

Liebe Leserin, lieber Leser,

wer messen will, wie hell ein Stern ist, weiß es zu schätzen, befindet sich in der Nähe ein Vergleichssterne bekannter Helligkeit. Dieser dient als Anhaltsterne, an den man sich „dranhängt“. (Zu diesem Zweck wurde noch während des 2. Weltkrieges an der Sternwarte Babelsberg ein Fundamentalkatalog lichtelektrisch gemessener Sternhelligkeiten erstellt.) Für die Radioastronomie gilt das gleiche. Vor 50 Jahren nutzten deshalb die beiden Radioastronomen Arno A. Penzias (geb. 1933) und Robert W. Wilson (geb. 1936) eine vormals der Satellitenkommunikation (Echo!) dienende Hornantenne der Bell-Laboratorien, um die Radiohelligkeit himmlischer Radioquellen bei 7,35 cm Wellenlänge *absolut* zu messen, auf dass anderen Radioastronomen verlässliche Vergleichsquellen für *relative* Radiohelligkeitsmessungen zur Verfügung stünden. Was als technische Routinearbeit begann, zeitigte ungeahnte Früchte: die Entdeckung der kosmologischen Hintergrundstrahlung, der 3-K-Strahlung. Diese Entdeckung ist deshalb so überzeugend, *weil man nicht nach einem Mikrowellenhintergrund gesucht hatte*. Im Gegenteil, die beiden Forscher hatten nichts unversucht gelassen, eine irdische Ursache für das „Störsignal“ namhaft zu machen. Neben den Nachwirkungen einer Atombombenexplosion in der Hochatmosphäre war sogar Taubenmist als „Störsender“ verdächtigt worden. Nach einem Jahr stand fest, die Strahlung fällt aus allen Himmelsrichtungen mit gleicher Intensität ein. 1978 gab's dann den verdienten Nobelpreis für die beiden.

Einer ihrer Kollegen kommentierte die Entdeckung folgendermaßen: Sie hätten nach Dung gesucht und Gold gefunden, was das genaue Gegenteil der Erfahrung sei, die die meisten von uns machten.

Davon kann unsereiner nur träumen. Viel Spaß bei der Lektüre wünscht

Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Juli

Anfang Juli geht die Erde wieder einmal auf maximale Distanz zur Sonne: Am 4. Juli durchschreitet sie das Aphel ihrer Jahresbahn. Der Kosmos-Bote

vergisst nie, darauf hinzuweisen, dass uns diese Tatsache ein vergleichsweise langes Sommerhalbjahr mit mäßiger Sonneneinstrahlung beschert. In einem halben Platonischen Jahr, wenn die Wega Polarstern sein wird, kehren sich die Verhältnisse um. Dann kommen die Bewohner der südlichen Halbkugel in diesen Genuss.

Venus und Merkur sind westlich von der Sonne und gehen also vor ihr auf, Mars und Saturn verschwinden Ende des Monats bereits vor Mitternacht von der Bildfläche. Jupiter verbirgt sich hinter der Sonne: Am 24. Juli steht er in Konjunktion.

Die „Temperatur des Raumes“

Wie jede Geschichte hat die Entdeckung der 3-K-Hintergrundstrahlung eine Vorgeschichte.

Die „Temperatur des Raumes“ hatte schon Sir Arthur Eddington (1882–1944) abgeschätzt. Nach dem Entfernen der Sonne zeigte ein in den Raum gehaltenes Thermometer 3,18 K an – infolge der Bestrahlung durch die Fixsterne. Diese Temperatur wäre allerdings nur repräsentativ für den Ort der Sonne im Milchstraßensystem. In einem Kugelsternhaufen mäße man eine höhere Temperatur wegen des brillanteren Sternenhimmels dort.

Der Atmosphärenphysiker Erich Regener (1881–1955) wies 1933 darauf hin, dass bereits die „Ultrastrahlung“ (Höhenstrahlung, kosmische Strahlung) einen Körper, der diese vollständig absorbiert, auf eine Temperatur von 2,8 K aufheizte.

In beiden Fällen geht es nicht wie bei der 3-K-Strahlung um ein universelles Wärmebad aus thermischen Photonen, das den Kosmos erfüllt, sondern nur darum, was ein Thermometer am Ort der Sonne formal anzeigte.

Die Expansion des Raumes

Wie Edwin Hubble (1889–1953) 1929 herausfand, dehnt sich das überschaubare Universum aus. Die Rede ist von kosmologischer Rotverschiebung, Galaxienflucht, Hubble-Expansion. Je weiter eine Galaxie bereits von uns entfernt ist, desto schneller eilt sie von dannen, so der spektroskopische Befund. (Die Rotverschiebung der Spektrallinien wird dabei auf den Doppellereffekt zurückgeführt.) Teilt man den Abstand einer x-beliebigen Galaxie

durch ihre gegenwärtige Fluchtgeschwindigkeit, stößt man auf die seltsame Tatsache, dass sich vor rund 14 Milliarden Jahren alle Galaxien, egal wie weit sie jetzt von uns entfernt sind, „hier“ versammelt haben müssen. Das mit dem „hier“ ist nicht egozentrisch misszuverstehen. Jeder Beobachter, gleichgültig welcher Galaxie er angehört, wähnt sich im Ausgangspunkt der kosmologischen Expansion. Hubbles Expansionsgesetz (Fluchtgeschwindigkeit = Entfernung / Weltalter) ist in der Tat das einzige, das keinen Ort im Raum als Ursprung dieser Flucht auszeichnet. Alle Galaxien fliehen vor jeder. Dass das Universum nichts Statisches ist, ist nicht verwunderlich. Hat im Großen und Ganzen nur die Schwerkraft das Sagen, die immer nur anziehend wirkt, ist kaum vorstellbar, wie ein stabiles Etwas möglich sein soll. Das ahnte man bereits vor Hubbles epochaler Entdeckung¹.

Primordiale Elementsynthese

Der Stoff war also vor rund 14 Milliarden Jahren unvorstellbar dicht gepackt. Bloß dicht? George Gamow (1904–1968) ging einen Schritt weiter und meinte, der Urknall sei auch unvorstellbar heiß gewesen. Ein heißer Urknall aber bot sich als Ort der Elementsynthese an. Dass schwere Elemente wie Kohlenstoff oder Sauerstoff thermonuklear in Riesensternen entstehen könnten, konnte sich damals niemand vorstellen.

„Heiß“ ist im übrigen ein relativer Begriff. Kernteilchen, wie Proton oder Neutron, „frieren“ bereits bei zehn Milliarden Grad aus dem Strahlungsstoff-Gemisch „aus“. (Für den Kernphysiker zählt die Kernfusion im „nur“ 13 Millionen Grad heißen Sonneninneren bereits zur Tieftemperaturphysik!)

Die Euphorie wurde schnell gedämpft: Gamovs grandioser Idee, *alle* chemischen Elemente auf einen Schlag erzeugen zu lassen, war nur ein Teilerfolg beschieden. Das Universum kühlte zu schnell ab, und die Produktion schwererer Elemente als Helium scheiterte daran, dass es in der Natur keinen stabilen Atomkern mit fünf Nukleonen (Kernteilchen) gibt. Wenigstens gelang es, die Neutronen aus dem Urknall für alle Zeiten zu retten, indem sie in Heliumatomkerne eingebaut wurden. (Freie Neutronen zerfallen im Mittel binnen einer Viertelstunde. Man musste sich mit der Heliumsynthese bee-

¹Seinen Versuch, ein statisches Universum mittels einer kosmologischen Konstante zu erzwingen, hat Einstein später als den größten Fehler seines Lebens bezeichnet. Heute feiert Einsteins Konstante als „dunkle Energie“ Wiederauferstehung.

len!) Tatsächlich stammt fast der gesamte Heliumvorrat² im Universum aus den ersten Minuten des Universums. Das Helium, das lange danach in den Sternen produziert wird, fällt demgegenüber kaum ins Gewicht. (Das Helium in den Luftballons stammt nicht aus dem Urknall, sondern vom Uranzerfall.) Außer dem Helium blieb noch etwas Deuterium, d. h. schwerer Wasserstoff (²H), sowie Lithium (Li) übrig.

Bald sollte man froh darüber sein, dass das Erzeugen schwerer Elemente im frühen Universum unterblieb. Man stieß nämlich auf Sterne, die kaum schwere Elemente enthielten. Da diese „metallarmen“ Sterne alle der ersten Generation (der sog. Population II) angehören, können die schweren Elemente, lax als „Metalle“ bezeichnet, nicht von Anfang an dagewesen sein.

Doch wie kam's zum lebenswichtigen Kohlenstoff, zum Sauerstoff?

Die Hürde, die darin besteht, dass das Isotop (⁸Be), welches aus zwei Heliumkernen (α -Teilchen) besteht, sofort zerfällt, wird von der Natur übersprungen: Sie weiß, man muss *drei* Heliumatomkerne gleichzeitig zusammenfügen, damit Kohlenstoff (C) entsteht³. Vier Heliumatomkernen ergeben Sauerstoff (O). Dieser 3- α -Prozess wird bei 100 Millionen Grad⁴ im Innern der Sonne ablaufen, nachdem sie zum Roten Riesen geworden ist, weshalb die Sonne demaleinst als CO-Weißer-Zwerg wird enden.

²Wollen Sie wissen, wieso jedes 13. Atom in der Welt ein Heliumatom ist? Nun, auf 14 Protonen entfielen anfänglich zwei Neutronen. (Neutronen sind etwas schwerer als Protonen und deshalb unter Gleichgewichtsbedingungen seltener.) Daraus kann man einen Heliumatomkern machen. Zwölf Wasserstoffatomkerne bleiben übrig. Das erklärt die gemessene universelle Heliumhäufigkeit von $4/16 = 25$ Gew.-%.

³Kernphysiker hielten das für unmöglich. Der Astrophysiker Fred Hoyle (1915–2001) konterte, ohne 3- α -Prozess keine Physiker, und benutzte dieses *anthropische* Argument, eine energetische Eigenschaft des Kohlenstoffkerns zu prophezeien, was sich als zutreffend herausstellte.

⁴Ja, obwohl sich das Universum als Ganzes rasant abkühlte, sollte es später *punktuell* nochmals richtig heiß werden – in den Sternen. Dies ist einer ungewöhnlichen Eigenschaft selbstgravitierender Gaskugeln geschuldet: Sie heizen sich auf, *verlieren* sie Energie. Im Alltag beobachten wir immer nur das Gegenteil: Mein heißer Kaffee kühlt von allein immer nur ab! Es sei erwähnt, dass es dieser bemerkenswerte Umstand der gravitativen Selbstaufheizung von Sternen ist, der letztlich jene freie Energie zur Verfügung stellt, der alles Höhere bedarf.

Das (k)älteste Bild der Welt

Gamovs kühne Hypothese vom heißen Urknall mündete in einer Vorhersage: Aus der heißen Anfangszeit müsse sich – wenn auch stark abgekühlt – Plancksche Wärmestrahlung erhalten haben. Astronomen, die auf ihre Reputation hielten, wollten mit den Hirngespinnsten des Herrn Gamov nichts zu tun haben. Sie waren noch damit beschäftigt, den „kalten“ Urknall, d. h. den Urknall überhaupt zu verinnerlichen. Das war bedauerlich. Jenaer Astronomen war schon in den 40er Jahren bekannt, dass sich das interstellare CN-Molekül so benimmt, als badete es in einem Wärmebad mit einer Temperatur von 2,3 K. Im Urkosmos hatte die Strahlung das Sagen, die Energie. Der Stoff war Nebensache, und er hing zunächst quasi am Rockzipfel der Strahlung. Erst als nach 380 000 Jahren, die Temperatur im Universum die 3000-Grad-Marke unterschritten hatte und sich elektrisch neutrale Atomkerne bildeten, entkoppelte der Stoff von der Wärmestrahlung, und beide gehen seither getrennte Wege. Expansionsbedingt⁵ kühlte sich die universelle Wärmestrahlung schnell weiter ab. Aber es gibt sie noch. Heutzutage tummeln sich ca. 400 Photonen dieser Reliktstrahlung pro Kubikzentimeter Weltenraum. Und das ist viel verglichen mit der mittleren Anzahldichte der stofflichen Materie: Auf zwei Milliarden Photonen kommt erst ein Baryon (Proton, Neutron)!

Da es sich um Plancksche Wärmestrahlung handelt, reicht eine einzige Zahlenangabe aus, die Strahlung zu charakterisieren – ihre Temperatur.

Wer sich unter einem adiabatisch expandierenden Photonensee nichts vorzustellen vermag, dem mag ein anderes Bild eher zusagen. Wenn schon nicht in die Zukunft, so vermag doch der Astronom in die Vergangenheit zu schauen. Die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit macht's möglich. Wie weit? Nun, bis zu jenem Zeitpunkt, als sich, die „Nebel der Schöpfungsfrühe lichteteten“, oder wissenschaftlich gesprochen, der Wasserstoff schlagartig neutral und das Universums durchsichtig⁶ wurde. Das Entfernteste, was ein Astronom mittels elektromagnetischer Wellen je zu erblicken vermag, ist jenes 3000 Grad heiße Gas, das damals noch homogen den Kosmos erfüllte. Es ist, als befände er sich im Innern eines Ofens und erblickte in der Ferne die 3000 Grad heiße

⁵Als die Strahlung sich vom Stoff abkoppelte, waren alle kosmologischen Abstände 1100 mal kleiner als heute. Entsprechend fiel bis heute die Temperatur auf 1/1100 des damaligen Wertes.

⁶Ionisierter Wasserstoff ist lichtundurchlässig, weshalb man nicht ins Innere der Sonne, einer ionisierten Gaskugel, hineinschauen kann.

Ofenwand. Da diese mit 99,9998% der Lichtgeschwindigkeit vor ihm flieht, liegt die „gefühlte“ Temperatur lediglich 2,7 Grad über dem absoluten Nullpunkt. (Das Aufblähen des Weltalls ist eine Voraussetzung für die Existenz von Astronomen! Bei 3000 Grad kann niemand leben, und für Abkühlung sorgt die Expansion. Wichtiger noch: Sonnenenergie und vom Menschen zusätzlich ins Erdsystem eingebrachte Energie wird – nach ihrer Nutzung – als Infrarotstrahlung ins All entsorgt. Der globale 3-K-Photonensee ist die ultimative „Mülldeponie“ für entwertete Energie! Das verhindert die Aufheizung des Planeten.)

Erstmals „gesehen“ haben die kosmologische „Ofenwand“ Penzias und Wilson. Als alle alternativen Erklärungsversuche (Streustrahlung von der warmen Erde, atmosphärische Strahlung, Wärmestrahlung der Antennenanlage, Empfängerrauschen, Taubenmist etc.) ausgeschlossen bzw. alle Störquellen ausgeschaltet worden waren – der Maser-Verstärker wurde durch flüssiges Helium auf 4,2 K gekühlt! –, bekamen die beiden Radioastronomen mit, dass sich nur wenige Kilometer von ihnen entfernt eine Gruppe um Robert Dicke (1916–1997) anschickte, nach genau diesem Relikt des heißen Urknalls zu suchen.

Gott-sei-dank nicht perfekt!

Inzwischen weiß man, dass die Temperatur der Ofeninnenwand nur im Mittel 2,7255 K beträgt. Dort, wo der „Löwe“ an den „Becher“ grenzt, ist es um fast 0,01 Grad wärmer als in Gegenrichtung. Warum? Offenbar rast das ganze kosmische Umfeld, Nachbargalaxien eingeschlossen, mit 1 300 000 km/h in diese Richtung. (Die Schnelligkeit, mit der wir dorthin fallen, verwundert und macht Kosmologen zu schaffen!) Dem überlagert ist eine jahreszeitliche Schwankung von 0,0003 Grad. Kopernikus freute dies. Es ist der Beweis, dass seine Beschreibung – die Erde kreist um die Sonne – gegenüber der des Ptolemäus die angemessenere ist. Die Geschwindigkeit, mit der die Erde die Sonne umrundet, ist 1/10 000 der Lichtgeschwindigkeit und spiegelt sich in der Temperatur der Hintergrundstrahlung.

Auch wenn wir im Physikunterricht lernen, es gäbe keine Absolutgeschwindigkeit, weil alle geradlinig-gleichförmig bewegten Bezugssysteme dynamisch gleichberechtigt seien, die 3-K-Strahlung zeichnet eines aus: dasjenige, das sich bezüglich der Hintergrundstrahlung in Ruhe befindet. Ein Mikrowellenastronom ist durchaus in der Lage, absolute Geschwindigkeiten anzugeben, indem

er sich auf den „Photonensee“⁷ der 3-K-Strahlung bezieht.

Bei penibler Betrachtung zeigt die Temperaturkarte des Himmels Flecken. Es geht um 0,00001 Grad! Wer meinte, es handele sich um Messfehler, irrt. Diese Temperaturschwankungen müssen echt sein! Aus einem völlig gleichförmig mit Stoff und Strahlung erfüllten Universum wäre niemals etwas Bemerkenswertes hervorgegangen. Es wäre heutzutage noch genauso langweilig wie kurz nach dem Urknall. Es musste winzige Dichteschwankungen zum Zeitpunkt der Entkopplung gegeben haben, an denen die Schwerkraft ansetzen konnte. Nur so konnte es binnen 14 Jahrmilliarden – unterstützt durch Klumpen in dunkler Materie – zu dem hochgradig zerklüfteten Kosmos kommen mit seinen Sternen, Galaxien, Haufen von Galaxien . . . Mit den Dichteschwankungen einher gingen Temperaturschwankungen, wie man das von Schallwellen her kennt. Dass bei diesem primordialen „Konzert“, für feinere Ohren eher eine Kakophonie, keine Tonhöhe ausgezeichnet gewesen sein kann, war Yakov Zel’dovich (1914–1987) lange vor der Entdeckung der Temperaturschwankungen klar. Zeld’ovich, dessen hundertsten Geburtstags gerade feierlich gedacht wird, überlegte sich 1972, was man *a priori* über das primordiale Schallspektrum aussagen könne – vor jeder Erfahrung⁸. Dank spezieller Satelliten – COBE (1992), WMAP (2001) und Planck (2009) – kennt man heute das unverfälschte Spektrum dieser Schallwellen: die Abhängigkeit der Lautstärke von der Tonhöhe. *A posteriori* traf Zel’dovich’s *Vor-Urteil* genau ins Schwarze!

Man sollte die Kraft reinen Denkens⁹ nicht unterschätzen.

⁷Dieser „See“ macht sich bemerkbar. Jede Relativbewegung führt zu einer sog. Photo-
nenreibung, die sie dämpft. Der Effekt ist heute unmessbar klein.

⁸Die Kunst der Wissenschaft besteht darin, Nichtwissen angemessen zu beschreiben!

⁹Auch Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie war das Ergebnis bloßen Nachdenkens!