

Liebe Leserin, lieber Leser,

vor einem halben Jahrhundert erreichte den Herausgeber eines angesehenen astrophysikalischen Journals ein anderthalbseitiges Schreiben, datiert vom 13. Mai 1965, worin von einem gemessenen „Temperaturrezess“ von ca. 3,5 Grad berichtet wurde. Es handelt sich um ein Strahlungskontinuum, das im Mikrowellenbereich dominiert und aus allen Richtungen mit gleicher Intensität einfällt. Der Himmelshintergrund, vor dem sich die Sterne abheben, ist nicht absolut dunkel. Das schwache Leuchten läuft zwar unter dem Begriff Wärmestrahlung, ist aber derart kalt, dass das Strahlungsmaximum im Mikrowellenbereich zu liegen kommt. Tatsächlich wurde dieser universelle Strahlungshintergrund von Arno A. Penzias (geb. 1933) und Robert W. Wilson (geb. 1936) bei einer Wellenlänge von 7,35 cm (4,08 GHz¹) zufällig entdeckt, und zwar mittels einer Hornantenne der Bell-Laboratorien in Holmdel², die vormals der Satellitenkommunikation gedient hatte. Am hellsten ist das 3-K-Hintergrundleuchten bei einer Wellenlänge von einem Millimeter. Leider ist die Erdatmosphäre dort für elektromagnetische Strahlung undurchlässig. Man muss sich schon in den Weltenraum begeben, will man die 3-K-Strahlung in Gänze erforschen.

Die Deutung des schwachen Leuchtens war in einer fünfseitigen Mitteilung vom 7. Mai an das genannte Fachblatt zu finden: Es handele sich um Reliktstrahlung aus einer Zeit, als das Universum tausendmal kleiner war als heute, so eine Gruppe von Physikern um Robert Dicke (1916–1997) aus dem 60 km von Holmdel entfernten Princeton. Dicke, dessen Geburtstag sich diesen Monat zum 99. Male jährt, hatte sich mit seinen Leuten auf die Suche nach dieser Strahlung begeben und war vom Zufallsfund ihrer Kollegen von der Telefongesellschaft überrascht worden. Gut gelaufen, kann man da nur sagen: Eine Entdeckung, nach der nicht gesucht wurde, ist allemal überzeugender als eine Bestätigung von etwas, was man ohnehin zu finden hoffte.

¹Zum Vergleich: Mikrowellenherde benutzen längerwellige Strahlung von 12 cm bzw. 2,5 GHz. Die derzeit höchste in Deutschland genutzte Mobilfunkfrequenz liegt bei 2,6 GHz.

²Die Geschichte der Radioastronomie hatte 1931 in Holmdel begonnen. Karl Jansky vernahm bei 14,5 m Wellenlänge (20,5 MHz) als erster das „Gezische“ aus dem galaktischen Zentrum im Sternbild Sagittarius.

Darüber ist viel geschrieben worden, u. a. auch vom Kosmos-Boten. In der Juliausgabe des vorigen Jahres war dem Leser zugemutet worden, sich gedanklich in einen Ofen zu versetzen, dessen Wände 3000° heiß seien. Dass er dennoch fröre, sei allein der Expansion des Ofenuniversums zu verdanken. Die heißen Wände entfernten sich mit 99,9998 % der Lichtgeschwindigkeit, was die Temperatur auf „gefühlte“ $2,7\text{ K}$ ($-270,5^\circ\text{C}$) erniedrige. Er wurde belehrt, es handele sich um Planck'sche Wärmestrahlung. Nun, träfe das zu, lohnte keine genauere Untersuchung. Planck'sche Strahlung ist *un*informativ! Ihre Botschaft reduziert sich auf einen einzigen Zahlenwert — die Temperatur. Die kosmische Hintergrundstrahlung aber ist eine Informationsquelle ersten Ranges. Gott-sei-dank ist sie nicht wirklich Planck'sch!

Einen wunderschönen Monat Mai und ein frohes Pfingstfest wünscht den Lesern des Kosmos-Boten

Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Mai

Merkur ist Anfang Mai noch am Abendhimmel sichtbar. Am 7. Mai geht er auf maximale Distanz zur Sonne und erreicht eine östliche Elongation von 21° . Dominierend aber ist natürlich die Venus. Sie beherrscht zusammen mit dem Jupiter die abendliche Szene.

Apropos Merkur: Es ist nachzutragen, dass der NASA-Merkurmond MESSENGER³ nach über vierjähriger emsiger Tätigkeit in der Walpurgisnacht durch Aufschlag auf den Merkur zum Stillstand kam. Wie ich las, bezeichnet man so eine Schnellbremsung in Anlehnung an Aerobraking beschönigend als „Lithobraking“.

Der Mars hat sich bereits verabschiedet, Jupiter flieht zwar seit seinem Stillstand Anfang April wieder ostwärts, die Sonne aber flieht schneller. Beide kommen einander näher. Im Kommen: der Saturn. Der Ringplanet feiert am 23. Mai Opposition und ist vom Niedergang der Sonne bis zu deren Aufgang über dem Horizont. Die Ringe werden, wie bei den kommenden Oppositionen, weit geöffnet präsentiert.

³Das Apronym steht für *ME*rcury *S*urface, *S*pace *EN*vironment, *GE*ochemistry, and *R*anging.

Das 3-K-Enigma

Unter Kosmologen⁴ herrscht Konsens: Das All hat heiß begonnen und kühlt seither expansionsbedingt ab. Als 380 000 Jahre nach dem Urknall die Temperatur unter die 3000°-Marke fiel, entkoppelte die Strahlung vom Stoff. Seitdem führen die thermischen Photonen ein Eigenleben, nahezu unbehelligt vom stofflichen Inhalt des Universums (was sie zu Zeitzeugen prädestiniert). Oberhalb von 3000° war der Stoff ionisiert und das Universum opak wie die Sonne, durch die man ja auch nicht hindurchschauen kann. Bei ungefähr 3000° ließen sich die freien Elektronen mit den freien Protonen ein, und es bildeten sich durch Rekombination Wasserstoffatome. Mit dem Verschwinden freier Elektronen wurde das Universum schlagartig transparent! Inzwischen ist es um das Tausendfache gewachsen. Verkündet der Astronom, er könne bis zu des Alls Rand schauen, spielt er darauf an, dass er den 3000° heißen Stoff aus der Rekombinationsphase hoch-rotverschoben ($z = 1100$) im Mikrowellenbereich leuchten „sieht“. Tiefer in die Vergangenheit zu blicken ist ihm verwehrt, was nicht ausschließt, dass aus dem Nebel der Schöpfungsfrühe noch ganz andere Informationsträger aufsteigen. Man denke nur an sog. primordiale Gravitationswellen. Doch das ist Zukunftsmusik.

Gibt es eine plausible Erklärung, warum sich seitdem die Strahlung auf ein Tausendstel des damaligen Temperaturwertes abgekühlt hat? Und weshalb sieht das Strahlungsspektrum, also die Energieverteilung der Photonen, der Planckfunktion reiner Wärmestrahlung zum Verwechseln ähnlich?

Wem die Vorstellung eines kosmologisch sich vergrößernden Ofens mit einer 3000 Grad heißen Innenwand nicht behagt, der wird möglicherweise einer Analogiebetrachtung mehr abgewinnen: Strahlung ist ein Photonen„gas“. Mit Gasen kennt sich der physikalisch interessierte Leser aus. Er weiss, dass sich bei einem idealen Gas die Gasparkeln z. B. nicht in die Quere kommen. Das gilt in noch stärkerem Maße für Strahlung. Photonen interagieren nicht. Formelmäßig gilt für ein ideales (mehratomiges) Gas, welches wärmeisoliert von der Umgebung ist, ein adiabatischer Zusammenhang: Der Druck p wächst mit der Dichte ρ erhoben zur Potenz $4/3$, also $p \propto \rho^{4/3}$. Andererseits gilt

⁴Die Kosmologie ist eine einsame Wissenschaft. Sie hat es mit einem Solitär zu tun, dem `U n i v e r s u m`. Alle anderen historischen Wissenschaften, wie beispielsweise Geologie oder Biologie, können hoffen, dass ihre Aussagen eines Tages mit Tatsachen konfrontiert werden, die sich beim Studium anderer Planeten (Exo„geo“logie) und anderen Lebenssphären (Exobiologie) ergeben, die Kosmologie nicht.

idealerweise $p \propto \rho \cdot T$. Die Temperatur T muss⁵ also mit $T \propto \rho^{1/3}$ gehen. Man kann auch sagen, sie fällt umgekehrt proportional mit der Größe L des Behältnisses, da das Produkt aus Dichte ρ und Volumen L^3 , die Gasmasse, sich nicht ändert.

Angewandt auf elektromagnetische Strahlung (Licht, Radiostrahlung etc.) heißt das, die Temperatur eines in einem verspiegelten Kasten gefangenen Photonengases fällt in dem Maße, in dem die lineare Ausdehnung, die Größe des Gefäßes zunimmt. Man kann sich nun den Raum in eine Unzahl solcher verspiegelter Kästen⁶ zerlegt denken. Jedes dieser Kästchen hat sich seit der Rekombinationsphase in jede Richtung auf das Tausendfache ausgedehnt, die Temperatur der darin befindlichen Strahlung ist entsprechend auf ein Tausendstel des einstigen Wertes von 3000° gefallen, auf $2,726\text{ K}$. An der Gesamtanzahl der Photonen hat sich nichts geändert. Auf jedes Baryon (Proton, Neutron) entfallen rund eine Milliarde Photonen des kosmischen Wärmebads, d. h. in jedem Kubikzentimeter Weltraum tummeln sich heutzutage 400 Photonen. Die paar Photonen, die die Sterne beisteuern — von der Sonne sehen wir wegen ihrer Nähe einmal ab —, gehen in diesem „Photonensee“ unter.

Es ist eine Eigenheit Planck'scher Wärmestrahlung, dass sie bei adiabatischer Entspannung (sofern unbehelligt von störenden Einflüssen) Planck'sch bleibt. Einmal Planck'sch, immer Planck'sch! Nur die Temperatur verringert sich.

Halten wir fest: Die Temperatur des Photonengases fällt umgekehrt proportional mit dem „Weltradius“, und die spektrale Verteilung der Photonenenergie bleibt Planck'sch — sofern sie es immer schon war.

Wie kommt es zu einem Planckspektrum? Damit sich, im Innern eines Sterns beispielsweise, als Gleichgewichtszustand ein nichtssagendes⁷ Planckspektrum einstellt, muss Strahlung intensiv mit dem Stoff wechselwirken. Sie „vergisst“ dann nach einer Weile, wie es zum Gleichgewichtszustand kam. Photonen müssen dazu verschwinden und wiedergeboren werden. Streuung an freien Elektronen allein reicht nicht. Man muss schon tief in den „Brunnen der Vergangenheit“ hinabsteigen, um zu Zuständen zu gelangen, wo Strahlung

⁵Für heiße Luft trifft das nicht zu. Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2) sind zweiatomige Moleküle. Für diese gilt bei Adiabase $p \propto \rho^{7/5}$.

⁶Man kann die spiegelnden Zwischenwände auch wegdenken. Sie tun nichts zur Sache.

⁷Ein Planckspektrum kennt keine Spektrallinien! Einem Physiker im Innern eines heißen Ofens ist es nicht möglich, das Material der glühenden Ofenwand durch Spektralanalyse zu bestimmen. Konturen verschwinden ebenfalls im Strahlungsgleichgewicht.

und Stoff derart innig verbunden waren, dass die Angabe *einer* Temperatur ausreichte, die physikalischen Vorgänge zu erfassen, sprich sich ein Planckspektrum einstellen konnte. Das Universum kann nur wenige Jahre alt gewesen sein, der Horizont (\simeq aktuelles Alter \times Lichtgeschwindigkeit) ziemlich beschränkt. Nur in kleinen Bereichen konnte es deshalb zur Temperaturangleichung kommen. Doch woher wussten Teile des Universums, die damals unmöglich Blickkontakt haben konnten, weil sie außerhalb des jeweiligen Horizonts lagen, wie heiß sie zu sein hatten? Es gab offenbar ein Kommunikationsproblem.

Auf das Heute übertragen lautet die Frage: Wieso hat die Hintergrundstrahlung, die aus dem „Großen Wagen“ einfällt, bis auf zufallsbedingte Abweichungen die gleiche Temperatur, wie die aus dem „Kleinen“? Die beiden „Ofenwandpartien“, um beim Bild des Ofens zu bleiben, hatten nie thermischen Kontakt! Dieses Rätsel ist im Rahmen des sog. Standardmodells der Kosmologie nicht zu lösen, es sei denn, man baute als Anhänger anthropischen Denkens auf den **Z u f a l l**: Wäre das Universum nicht zufälligerweise so, wie es ist, gäbe es keine Frager!

Wer hingegen Erklärungen bevorzugt, wird sich auf die Suche nach einem Mechanismus begeben, der geeignet erscheint, dem Universum den Nimbus des höchst Unwahrscheinlichen zu nehmen. Die Crux ist, dass dadurch unsere Vorstellung von der Entwicklung des Kosmos zwangsläufig verkompliziert wird und der „Erklärungserfolg“ notgedrungen mit einem Verlust an Glaubwürdigkeit einhergeht.

Kosmologen sind kreativ. Sie haben, allerdings aus einem ganz anderen Grund, 1981 die kosmologische **I n f l a t i o n** erfunden und sie als Entwicklungsphase zeitlich zwischen Planckzeit und dem Beginn des Zeitraums, der durch das Standardmodell beschrieben wird, eingeordnet. Es geht um die Ära $10^{-43} \dots 10^{-32}$ Sekunden nach dem Urknall. Doch das sprengte nun wirklich den Rahmen dieser Mai-Ausgabe des Kosmosboten. Im Juni mehr dazu!