichzeitige Abkühlung durch Ausstrahlung einander gerade aufheben. Die Temperatur des ganzen Gebildes wird dann für lange Zeiträume konstant und nahe unverändert erhalten bleiben können. Es hat den Anschein, als ließe sich in dieser Vorstellung eine Erklärung finden für die beobachtete Konstanz der Sonnentemperatur, wir wollen aber doch dazu eine Kontrolle durch Zahlenangaben versuchen und ausrechnen, ob unter der eben erörterten Vorstellung für unsere Sonne ein Alter herauskommt, das größer ist als das Alter, das von Geologen und Physikern für die Erde gefordert wird, die ja jedenfalls aus unserer Sonne entstanden ist. Wir beschäftigen uns daher zunächst ein wenig mit diesem mutmaßlichen Alter der Erde.

Bekanntlich ist Uran ein radioaktives Element, das über eine größere Anzahl von Zwischenstufen und über Radium hinweg schließlich zu Blei, dem sogenannten Radioblei, zerfällt. Aus den Versuchen im physikalischen Laboratorium kennt man nun aber die Zeit, die erforderlich ist, damit aus einer bestimmten Uranmenge eine bestimmte Menge Blei abgeschieden wird. Nimmt man also an, unsere Erde habe früher einmal ausschließlich aus Uran bestanden und schätzt man den jetzt noch vorhandenen Urangehalt der Erde ab, so läßt sich die Zeit ausrechnen, die nötig war, damit aus der ursprünglichen Uranmenge die jetzige geworden ist. Da die Erde aber natürlich anfangs nicht gänzlich aus Uran allein bestanden haben wird, ist die Zeit von zirka 130 Milliarden Jahren, die wir so für das Alter einer solchen „Uranerde“ erhalten, nur ein oberer Grenzwert, der jedenfalls viel zu hoch gegriffen ist. Auch das Verhältnis zwischen dem Bleigehalt und dem Urangehalt uranhaltiger Mineralien kann in ähnlicher Weise verwendet werden. Man hat dann die Zeit nach rückwärts zu ermitteln, wo nur Uran und kein Blei vorhanden war, und erhält dabei rund ein bis zwei Milliarden Jahre, also einen wesentlich niedrigeren Wert, der aber dafür die weitaus größere Wahrscheinlichkeit für sich hat. Dieser Wert deckt sich auch bereits gut mit den Zeiträumen, die von den Geologen aus der bekannten Geschwindigkeit der Ablagerung von Sedimentschichten (1 m in 3000 bis 23.000 Jahren) und aus der beobachteten Mächtigkeit solcher auf der Erdkruste bereits vorhandener Schichten errechnet worden sind. Bedenkt man dazu, daß alle diese Berechnungen erst von dem Moment an Geltung besitzen, wo sich die Erdkruste gebildet hat, daß also vorher die aus der Sonne geborene Erde noch gasförmig und danach flüssig gewesen sein muß, so wird man diese Zahlen noch erhöhen und das Alter der Erde mit vielleicht etwa drei Milliarden Jahren ansetzen müssen. Das Alter unserer Sonne, die natürlich früher dagewesen sein muß als unsere Erde, können wir dann aber wohl nur mehr nach Billionen von Jahren abschätzen.

Damit taucht nun die Frage auf, wie sich die oben in groben Zügen geschilderte Helmholtzsche Kontraktionstheorie zu einem nach Jahrbillionen einzuschätzenden Alter unserer Sonne stellt. Wir müssen dazu versuchen, die Energiemengen zu berechnen, die bei der Kontraktion eines Gasballs in Form von Wärme gewonnen werden, und nehmen dazu an, daß sich unsere

Sonne aus einem ursprünglich unendlich großen Gasball bis zu ihrer heutigen Größe kontrahiert hat. Da die Sonne bei ihrer Entstehung gewiß nicht unendlich groß war, werden die Zahlen, die wir so erhalten, sicher wieder zu hoch ausfallen.

Physikalisch gedacht, erfolgt die Kontraktion eines solchen Gasballs so, daß alle Volumselemente der Kugel unter dem Einfluß der aus dem Kugelmittelpunkt wirkenden Anziehungskraft gegen diesen Mittelpunkt herabsinken. Jedes Volumselement leistet dabei eine Arbeit, die durch das Produkt Kraft mal Weg gegeben ist, und diese Arbeit wird dann in irgendeiner Form, z. B. als Wärme, verfügbar. Zerlegen wir also die ganze Gaskugel in einzelne dünne Schalen, deren Radius sich bei der Kontraktion verkleinert, so läßt sich die von der ganzen Masse einer solchen Schale bei der Kontraktion geleistete Arbeit berechnen, und durch Summieren über alle Kugelschalen erhalten wir dann die ganze Kontraktionsarbeit. Natürlich ist bei der Rechnung auch darauf Rücksicht zu nehmen, daß Druck und Dichte gegen das Innere einer solchen Gaskugel anwachsen, daß also die Massen der einzelnen Schalen dem von früher her bereits bekannten inneren Aufbau einer solchen Gaskugel anzupassen sind. Für unsere Sonne hat sich nun bei solchen Berechnungen unter Voraussetzung einer Kontraktion aus dem Unendlichen bis zur heutigen Größe eine gesamte Kontraktionsarbeit von $13{\cdot}4 \times 10^{40}$ Grammkalorien ergeben. Nimmt man an, daß die Sonnenstrahlung immer gleich geblieben ist, und dividieren wir diese Kontraktionsarbeit durch die 9×10^{25} cal, die unsere Sonne pro Sekunde in den Weltraum ausstrahlt, so würden wir für das mögliche Alter unserer Sonne einen Wert von 47 Millionen Jahren erhalten, der trotz der wegen Annahme der Zusammenziehung aus dem Unendlichen sicher zu hohen Kontraktionsarbeit noch als viel zu klein angesehen werden muß. Und diese Zahl für das Sonnenalter müßte sogar noch weiter herabgesetzt werden, weil sich aus anderen Berechnungen ergeben hat, daß die Fixsterne in den früheren Lebensstadien stärker strahlen als in den späteren, und daher anzunehmen ist, daß auch die Sonnenstrahlung früher einmal, in den Jugendstadien der Sonne, kräftiger war. Da nun diese 47 Millionen Jahre nicht im entferntesten heranreichen an die Milliarden Jahre, die wir schon für das Alter der Erde ansetzen müssen, ist also die Kontraktionsarbeit allein gewiß nicht imstande, den Wärmeverlust der Sonne durch Strahlung zu decken, und wir müssen nach anderen Energiequellen Umschau halten.

Ein anderer Gedanke hiezu, der übrigens auch nicht zum Ziel führen wird, rührt von Robert Maier, dem Entdecker des Gesetzes von der Erhaltung der Energie, her. Bekanntlich ist schon die Zahl der auf unsere Erde herabstürzenden Meteoriten sehr groß, und da die Anziehungskraft unserer Sonne wesentlich höher ist als die unserer Erde, so wird auch die Anzahl der auf die Sonne fallenden Meteoriten eine vielfach größere sein. Wenn nun ein solcher Meteorit aus dem unendlichen Weltraum auf die Sonnenoberfläche herabstürzt, erlangt er dabei eine Einsturzgeschwindigkeit von 618 km pro Sekunde. Beim Auffallen wird diese Geschwindigkeit natürlich zur Null abgebremst, und jeder solche Meteor bringt also der Sonne die ihm bei dieser Abbremsung verlorengegangene Bewegungsenergie zu, die durch das Produkt aus dem Quadrat der Geschwindigkeit und der halben Meteormasse berechnet werden kann. Da die Endgeschwindigkeit bekannt ist, läßt sich also wieder ausrechnen, wieviel Meteormasse pro Jahr in die Sonne stürzen müßte, wenn dadurch der ganze Verlust an Strahlungsenergie gedeckt werden sollte. Die Zahl von 52 Trillionen Tonnen, die man dabei erhält, ist aber derart hoch, daß sich bei ständigem jährlichen Zuwachs solcher Massen die Sonnenmasse bald merklich vergrößern würde. Das hätte weiter zur Folge, daß ihre Anziehungskraft wachsen würde und daß sich die Umlaufzeit der Erde, also die Jahreslänge, verkürzen müßte. Seit etwa 2000 Jahren hätte sich dadurch unser Kalender bereits um sechs bis acht Wochen verschieben müssen! Das ist natürlich nicht der Fall, im Gegenteil, die Länge des Jahres hat sich in den letzten tausend Jahren sicher um keine ganze Sekunde geändert, und die sogenannte „Einsturzhypothese“ von Maier ist, wie schon betont, also auch nicht geeignet, die Erhaltung der Sonnenwärme befriedigend zu erklären.

Wir gehen schließlich über zu den modernen Anschauungen der Physiker über die Gleichheit von Energie und Masse, nach denen Strahlungsenergie nichts anderes ist als mit Lichtgeschwindigkeit bewegte Masse. Wenn danach also ein Körper Strahlung aussendet, so verliert er dabei an Masse, und zwar so viel, daß das Produkt aus dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit mit der ausgestrahlten Masse gleich ist der Energie der Gesamtstrahlung. Von diesem Gesichtspunkt aus ist nun aber der Inhalt der Sonne an Strahlungsenergie aus ihrer Masse leicht berechenbar, und durch Division mit dem Strahlungsverlust der Sonne läßt sich dann die Zeit ausrechnen, die unsere Sonne gewissermaßen noch zu leben haben kann, unter der Voraussetzung, daß ihre Ausstrahlung auch in Zukunft nicht abnehmen, sondern immer auf gleicher Höhe erhalten bleiben wird.

Die Masse unserer Sonne beträgt $1{\cdot}985 \times 10^{33}$ g oder 1985 Quintillionen Gramm, die Lichtgeschwindigkeit ist 300.000 km oder 3×10^{10} cm pro Sekunde, und ihr Quadrat beträgt also 9×10^{20}. Multipliziert man die Masse mit diesem Geschwindigkeitsquadrat, so ergeben sich 1780×10^{51} Energieeinheiten oder Erg, die noch als Energieinhalt in der Sonne vorhanden sind und ihr weiterhin zur Verfügung stehen. Diese Energiemenge kann die Sonne also in Zukunft in Form von Strahlung noch vollständig ausstrahlen, aber sie würde sich dabei natürlich nach und nach selbst aufzehren, so daß ihre ganze Masse bei vollständiger Umwandlung in Strahlung schließlich in der Form von Strahlungsenergie in den Weltraum übergegangen und verstreut worden wäre. Da 1 cal $= 4{\cdot}19 \times 10^7$ Erg (mechanisches Arbeitsäquivalent), so ergibt sich der eben berechnete Energieinhalt der Sonne noch in Grammkalorien zu $4{\cdot}26 \times 10^{46}$ cal. Dividiert man diese Zahl nun durch den oben aus der Solarkonstante berechneten Gesamtstrahlungsverlust der Sonne pro Sekunde von 9×10^{25} cal, so ergibt sich die Zeit, während der die Sonne bis zu ihrer völligen Aufzehrung in gleicher Stärke Strahlung aussenden könnte, sofort zu $49{\cdot}6 \times 10^{19}$ Sekunden oder zu

16 Billionen Jahren.

16 Billionen Jahre könnte also unsere Sonne in ihrem jetzigen Zustand weiterleben, bevor sie sich gänzlich verzehrt hätte. Ob sich allerdings Sonne und Fixsterne in dieser Weise wirklich gänzlich aufzehren und in Form von Strahlungsenergie in den Weltraum verstreuen, oder ob sie mit der Zeit, früher oder später, doch erkalten und dann in erkaltetem Zustand erhalten bleiben, das ist eine Frage, auf die sich eine befriedigende Antwort in dem einen oder anderen Sinn aus begreiflichen Gründen derzeit nicht gut geben läßt.

Mit diesen Rechnungen haben wir aber nur die Zeit abgeschätzt, die noch vor unserer Sonne liegt, während wir früher umgekehrt nach ihrem jetzigen Alter, also nach der Zeit gefragt haben, die seit ihrer Bildung bis jetzt verflossen ist. Würde man einfach zu dem Zweck annehmen, daß die Sonne bei ihrer Bildung aus einem Gasnebel rund die doppelte Masse hatte und daß sie bis jetzt eben unter gleichbleibender Strahlung die Hälfte der Ursprungsmasse verloren hat, so wäre ihr jetziges Alter ebenfalls mit etwa 16 Billionen Jahren zu veranschlagen. Aber dieses Alter ist sicher zu hoch gegriffen. Theorie und Beobachtung besagen nämlich übereinstimmend, daß die Ausstrahlung eines Sterns wieder von seiner Masse selbst abhängig und um so größer ist, je mehr Masse der Stern besitzt. Ein Stern lebt gewissermaßen rascher, solange seine Masse noch groß ist, weil er dann stärker strahlt und damit auch rascher Masse verliert. In dem Maß aber, wie sich seine Masse durch Ausstrahlung verringert, wird er sparsamer und sparsamer, so daß seine Altersstadien gegenüber den verkürzten Jugendstadien immer mehr verlängert werden, je älter der Stern wird. Wir haben also sicher das eben geschätzte Alter unserer Sonne entsprechend zu verkleinern, dagegen die aus ihrem Energieinhalt berechnete Lebensdauer zu verlängern.

Der Zusammenhang zwischen Masse und Ausstrahlung, die sogenannte „Massen-Leuchtkraft-Beziehung“, ist durch die Beobachtungen an Sonne und Fixsternen bekannt geworden. Berücksichtigt man diese Daten, so verringern sich die obigen 16 Billionen Jahre, die wir für die Zeit angesetzt haben, die verstrichen ist, während sich die Sonne von der doppelten Masse auf die heutige verkleinert hat, auf etwa fünf

Billionen Jahre. Wir erhalten damit für das jetzige Alter der Sonne also eine Zahl, die im Hinblick auf das früher angegebene Alter unserer Erde sehr plausibel erscheint. Diese Zahl würde sich wegen der Raschlebigkeit der Sterne in den Jugendstadien übrigens nur sehr wenig vergrößern, wenn wir für die Ursprungsmasse der Sonne nicht das Doppelte der jetzigen, sondern ein Vielfaches davon ansetzen würden.

Dagegen vergrößert sich die noch vor der Sonne liegende Zeit, also ihre weitere Lebensdauer, bei Berücksichtigung der aus der Massen-Leuchtkraft-Beziehung folgenden sparsameren Strahlung bei sinkender Masse ganz bedeutend. Für die Zeit z. B., die verstreichen dürfte, bis die Sonnenmasse durch Ausstrahlung auf etwa ein Drittel des jetzigen Betrages herabgesunken sein wird, würde man keineswegs ungefähr die früheren 16 Billionen Jahre, sondern schon 300 Billionen Jahre anzusetzen haben. Allerdings wird dann auch die Sonnenstrahlung selbst, der Massenverringerung entsprechend, auf ein Hundertstel des jetzigen Betrages herabgesunken sein, und es ist klar, daß dann das organische Leben in seiner heutigen Form nicht mehr wird bestehen können, weil Sonnenlicht und Sonnenwärme dann bereits viel zu gering geworden sein werden.

Wir wollen als Schlußrechnung noch die Zeit ermitteln, die verstreichen dürfte bis zu dem Moment, wo die Sonne etwa ein Zehntel ihrer jetzigen Masse ausgestrahlt haben wird. Man erhält dafür einen Wert von rund zwei Billionen Jahren, und gleichzeitig ergibt der Zusammenhang zwischen Masse und Leuchtkraft, daß dann die Sonnenstrahlung noch zirka neun Zehntel der heutigen Stärke ausmachen wird. Die klimatischen Unterschiede, die durch diese Verringerung der Sonnenstrahlung auf neun Zehntel bewirkt werden würden, sind aber kaum bedeutend und sicher nicht größer als die Unterschiede zwischen trockenen und regnerischen Sommern. Man kann also sagen, daß das organische Leben auf der Erde nach dem jetzigen Stand der astrophysikalischen Forschung noch für eine nach einigen Billionen von Jahren einzuschätzende Zeit die astronomischen Existenzbedingungen vorfinden wird, die für seine Erhaltung notwendig sind.