Das Olberssche Paradoxon

Peter H. Richter

Bremen, 24. Juli 1995

Sterne und Weltraum **34** (1995) 804-809

Zusammenfassung

Am 7. Mai 1823 schickte der Bremer Arzt und Astronom Wilhelm Olbers einen Aufsatz *Über die Durchsichtigkeit des Weltraums* an den Herausgeber des Astronomischen Jahrbuches für 1826. Darin formulierte er eine Frage, die seither ein zentrales Problem der Kosmologie darstellt: Warum ist der Himmel nicht – tags wie nachts – an jedem Punkt so hell wie die Sonne, da doch in jeder Richtung des Raumes irgendwann ein Stern angetroffen werden sollte? Seine eigene Antwort, das Licht entfernter Sterne werde im Weltraum absorbiert, erwies sich als falsch. Über die angemessene Lösung des Problems herrschte lange Zeit eine eigentümliche Unklarheit. Erst die quantitativen Beobachtungen der modernen Kosmologie scheinen eine befriedigende Antwort zu erlauben.

Paradoxa sind Widersprüche zwischen einer überzeugend scheinenden Argumentationskette und offenbaren Tatsachen. In ihnen äußert sich die Unzulänglichkeit des Standes der Wissenschaft gegenüber Problemen, die sie erklären möchte. Das berühmteste Paradoxon der Wissenschaftsgeschichte dürfte das von Achilles und der Schildkröte gewesen sein, das sich für Zenon von Elea (geb. um 490 v. Chr.) aus dem Versuch ergab, Kontinuierliches aus unendlich vielen Teilen zusammengesetzt zu denken, . Es dauerte über 2 000 Jahre, ehe die Infinitesimalrechnung den mathematischen Rahmen bereitstellte, in dem Zenos Problem befriedigend lösbar war.

Paradoxa sind deshalb von zweierlei Bedeutung: in der Wissenschaft selbst spielen sie die Rolle eines Stachels, der unangenehme Wunden reißt; dem Historiker bieten sie sich – im Nachhinein – als roter Faden an, der die Entwicklung eines Zweigs der Wissenschaft von ersten naiven Fragen bis zur Erarbeitung gültiger Antworten zu verfolgen gestattet. Je länger und je intensiver die Wissenschaft über einem Paradoxon brütet, desto berühmter wird es.

Nicht alle Fragen aber, die die Wissenschaft zu einer gegebenen Zeit vor Rätsel stellen, erhalten den Stellenwert eines Paradoxons. Das Problem etwa, woher die Sonne ihre Strahlung nehme – also: weshalb es tags hell sei –, war um 1820 genausowenig lösbar wie Olbers' Frage nach der Dunkelheit des Nachthimmels. Es lag jedoch als damals unverstehbar klarer auf der Hand: kaum ahnte man die energetische Natur des Lichts; man wußte, daß hier noch Neuland zu erschließen war. (Nach Becquerels Entdeckung der Radioaktivität 1896 dauerte es immerhin über 40 Jahre, ehe Bethe und von Weizsäcker 1938 die Natur der stellaren Kernreaktoren erkannten.) Ein Paradoxon ergibt sich erst dann, wenn die Wissenschaft ihre Unreife in Bezug auf das betreffende Problem nicht erkennt, wenn sie glaubt, die richtigen Vorstellungen bereits zu besitzen, und damit in Widerspruch zur Beobachtung gerät. Bis zur endgültigen Lösung, sofern sie gelingt, werden typischerweise immer neue Scheinlösungen vorgelegt. Der Philosoph G. Vollmer hat dies für das Olberssche Paradoxon in einer wissenschaftstheoretischen Fallstudie eindrucksvoll dargelegt [1].

Das Problem

Im siebten Kapitel des zweiten Hauptstücks seiner *Allgemeinen Naturgeschichte und Theorie des Himmels* von 1755 schreibt Kant [2]

> Wo wird die Schöpfung selber aufhören? Man merket wohl, daß, um sie in einem Verhältnisse mit der Macht des unendlichen Wesens zu gedenken, sie gar keine Grenzen haben müsse. Man kommt der Unendlichkeit der Schöpfungskraft GOttes nicht näher, wenn man den Raum ihrer Offenbarung in einer Sphäre mit dem Radius der Milchstraße beschrieben, einschließet, als wenn man ihn in eine Kugel beschränken will, die einen Zoll im Durchmesser hat. Alles was endlich, was seine Schranken und ein bestimmtes Verhältnis zur Einheit hat, ist von dem unendlichen gleich weit entfernet. Nun wäre es ungereimt, die Gottheit mit einem unendlich kleinen Theile ihres schöpferischen Vermögens in Wirksamkeit zu setzen, und ihre

> unendliche Kraft, den Schatz einer wahren Unermeßlichkeit, von Naturen und Welten unthätig, und in einem ewigen Mangel der Ausübung verschlossen, zu gedenken. Ist es nicht vielmehr anständiger, oder besser zu sagen, ist es nicht nothwendig, den Inbegriff der Schöpfung also anzustellen, als er seyn muß, um ein Zeugniß von derjenigen Macht zu seyn, die durch keinen Maaßstab kan abgemessen werden? Aus diesem Grunde ist das Feld der Offenbarung göttlicher Eigenschaften eben so unendlich, als diese selber sind. Die Ewigkeit ist nicht hinlänglich, die Zeugnisse des höchsten Wesens zu fassen, wo sie nicht mit der Unendlichkeit des Raumes verbunden wird.

Diese Passage zitiert Wilhelm Olbers in seinem Aufsatz *Über die Durchsichtigkeit des Weltraums* vom 7. Mai 1823, der im Astronomischen Jahrbuch für das Jahr 1826 veröffentlicht wurde [3]. Man wundert sich, daß Olbers in keinem Augenblick daran denkt, die Stringenz der Kantschen Beweisführung in Frage zu stellen, in der protestantische „Anständigkeit“ sich mir nichts dir nichts zu philosophischer „Nothwendigkeit“ wandelt. Offenbar hatte sich um 1800 in der Tradition Newtons das Vorurteil durchgesetzt, der Raum müsse – wie die Zeit – unendlich sein. Ganz im Gegensatz übrigens zu wörtlich verstandenen Aussagen der Heiligen Schrift, in der ja von einem Anfang der Welt die Rede ist, und der die Vorstellung des Unendlichen noch ganz fremd ist. Diese Vorstellung entwickelte sich erst gegen Ende des 16. Jahrhunderts; Giordano Bruno und William Gilbert hingen ihr leidenschaftlich an, aber Kepler war ebenso leidenschaftlich ihr Gegner.

Neben der angenommenen Unendlichkeit des Kosmos in Raum und Zeit ist die Voraussetzung seiner Homogenität wichtig. In unmittelbarer Anknüpfung an das obige Kant-Zitat schreibt Olbers

> Es bleibt also höchst wahrscheinlich, daß nicht bloß der Theil des Raums, den unser auch noch so stark bewaffnetes Auge übersehen hat, oder übersehen kann, sondern der ganze unendliche Raum mit Sonnen und ihren Gefolgen von Planeten und Kometen besetzt ist. Ich sage höchst wahrscheinlich. Gewißheit kann uns unsere beschränkte Vernunft nicht geben.

Er setzt sich dann mit einem vermeintlichen Beweis Halleys für diese unendlich ausgedehnte Verteilung von Sonnen auseinander, den er nicht stichhaltig findet, und fährt fort:

> Allein, wenn gleich Halley's Beweis nicht gelten kann, so wird es uns doch höchst wahrscheinlich bleiben, daß die schöne Ordnung, die wir, so weit unsere Sehkraft irgend reicht, wahrnehmen, auch durch den ganzen unendlichen Raum fortgesetzt sei, und wir haben nur zu untersuchen, ob andere Gründe diese Annahme verwerflich machen. Da zeigt sich nun gleich ein sehr wichtiger Einwurf. Sind wirklich im ganzen unendlichen Raum Sonnen vorhanden, sie mögen nun ungefähr gleichen Abstand voneinander, oder in Milchstraßen-Systeme vertheilt sein, so wird ihre Menge unendlich, und da müßte der ganze Himmel eben so hell sein, wie die Sonne. Denn jede Linie,

> die ich mir von unserm Auge gezogen denken kann, wird nothwendig auf irgend einen Fixstern treffen, und also müßte uns jeder Punkt am Himmel Fixsternlicht, also Sonnenlicht zusenden.
>
> Wie sehr dies der Erfahrung widerspricht, braucht wohl nicht gesagt zu werden.

Unendlich weit, unendlich alt und homogen: dies sind drei deutlich ausgesprochene Annahmen über den Kosmos, auf deren Hintergrund sich das Paradoxon entfaltet. Eine vierte Annahme sollte aus heutiger Sicht hinzugefügt werden: die des thermodynamischen Gleichgewichts, von dem es um 1820 noch keinen klaren Begriff gab, zumal nicht einmal der Energiesatz formuliert war. Dennoch enthält Olbers' Argumentation implizit die Voraussetzung, die Verteilung der Sterne und ihre Strahlung hätten genügend Zeit zur Equilibrierung gehabt. Es ist vermutlich fair zu sagen, daß dieser Aspekt des Problems bis in die jüngste Zeit in Diskussionen zu wenig beachtet wurde, daß er aber besonders kritisch betrachtet werden muß.

Olbers' Argument ist klar und einfach. Zuerst nimmt er an, alle Sterne seien der Sonne oder dem Sirius gleich. Ihr Radius r erscheint aus der Entfernung R unter dem Winkel r/R (im Bogenmaß). Ihre scheinbare Fläche wie auch ihre scheinbare Helligkeit nehmen mit dem Quadrat der Entfernung ab; die Helligkeit pro Flächeneinheit ist deshalb unabhängig von der Entfernung (und nur von der Oberflächentemperatur abhängig, wie wir seit Boltzmann wissen). Sei nun, von der Erde aus gesehen, N_1 die Zahl der Sterne erster Größe, $R_1 \pm \frac{1}{2}R_1$ der Bereich ihrer Entfernungen von uns, $\delta \approx r/R_1$ ihr scheinbarer Radius. Dann ist $N_1\pi\delta^2$ der insgesamt von ihnen bedeckte Raumwinkel am Himmelsgewölbe, und da dessen Gesamtmaß 4π beträgt, ist

$$F_1 = N_1 \frac{\delta^2}{4}$$

der Teil des Himmels, den die Sterne erster Größe einnehmen. Im Abstandsbereich $2R_1 \pm \frac{1}{2}R_1$ befinden sich viermal so viele Sterne; deren scheinbarer Radius ist $\delta/2$, der insgesamt von ihnen bedeckte Teil des Himmels also $4N_1 \cdot \pi(\delta/2)^2 = 4\pi F_1$. Die Schale mit Abständen $kR_1 \pm \frac{1}{2}R_1$ enthält $k^2 N_1$ Sterne mit scheinbarem Radius δ/k, so daß auch sie den Teil F_1 des Himmels bedeckt. So klein das F_1 auch sein mag: nimmt man nur

$$N_s = 1/F_1$$

Schalen der Dicke R_1, so bedecken die darin befindlichen Sterne den ganzen Himmel! Die Sterne der uns umgebenden Kugel von Radius $N_s R_1$ sollten daher den Himmel mit einer etwa 6 000 Grad heißen Strahlung erfüllen; tags wie nachts müßte er aus allen Richtungen mit Sonnenhelligkeit scheinen. Diesen Sachverhalt erkennt Olbers glasklar, und er äußert dazu den Seufzer

> Wohl uns! daß doch die Natur die Sache anders eingerichtet hat: wohl uns! daß nicht jeder Punkt des Himmelsgewölbes Sonnenlicht auf die Erde herabsendet. Die unerträgliche Helligkeit, die alle Vergleichung übersteigende

> Hitze, die dann herrschen würde, nicht einmal betrachtet; (denn für diese, wenn sie gleich über 90 000 mal größer sein würden, als wir sie jetzt empfinden, hätte die schaffende Allmacht unsere Erde und die auf ihr vorhandenen Organismen einrichten können). Ich will nur der höchst unvollkommenen Astronomie gedenken, die dann uns Erdbewohnern noch möglich bleiben würde. Vom Fixsternhimmel würden wir nichts wissen; unsere eigene Sonne nur mühsam an ihren Flecken entdecken, und bloß den Mond und die Planeten als dunklere Scheiben auf dem sonnenhellen Himmelsgrund unterscheiden.

Wir dürfen über sein Vertrauen in die „schaffende Allmacht" schmunzeln, denn natürlich wissen wir mehr über einen 6 000 Grad heißen Kosmos, als irgendjemand 1823 wissen konnte. Wissen wir genug, um das Paradoxon zu lösen?

Die Lösung

Eine unvermeidbare Schwäche in Olbers' Argument war dessen rein qualitativer Charakter. 1823 war die Zahl F_1 nicht quantitativ angebbar; erst 1838, zwei Jahre vor Olbers' Ableben, gelang seinem Meisterschüler Friedrich Wilhelm Bessel, seit 1810 Direktor der Sternwarte Königsberg, an 61 Cygni die erste Parallaxenmessung eines Fixsterns. Im Jahr darauf bestimmte Friedrich Wilhelm Struve die Parallaxe des Sirius. Seitdem wußte man, daß unsere nächsten Nachbarn im All eine typische Entfernung $R_1 \approx 10$ Lichtjahre von uns besitzen. Damit können wir rechnen: Radius der Sonne $7 \cdot 10^5$ km, 10 Lichtjahre $\approx 10^{14}$ km, also $\delta \approx 7 \cdot 10^{-9}$; mit $N_1 \approx 10$ ergibt das

$$F_1 \approx 10^{-16} \quad \Rightarrow \quad N_s \approx 10^{16} \ .$$

Es wäre also das Licht aus 10^{16} Schichten von je 10 Lichtjahren Dicke zu berücksichtigen, d. h. aus einer Kugel von 10^{17} Lichtjahren Durchmesser! – Unsere Milchstraße hat einen Durchmesser von 10^5 Lichtjahren. Ihr Licht kann deshalb nur den 10^{12}-ten Teil des postulierten hellen Nachthimmels beitragen.

Die Größe der Milchstraße wurde allerdings erst hundert Jahre nach Olbers' Aufsatz bestimmt. Daß sie – verglichen mit den berechneten 10^{17} Lichtjahren – so winzig ist, versetzt Olbers' Argument einen ersten Schlag. Denn weiter draußen, über das uns bekannte All gemittelt, sind die Sterne noch dünner gesät. Der mittlere Abstand nächster Nachbarn ist 1 000 statt 10 Lichtjahre. δ^2 und damit die Zahl F_1 werden nochmals um einen Faktor 10^6 kleiner; die für den hellen Nachthimmel benötigte Kugel wächst im Radius auf 10^{23} Lichtjahre!

Spätestens hier schlägt Quantität in Qualität um. Denn selbst wenn man an der Unendlichkeit von Raum und Zeit festhalten möchte, ist jetzt zu bedenken, daß – wie wir seit etwa 50 Jahren wissen – Sterne eine endliche Lebensdauer von einigen 10^{10} Jahren haben. Olbers macht aber stillschweigend die Annahme gleichmäßigen Strahlens über 10^{23} Jahre, denn anders kann das Licht aller Sterne in der berechneten Kugel nicht gleichzeitig unser Auge treffen. Aber die stellare Lebensdauer verhält sich zu dieser gewaltigen Zeitspanne wie eine Mikrosekunde zu einem Jahr! – Der Kosmos mag unendlich ausgedehnt sein und seit Ewigkeiten existieren: die Strahlungsenergie der Sterne reicht um 12 oder 13 Größenordnungen nicht aus, den Nachthimmel 90 000-fachem Sonnenlicht zu erfüllen. (So viele Sonnenflächen bedecken einen halben Himmel.)

Es geht in erster Linie nicht um die Eigenschaften von Raum und Zeit des ganzen Kosmos, auch nicht um seine Homogenität, sondern vor allem um eine Energiebilanz der von den Sternen ausgesandten Strahlung. Dabei handelt es sich um alles andere als eine Gleichgewichts-Situation: Strahlung verläßt die heißen Sterne und breitet sich in einen ziemlich kalten Raum aus – wie kalt, wissen wir seit Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung 1965 durch Arno Penzias und Robert Wilson: 2.7 Kelvin. Für das Licht der Sterne ist der Kosmos thermodynamisch ein offenes System, ein fast leerer „schwarzer Absorber“, ungemein weit entfernt vom Gleichgewicht. In der fiktiven Situation des leuchtenden Nachthimmels wird aber davon ausgegangen, der Absorber sei längst vollgelaufen. Wenn aus allen Richtungen Sonnenlicht auf uns einstrahlt, dann herrscht auch bei uns eine Temperatur von 6 000 Grad. Dann sitzen wir in einem Ofen, der alle Moleküle und sogar Atome auseinanderreißt, ionisiert. Die Materie liegt als Plasma vor. Leben von der Art, wie wir es kennen, kann es nicht geben, es sei denn, die „schaffende Allmacht“ änderte die Naturgesetze. Die Biophysik dieses Jahrhunderts hat nämlich klargemacht, daß Leben nur fernab vom Gleichgewicht existieren kann.

Fragen wir wieder quantitativ, was über die Thermodynamik dieses angenommenen Gleichgewichts gesagt werden kann. Nach dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz enthält ein Raumgebiet, das durch umgebende Wände (z. B. Sternoberflächen) auf einer Temperatur T gehalten wird, die Energiedichte

$$u = \sigma \cdot T^4 \qquad \text{mit} \qquad \sigma = 7.56 \cdot 10^{-16}\ \mathrm{J/m^3K^4}\ .$$

Die Strahlungsenergie selbst ergibt sich als Produkt aus dem Volumen des Gebiets mit dieser Energiedichte. Vergleichen wir die Energiedichte eines 6 000 Grad heißen Universums, das im Gleichgewicht mit den Oberflächen der Sterne stünde, und die des real existierenden knapp 3 K kalten Kosmos, so sehen wir, daß zum Gleichgewicht ein Faktor $(6000/3)^4 \approx 10^{13}$ an Energie fehlt.

Und diese Energie läßt sich auf keine Weise irgendwoher beschaffen. Denn selbst wenn wir alle Materie des Weltalls gemäß der Einstein-Gleichung $E = mc^2$ in Strahlungsenergie verwandelten, so brächte uns die mittlere bekannte Materiedichte von etwa einem Proton pro m^3 lediglich auf eine Energiedichte von $2{\cdot}10^{-10}$ $\mathrm{J/m^3}$ und damit eine Strahlungstemperatur von etwa 20 K. Bedenken wir aber, daß Sterne im Laufe ihrer Lebensdauer nur etwa ein Promille ihrer Masse in Strahlung umwandeln, so folgt, daß Sternenlicht den Kosmos allenfalls auf $20/1000^{1/4} \approx 3.5$ K „erwärmen“ könnte, also etwa auf die Temperatur, die er ohnehin schon hat. Das reicht nicht für einen hellen Nachthimmel.

Fassen wir zusammen. Von den vier Annahmen, aus denen das Olberssche Paradoxon gedanklich konstruiert wird – Unendlichkeit des Raumes, Ewigkeit der Zeit, Homogenität, thermodynamisches Gleichgewicht – ist die vierte am offensichtlichsten verletzt. Um Olbers' hellen Nachthimmel zu realisieren, benötigte die schaffende Allmacht 10^{12} bis 10^{13} mal mehr Energie, als ihr gegeben zu sein scheint.

Wir haben das Argument in zweierlei Gestalt vorgetragen: Die kurze Lebensdauer der Sterne im Vergleich zu der Zeit, die Licht zur Ausbreitung über eine Entfernung von 10^{23} Lichtjahren benötigt, ist die eine Seite der Medaille. Die andere ist die direkte Berechnung der Energiedichten mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes (s. Kasten 2). Daneben ist vergleichsweise unerheblich, ob der Kosmos endlich oder unendlich sei. Aber natürlich wäre Endlichkeit in Raum und/oder Zeit ebenfalls eine „Lösung" des Paradoxons. Hinsichtlich des Raums ist diese Frage bislang nicht entschieden. Bezüglich der Zeit aber ist die überwiegende Mehrheit der Kosmologen der Ansicht, daß es einen Anfang vor einigen 10^{10} Jahren gegeben habe. Selbstverständlich wäre allein damit das Problem erledigt. Wenn mehrere Argumente zusammenkommen, die einzeln schon als Erklärung ausreichen, dann bleibt es jedem überlassen, sich eines als besonders überzeugend auszusuchen. Oder man konstatiert, die Schwierigkeiten hätten sich in Wohlgefallen aufgelöst.

Ist das alles?

Wäre dann Olbers' Gedankenspiel einfach nur unsinnig gewesen? – Erstaunlicherweise führt die naheliegende Frage nach der Herkunft des Faktors 10^{12} zu seinem sonnenhellen Rundumhimmel zurück.

Denn sowohl die zeitliche Endlichkeit als auch die immense Ferne vom Gleichgewicht widerspiegeln eine geschichtliche Entwicklung des Kosmos. Deren auffälligster Zug ist die in den zwanziger Jahren von Edwin Hubble entdeckte Expansion, über die man sich nicht genug wundern kann, denn in einem System, dessen einzig bekannte langreichweitige Kraft die Gravitation ist (die Coulombkraft wird durch Ladungsausgleich abgeschirmt), sollte man Kontraktion und nicht Expansion erwarten. Expansion aber bedeutet, daß die Energiedichte mit der Zeit ständig abnimmt (vorausgesetzt, man glaubt nicht an die Nachlieferung von Materie aus dem Nichts, wie die *steady state*-Theorie sie postuliert). In der Vergangenheit muß sie größer gewesen sein, und es läßt sich errechnen, daß zu einem Zeitpunkt, der mit 300 000 Jahren nach dem Urknall angebbar ist, die Temperatur der jetzt 3 K kalten Hintergrundstrahlung 3 000 K heiß gewesen sein muß: gleißend helles rötliches Licht aus allen Richtungen – Olbers-Himmel pur.

Der Faktor 1 000 in der Temperatur bedeutet nach dem T^4-Gesetz einen Faktor 10^{12} in der Energiedichte. Damals herrschte das Gleichgewicht, das Olbers vorschwebte. In diesem Stadium waren Strahlung und Materie noch untrennbar miteinander verbunden: die Atome waren ionisiert, d. h. in geladene Bestandteile zerlegt, so daß elektromagnetische Wellen in kräftiger Wechselwirkung mit ihnen standen und nicht entweichen konnten. Gefangenes Licht in undurchsichtigem Plasma. Es fehlen uns zur Beschreibung dieser Phase der kosmischen Entwicklung nicht nur Worte und Vorstellungen, sondern auch solides physikalisches Wissen im Hinblick auf die Mechanismen möglicher Strukturbildung in Form räumlicher Inhomogenitäten. Ob wirklich – und in welchem Sinne überhaupt! – strukturloses Gleichgewicht herrschte, ist nicht so klar. Zum guten Teil dürfte die diesbezügliche Annahme des Standard-Modells in unserer Phantasielosigkeit begründet sein.

Wie aber ist es möglich, daß einmal eingestelltes Gleichgewicht zerstört wird? Gilt nicht der zweite Hauptsatz der Thermodynamik, nach dem alles Geschehen zum Gleichgewicht tendiert? Er gilt in geschlossenen Systemen, doch der expandierende Kosmos ist, wie schon gesagt, nicht geschlossen. Deshalb konnte mit zunehmender Ausdehnung und abnehmender Energiedichte die Strahlung von der Materie entkoppeln und zwischen ihnen ein wachsendes Ungleichgewicht entstehen. Die Strahlung für sich blieb im Gleichgewicht, im Einklang mit der jeweils aktuellen Energiedichte durch eine sinkende Temperatur gekennzeichnet. Die Materie dagegen kondensierte zu neutralen Atomen und Molekülen und verdichtete sich unter dem Einfluß der Gravitation lokal zu Clustern, Galaxien und Sternen. Die Einzelheiten dieses Geschehens sind nur zum Teil verstanden, denn allzuvieles läuft in Systemen, die von der Gravitationskraft regiert werden, unserer Intuition zuwider. Zum Beispiel fordert der zweite Hauptsatz in ihnen gerade nicht die Tendenz zur räumlichen Gleichverteilung; das Prinzip der Entropie-Maximierung favorisiert extreme Inhomogenitäten in Form schwarzer Löcher. Es wird immer deutlicher, daß der Zeitpfeil, den wir als empirische Gegebenheit erleben, in dieser irreversiblen kosmischen Entwicklung seine Begründung findet [4].

Während nun im kälter werdenden Kosmos Materie zu Sternen kondensiert, entzünden sich in ihrem Inneren die nuklearen Öfen und produzieren Strahlung, die mit der des Hintergrunds in wachsendem Ungleichgewicht steht. Die Erde verdankt diesem Ungleichgewicht den Entropiestrom, auf dem alles Leben gedeiht, wir Menschen eingeschlossen. Der Beitrag des Sternenlichts zur kosmischen Energiedichte wird aber immer unbedeutender. Wer Augen nur für Licht von einigen tausend Kelvin hat, für den wird der Nachthimmel zunehmend dunkel ...

Zur Geschichte des Paradoxons

Der Begriff „Olberssches Paradoxon" ist übrigens erstaunlich jung. Erst 1952 wurde er von Herman Bondi eingeführt, in seinem Buch *Cosmology*, einem der Standardwerke der *steady state*-Theorie des Kosmos [5]. Bondi, Thomas Gold und Fred Hoyle nahmen wie Kant einen unendlich ausgedehnten und ewig existierenden Kosmos an; sie gingen insofern von ähnlichen Prämissen aus wie Wilhelm Olbers und hatten deshalb dasselbe Problem. Sie nannten es – solange ungelöst – das Olberssche Paradoxon und machten damit den Bremer Arzt (Abb. 1) zu einem der Begründer der modernen Kosmologie. Jedenfalls ist er der Welt durch diese späte Würdigung einer einzigen Altersschrift heute bekannter als aufgrund seiner früheren Erforschungen von Kometen und Kleinplaneten. Nicht unwesentlich hat der katholische Geistliche und Kosmologe Stanley Jaki aus Princeton dazu beigetragen, dessen Buch *The Paradox of Olbers' Paradox* von 1969 – eine flammende Streitschrift gegen die *steady state*-Theorie – Olbers' Gedanken als ärgerliche Herausforderung an die Kosmologie beschreibt, die erst mit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie angemessen beantwortet worden sei [6].

Jakis Buch enthält reichlichen Stoff zur Geschichte und Vorgeschichte des Problems. Es weist darauf hin, daß Olbers nicht der erste war, der es thematisierte. Schon Kepler hatte 1610 darüber nachgedacht und eben wegen des ansonsten unvermeidbar hellen Nachthimmels die Unendlichkeit des Kosmos verworfen. Um 1720 hatte Halley das Thema diskutiert, vor allem aber 1744 der Genfer Kometenforscher Philippe Loÿs de Chéseaux, dessen Werk Olbers besaß und gekannt haben muß (Abb. 2). Darin wird als Lösung erstmals eine schwache Absorption der Strahlung auf ihrem Weg durch den Kosmos vorgeschlagen. Genau dies hält auch Olbers für die Lösung, wenn er schreibt

> Nehmen wir zum Beispiel an, der Weltraum sei nur in dem Grade durchsichtig, daß von 800 Strahlen, die Sirius ausstrahlt, 799 bis zu der Entfernung gelangen, worin wir uns von ihm befinden, so wird schon dieser ganz kleine Grad von Undurchsichtigkeit mehr als hinreichend sein, das unendlich ausgedehnte Fixsternsystem uns so erscheinen zu lassen, wie wir es wirklich sehen.

Er berechnet, daß dann *in dem Abstande von 10 000 Siriusweiten . . . die Helligkeit der Fixsterne nur noch so groß, als die des Vollmondes* sei und daß *alle Sterne, die über 30 000 Siriusweiten von uns abstehen, nichts mehr zur Helligkeit des Himmelsgrundes beitragen.*

Diese Lösung wurde ab etwa 1850 von John Herschel und anderen für ungültig erklärt. Damals entstand die Theorie des thermodynamischen Gleichgewichts, derzufolge absorbierende interstellare Materie sich aufheizen und dann ebenso hell wie die Sterne strahlen müßte. So ohne weiteres dürfen wir diesen Einwand heute nicht gelten lassen, denn Gleichgewicht in gravitierenden Systemen ist eine delikate Sache; die Hubblesche Expansion läßt zwischen der Strahlung der Sterne und dem kosmischen Hintergrund ein wachsendes Ungleichgewicht entstehen. Dennoch bleibt es dabei, daß die Vorstellungen von de Chéseaux und Olbers im Kern unrichtig sind: wenn auch z. B. das galaktische Zentrum sich hinter Dunkelwolken verbirgt, so erreicht uns doch ungeschwächtes Licht aus Milliarden Lichtjahren Entfernung.

Die *steady state*-Theorie bietet als Lösung die Rotverschiebung des Lichts im expandierenden Universum an: in hinreichender Entfernung von uns wird die Strahlung der Sterne so langwellig, daß wir sie nicht mehr sehen. Unendlichkeit in Raum und Zeit sowie Homogenität des Kosmos bleiben vorausgesetzt, das Gleichgewicht wird allerdings durch die Annahme eines stationären Zustands ersetzt, in dem die Verdünnung der Materie aufgrund der Expansion durch Nachschub in Form einer *creatio ex nihilo* kompensiert wird. Zwar wird diese kosmologische Theorie heute allgemein für falsch gehalten (sie kann mit der 3K-Hintergrundstrahlung nichts anfangen), doch hält sich hartnäckig ihr Lösungsvorschlag für das Olbers-Paradoxon. Sei etwa aus der Cambridge Enzyklopädie der Astronomie zitiert (deutsche Ausgabe Orbis Verlag, München 1989, S. 379): *Es gibt ein interessantes Nebenprodukt der kosmischen Expansion und der Rötung des Lichts entfernter Galaxien. Das ist das sogenannte Olberssche Paradoxon.* Im Lichte des oben Gesagten ist diese Formulierung, gelinde gesagt, mißverständlich. Im Kosmos, den wir beobachten, wäre der Himmel auch ohne Expansion dunkel. Richtig wird der Satz erst dann, wenn wir zuerst die geringe Energiedichte des Kosmos als Nebenprodukt der Expansion verstehen; wichtig ist nicht die Rotverschiebung des Sternenlichts, sondern die der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Auf Vorschläge, das Paradoxon durch Aufhebung der Homogenität des Kosmos zu lösen, soll hier nicht eingegangen werden, wenngleich es sich um eine interessante Variante handelt. Trotz der Entdeckung großskaliger Strukturen in der Galaxienverteilung wird an der globalen Homogenität aber nicht ernsthaft gezweifelt (man müßte sich sonst zu weit von Kopernikus entfernen).

Im Rückblick auf unser Jahrhundert lassen sich zwei große Revolutionen in der Kosmologie konstatieren. Die erste geht auf Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie (ART) von 1915 zurück, die andere ist mit der Vereinigung von Urknall-Hypothese und Elementarteilchen-Theorie verbunden, die um 1970 erfolgte und in S. Weinbergs Bestseller über *The First Three Minutes* ihren unübertroffenen Ausdruck fand [7].

Die ART für sich genommen ist noch keine Kosmologie; sie erlaubt je nach den Gegebenheiten der Materieverteilung endliche oder unendliche Modelle des Kosmos. Anders als Jaki es in seinem erwähnten Buch darstellt, ist die nach Einstein gegebene bloße Möglichkeit eines endlichen Kosmos weder hinreichend als Lösung des Olbersschen Paradoxons, noch ist sie notwendig. Es kommt vor allem darauf an, wie in dem jeweiligen Modell Materie und Strahlung verteilt sind. Das Standard-Modell des Urknalls und der seither abgelaufenen Geschichte macht dazu Annahmen, die das Paradoxon befriedigend erklären. Danach hat es, wie beschrieben, den „Olbers-Himmel“ in einem Zwischenstadium tatsächlich gegeben. Als Folge der kosmischen Expansion hat dieser sich dann abgekühlt und sein Strahlungs-Gleichgewicht zu langen Wellen hin verschoben. Wir sehen ihn heute als 3K-Strahlungs-Hintergrund.

Der fast schon banal anmutende Gesichtspunkt, daß es dem heutigen Kosmos im sichtbaren Licht schlicht an der Energie fehlt, die für das von Olbers entworfene Szenario vonnöten wäre, wurde vor allem von Edward Harrison artikuliert, zuerst in einem brillanten Artikel in *Physics Today* [8], ausführlicher dann in seinem Buch *Kosmologie* [9]. Nach dem vorsichtigen Urteil des Philosophen Vollmer [1] wäre damit die gültige und in der Akzentsetzung überzeugende Auflösung des Paradoxons formuliert.

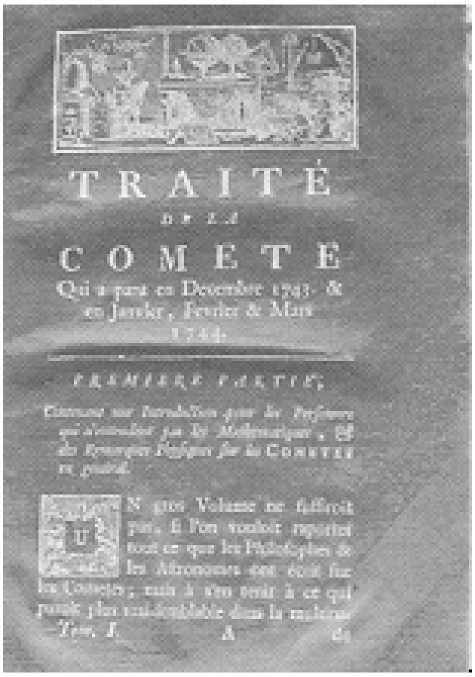
Doch kann man sicher sein? Das letzte Wort über die Struktur des Kosmos ist noch lange nicht gesprochen. Das Frappierende an guten einfachen Fragen – Kinderfragen eigentlich – ist, daß sie das Nachdenken mit vielfältigen Verzweigungen in die Tiefe führen. Immer wird das Beste, Wichtigste, das unsere Wissenschaften zutage fördern, in der Kosmologie seine Widerspiegelung finden. Am Ende des 20. Jahrhunderts ist unser Weltbild durch das Wissen der Elementarteilchenphysiker geprägt. Mit ihrer Hilfe glauben wir zu verstehen, warum der Tag hell und die Nacht dunkel ist. Aber Kinderfragen wechseln oft sprunghaft ihren Sinn; das Warum läßt sich iterieren oder in neuem Kontext neu definieren. Wenn neue Fragen die Menschheit bewegen, dann wartet sicher auch die Dunkelheit der Nacht auf eine neue Interpretation.

Abb. 1: Heinrich Wilhelm Matthias Olbers.

Der Pastorensohn aus Arbergen bei Bremen, geb. 1758, war im Hauptberuf Arzt, doch schon während seines Studiums in Göttingen interessierte ihn vor allem die Astronomie. Um 1800 galt er als der erfolgreichste Beobachter und Entdecker von Kometen. Seine Abhandlung „Ueber die leichteste und bequemste Methode, die Bahn eines Kometen zu berechnen" von 1797 ist noch heute aktuell. Zusammen mit dem Amtmann Johann Hieronymus Schroeter, der in Lilienthal bei Bremen die damals größte kontinentale Sternwarte betrieb, und den gemeinsamen Schülern K. L. Harding (ab 1805 Professor in Göttingen) und F. W. Bessel (ab 1810 Professor in Königsberg) machte er Bremen für einige Zeit zu einem führenden Zentrum der Astronomie. Am 20. 9. 1800 wurde anläßlich eines Astronomentreffens in Lilienthal die „Vereinigte Astronomische Gesellschaft" gegründet, deren Hauptaufgabe die Auffindung des „fehlenden Planeten" zwischen Mars und Jupiter sein sollte. Olbers war der erste, der am 1. 1. 1802 die Ceres wiederfand, die Piazzi ein Jahr zuvor entdeckt, dann aber verloren hatte und deren Position Gauß in der Zwischenzeit berechnen konnte. Olbers entdeckte selbst den zweiten und den vierten Kleinplaneten (Pallas 1802, Vesta 1807). Während der napoleonischen Besetzung war er für Bremen Mitglied der französischen Legislative in Paris und verhandelte dort über die Gründung einer Bremischen Universität.

In der englischen Literatur wird in der Regel sein erster Vorname Heinrich verwendet, doch war Wilhelm sein Rufname, mit dem allein er unterzeichnete.

Abb. 2: Traktat von Jean-Philippe Loÿs de Chéseaux



TRAITÉ

COMETE

Qui a paru en Decembre 1743. & en Janvier, Fevrier & Mars 1744.

Im Anhang seines Berichts über den Kometen von 1743 entwickelt der Genfer Astronom de Chéseaux bereits sehr ähnliche Gedanken wie 80 Jahre später Wilhelm Olbers. Olbers hat sie gekannt, hält es aber offenbar für angemessener, seinen Ausgangspunkt bei Kant zu nehmen, dessen Autorität zu seiner Zeit unangefochten war. Dieses Exemplar des Traktats von 1744 stammt vermutlich aus dem Besitz von Olbers; es befindet sich heute als Teil des Struve-Fonds in der Bibliothek der Sternwarte Pulkovo. Wilhelm Struve hatte nach Olbers' Tod 1840 dessen gesamte private Bibliothek aufgekauft und damit den Grundstock zu der Bibliothek der damals neugegründeten russischen „Hauptsternwarte" geschaffen. Leider ist sie heute – wie die ganze einst so ruhmreiche „astronomische Hauptstadt der Welt" – in beklagenswertem Zustand. Direktor Abalakin muß um ihr Überleben kämpfen.

Abb. 3 (links): Die Waldanalogie

In seiner Darstellung des Olbers-Paradoxons [9] entwickelt E. R. Harrison die Analogie zu der Frage, wie groß ein Wald sein müsse, damit man nicht mehr durch ihn hindurchschauen kann. Ist a der mittlere Abstand benachbarter Bäume und d ihr typischer Durchmesser, dann ist $s \approx a^2/d$ die Entfernung, bis zu der man noch Bäume sehen kann, die sog. „Sichtbarkeitsgrenze". Bei $a = 10$ m Abstand und $d = 50$ cm Dicke ergibt sich eine Sichtbarkeitsgrenze von 200 m. Der Wald ist durchsichtig, wenn er sich wie hier nur über 150 m erstreckt.

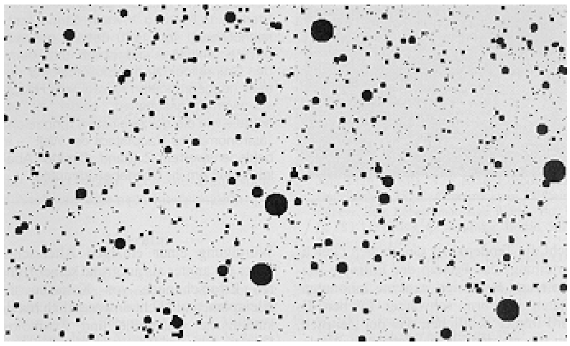


Abb. 4 (rechts): Das Olbers-Paradoxon mit unrealistisch großer Sterndichte

Die Waldanalogie läßt sich auf den Sternenhimmel übertragen. Ist a der mittlere Abstand benachbarter Sterne, f ihre Querschnittsfläche, so ist $s \approx a^3/f$ die Sichtbarkeitsgrenze, das ist die Entfernung, bis zu der wir Sterne sehen können. Bis dorthin blicken wir durch $N_s = s/a = a^2/f$ Schichten der Dicke a, deren Sterne jeweils den Bruchteil $F_1 = f/a^2$ des Himmels bedecken. – Im hier gezeigten Beispiel bedecken 5 Sterne der ersten Schicht zusammen 1/600 der „Himmelsfläche"; 20 Sterne der zweiten Schicht bedecken dieselbe Fläche u.s.w. Man könnte bis etwa zur 600. Schicht sehen, d. h. es würden 600 Schichten benötigt, um einen „Olbers-Himmel" zu erzeugen. Das Bild zeigt aber nur 12 Schichten; lediglich 1/50 des Himmels ist bedeckt. – Für den realen Himmel wäre die Zahl 1/600 durch 10^{-23} zu ersetzen; statt 1/50 ist etwa 10^{-12} zu nehmen.

Kasten 1: Olbers' F_1 und Harrisons „Sichtbarkeitsgrenze" s.

Der amerikanische Kosmologe Edward R. Harrison hat das Olbers-Paradoxon an der Frage verdeutlicht, wie weit man in einen Wald hineinschauen kann, dessen Bäume eine Dichte von 1 Baum pro Fläche a^2 und einen Durchmesser d haben (s. Abb. 3). Man macht sich sich leicht klar, daß man in einem solchen Wald noch bis zur Tiefe $s = a^2/d$, der sog. „Sichtbarkeitsgrenze", Bäume sieht – sofern der Wald überhaupt so tief ist.

Das Konzept der Sichtbarkeitsgrenze läßt sich ohne weiteres auf den Sternenhimmel übertragen. Ist $n = 1/a^3$ die räumliche Dichte der Sterne und $f = \pi r^2$ ihre Querschnittsfläche, dann ist die Sichtbarkeitsgrenze

$$s = \frac{a^3}{f} = \frac{1}{nf} \ .$$

Der Zusammenhang mit der Olbersschen Argumentation ergibt sich sofort, wenn man s/a als die Anzahl der Schalen mit Dicke $a = R_1$ interpretiert, durch die man hindurchschauen kann. Es wäre demnach

$$\frac{s}{a} = N_s = \frac{1}{F_1} \quad \Rightarrow \quad F_1 = \frac{a}{s} = \frac{f}{a^2} \ .$$

Vergleicht man dies mit dem Olbersschen

$$F_1 = N_1 \frac{\delta^2}{4} = \frac{N_1}{4\pi R_1^2} f \ ,$$

so sieht man, daß bei der Identifikation von a mit R_1 die Zahl N_1 der „Sterne erster Größe" als etwa 12 ($\approx 4\pi$) anzusetzen ist.

Kasten 2: Energiedichte im Gleichgewicht und Sichtbarkeitsgrenze

An der Oberfläche eines typischen Sterns mit der Oberflächentemperatur T_S ist die Energiedichte nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz $u_S = \sigma T_S^4$. Durch Strahlung wird diese Energie mit Lichtgeschwindigkeit nach außen abgeführt (und natürlich von innen her nachgeliefert). Nach dem Gesetz der quadratischen Abnahme der Intensität mit dem Abstand vom Stern führt das im Abstand R zu einer Energiedichte $u_S(R) = u_S \cdot (r/R)^2$, wobei r der Radius des Sterns ist.

An einem gegebenen Ort im Kosmos überlagern sich die Energiedichten der umgebenden Sterne additiv. Rechnen wir aus, welche totale Energiedichte sich im Zentrum einer Kugel von Radius R_K einstellt, die gleichmäßig von Sternen der Dichte $n = 1/a^3$ erfüllt ist:

$$u = \int_0^{R_K} n \cdot u_S(R) \cdot 4\pi R^2 \, dR = u_S \cdot nf \cdot 4R_K = \frac{4R_K}{s} \cdot u_S \ .$$

Dabei haben wir $f = \pi r^2$ als Querschnittsfläche eines Sterns und $s = 1/nf$ als Sichtbarkeitsgrenze gemäß Kasten 1 benutzt. Thermodynamisches Gleichgewicht zwischen den Sternoberflächen und der Strahlung im umgebenden Raum herrscht dann, wenn $u = u_S$. Wir sehen also, daß diese Gleichgewichtsbedingung in etwa mit der Forderung $R_K = s$ übereinstimmt. Wenn also der Himmel mit Sternen dicht bedeckt ist, herrscht überall im Raum dieselbe Temperatur wie an den Oberflächen der Sterne.

Literatur

[1] G. Vollmer *Warum wird es nachts dunkel? Das Olberssche Paradoxon als wissenschaftliche Fallstudie.* Stuttgart, Hirzel, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft 1992

[2] I. Kant, *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels.* Königsberg, Leipzig: Petersen 1755; Nachdruck: Erlangen: Fischer 1988

[3] H. W. M. Olbers, *Ueber die Durchsichtigkeit des Weltraums.* Astron. Jahrb. für das Jahr 1826, S. 110-121. Hrsg. J. Bode. Berlin, Späthen 1823. Abgedruckt in *Wilhelm Olbers. Sein Leben und seine Werke.* Bd. 1, S. 133-141. Hrsg. C. Schilling. Berlin, Julius Springer 1894

[4] R. Penrose, *The Emperor's New Mind.* Oxford University Press 1989

[5] H. Bondi, *Cosmology.* Cambridge Univ. Press 1960

[6] S. Jaki *The Paradox of Olbers' Paradox.* New York: Herder and Herder 1969

[7] S. Weinberg, *The First Three Minutes.* New York: Basic Books 1977

[8] E. R. Harrison, *Why is the Sky Dark at Night?* Physics Today 1974/2 pp. 30-36

[9] E. R. Harrison, *Cosmology.* Cambridge: 1981; deutsche Übersetzung: *Kosmologie.* Darmstadt: Verl. Darmstädter Blätter 1983