

■ Exkurs: Von Planck zu PLANCK

Als Max PLANCK sich Ende des 19. Jahrhunderts damit beschäftigte, welche Beziehung zwischen der Temperatur, der Farbe und der Intensität des Lichts besteht, das von einem schwarzen Körper abgestrahlt wird, hatte das einen ganz praktischen Hintergrund. Die aufstrebende Beleuchtungsindustrie begann damals darunter zu leiden, dass es keine Norm für die Helligkeit gab. Wie sollten deutsche Unternehmen effizientere Leuchtmittel als die Konkurrenz herstellen können, wenn sie nicht messen können, worin sich bessere von schlechteren Glühlampen unterscheiden?

Nicht zuletzt durch die Gründung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin-Charlottenburg im Jahr 1887 wurde die Suche nach der Lösung des **Schwarzkörperproblems** intensiviert, die experimentellen Daten wurden immer besser. Allein – es fehlte die richtige Formel.

1893 gelang ein erster Meilenstein: Wilhelm WIEN leitete eine mathematische Beziehung zwischen der Verteilung der Schwarzkörperstrahlung und der Temperatur ab. Er fand heraus, dass bei steigender Temperatur eines Körpers die Frequenz des Strahlungsmaximums immer größer bzw. die Wellenlänge immer kleiner wird. Drei Jahre später formulierte WIEN ein Verteilungsgesetz, das die Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge beschreibt, also eine Lösung für das Schwarzkörperproblem liefert. Präzisionsmessungen zeigten jedoch, dass das WIEN'sche Verteilungsgesetz zwar bei kleinen Wellenlängen mit den Daten übereinstimmt, bei größeren hingegen von ihnen abwich. Ein anderes Verteilungsgesetz des englischen Physikers John William STRUTT, Dritter Baron RAYLEIGH (später korrigiert von James JEANS) zeigte genau das umgekehrte Verhalten: Bei großen Wellenlängen gab die Formel die Daten wieder, versagte aber bei kurzen Wellenlängen im Ultraviolettbereich des Spektrums – obwohl das Rayleigh-Jeans-Gesetz konsequent aus den Gesetzen der klassischen Physik abgeleitet war. Laut Rayleigh-Jeans-Gesetz müsste die Strahlung bei Ultraviolettwellenlängen extrem intensiv sein, in der Realität ist bei solchen Wellenlängen jedoch nichts mehr zu messen: Die Strahlung nimmt bei kleinen Wellenlängen stark ab.

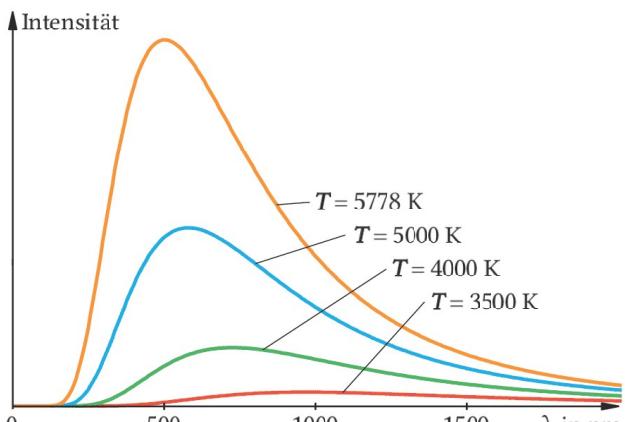
Auch PLANCK hielt die Formel von WIEN zunächst für die richtige. Wie andere Physiker auch, betrachtete

er einen leuchtenden Körper als Ansammlung von atomaren Oszillatoren, die in bestimmten Frequenzen schwingen, wie masselose Federn von unterschiedlicher Steifigkeit. An ihren Enden sitzt jeweils eine elektrische Ladung, die beim Schwingen Strahlung abgibt und aufnimmt. Im Laufe der Zeit bildet sich dann bei einer gegebenen Temperatur ein thermisches Gleichgewicht zwischen strahlenden und absorbierenden Oszillatoren und der Strahlungsenergie im Hohlraum aus.

Doch wie kommt es zum Ausgleich der verfügbaren Energie? Hier wichen PLANCK nun von Wien ab und wählte in einem „Akt der Verzweiflung“ den Ansatz, dass der Energieaustausch zwischen den Oszillatoren nicht kontinuierlich, sondern in Form kleiner Energiepakete stattfindet, die zur Schwingungsfrequenz proportional sind. Die Proportionalitätskonstante, die PLANCK einführt, wurde zu einer der berühmtesten Konstanten der Physik: das **Wirkungsquantum**, abgekürzt mit h . Für PLANCK war seine seltsame Annahme nur ein mathematischer Kunstgriff und keine „echte“ Physik – schließlich ist die Energie in der klassischen Physik eine kontinuierliche und beliebig teilbare Größe. Doch seine **Strahlungsformel** für die Energieverteilung $\rho(T, f)$ der Schwarzkörperstrahlung,

$$\rho(T, f) = \frac{8\pi \cdot f}{c^3} \cdot \frac{h \cdot f}{e^{\frac{h \cdot f}{k_B T}} - 1},$$

passte exakt zu den Daten und stimmte bei kleinen Wellenlängen mit der Formel von WIEN und bei großen mit dem Rayleigh-Jeans-Gesetz überein. Und sie war ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Quantentheorie und damit ohne Zweifel „echte“ Physik.



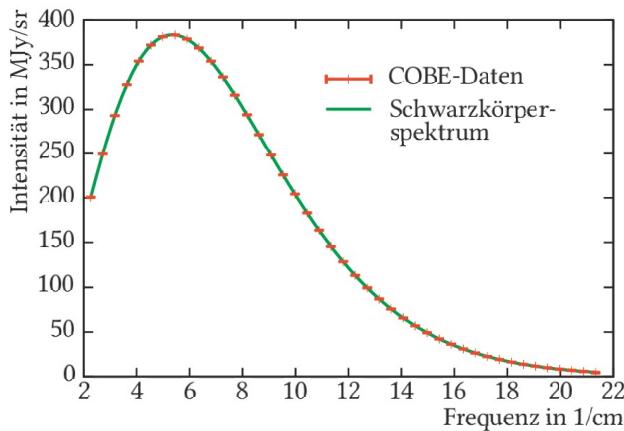
B1 Intensitätsverteilung der Schwarzkörperstrahlung bei verschiedenen Temperaturen

Ideale schwarze Körper, für die das plancksche Strahlungsgesetz exakt gilt, sind Modellobjekte, die es in der Natur nicht gibt. Reale Körper reflektieren immer Licht. Hohlraumkörper stellen eine gute Näherung für schwarze Körper dar, aber auch das Leuchten einer Glühlampe oder der Sonne kann gut als Strahlung eines schwarzen Körpers beschrieben werden. Da für diesen die Strahlungsverteilung nur von der Temperatur abhängt, kann man aus dem Spektrum eines solchen Körpers auf seine Temperatur rückschließen. Daher wissen wir, dass die Oberfläche der Sonne etwa $T \approx 5800$ K heiß ist (Bild B1).

Das genaueste jemals gemessene Schwarzkörperspektrum stammt aber nicht von einem Stern und auch nicht aus einem irdischen Labor, sondern aus dem Universum! Das Weltall ist nämlich in jede Richtung des Himmels von der **kosmischen Hintergrundstrahlung** ausgefüllt, die inzwischen von mehreren Satellitenmissionen vermessen wurde und perfekt zur planckschen Strahlungsformel passt (Bild B2).

Doch woher stammt die Hintergrundstrahlung? Nachdem Edwin HUBBLE 1929 entdeckt hatte, dass sich die Galaxien im Universum voneinander entfernen, setzte sich in der Astronomie nach und nach die Erkenntnis durch, dass sich unser Universum aus einem extrem heißen und dichten Anfangszustand, dem sogenannten **Urknall**, entwickelt hat und seitdem expandiert.

In den 1940er-Jahren dachten Physiker darüber nach, was genau bei dieser Expansion passiert. Sie fanden unter anderem heraus, dass das Universum bereits wenige Minuten nach dem Urknall durch die Ausdehnung so weit abgekühlt sein musste, dass aus der „Ursuppe“



B2 Spektrum der Hintergrundstrahlung, gemessen vom COBE-Satelliten. Die Daten liegen perfekt auf der theoretischen Kurve.

Wasserstoff und Helium entstanden – und zwar in einem bestimmten Verhältnis. Dass man dieses Wasserstoff-Helium-Verhältnis im Universum tatsächlich beobachten kann, gilt als mächtige Säule des Urknallmodells. Allerdings lag die Materie zunächst als Plasma aus Atomkernen und Elektronen vor, für gebundene Atome war es noch zu heiß.

Außer diesem Plasma gab es noch Strahlung im frühen Universum, die sich aber im dichten Plasma nicht weit ausbreiten konnte. Doch etwa 300 000 Jahre nach dem Urknall, so berechneten Ralph ALPHER und Robert HERMANN 1948, hatte das Universum eine Temperatur von 3000 K erreicht, bei der sich aus dem Plasma neutrale Atome bilden konnten. Nun konnte sich die Strahlung ungehindert ausbreiten – das Universum war durchsichtig geworden.

Die Wellenlänge dieser Strahlung soll damals etwa ein Tausendstel Millimeter betragen haben und müsste auch heute noch überall im Weltall vorhanden sein, allerdings – wegen der Expansion – eine Wellenlänge von ungefähr einem Millimeter haben. Diese Schlussfolgerung war insofern bemerkenswert, da sie eine echte Vorhersage darstellte: Wenn Urknall, dann Hintergrundstrahlung.

1963 wurde die Hintergrundstrahlung tatsächlich nachgewiesen, wenn auch eher zufällig. Um sie genau zu vermessen, wurde 1989 COBE gestartet, der schließlich die beeindruckende Messkurve in Bild B2 aufnahm, die das Spektrum eines schwarzen Körpers der Temperatur 2,725 K darstellt.

Auf der Erde ist die Hintergrundstrahlung wirklich vollkommen gleichmäßig verteilt, die Messungen von COBE und seinen Nachfolgesatelliten WMAP und PLANCK zeigen winzige Abweichungen in der Größenordnung 0,001% von der Gleichförmigkeit (Bild). Diese Fluktuationen haben ihren Ursprung im ganz frühen Universum und sind letztendlich der Grund, dass es uns gibt. Denn wenn die Materie zur Zeit der Rekombination wirklich vollkommen gleichförmig gewesen wäre (und damit auch die Hintergrundstrahlung), hätten sich keine größeren Strukturen – Galaxien, Sterne, Planeten – bilden können.

