

# Physik IV 2011 - Übung 3

10. März 2011

## 1. Kosmische Hintergrundstrahlung

$\Sigma$  2

Die Mikrowellenhintergrundstrahlung ist erstaunlich uniform und erfüllt das gesamte Universum. Sie besteht aus Photonen, die sich seit einer Zeit  $t_{SLS}$  ('time of last scattering') Jahre nach dem Urknall ( $t_{Urknall} = 0$ ) ungehindert ausbreiten konnten. Das Satellitenprogramm COBE hat zwischen 1989 und 1993 diese Strahlung genauestens untersucht und folgende Energiedichte gemessen:

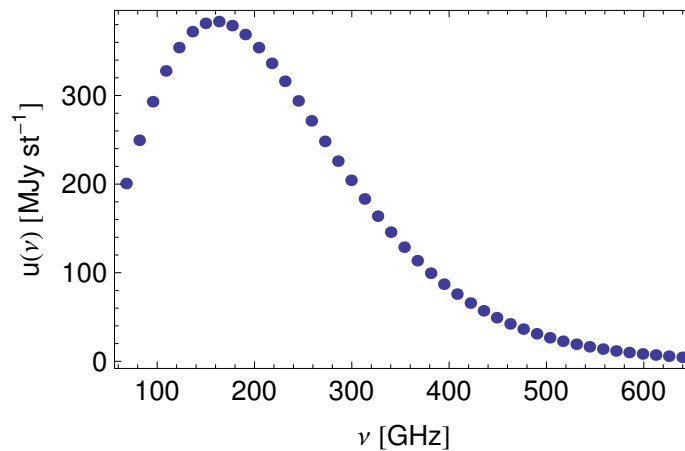


Abbildung 1: Die COBE-Daten des Mikrowellen Hintergrundes

- Die Messungen beschreiben die Hintergrundstrahlung als einen perfekten schwarzen Körper. Bestimmen Sie aus den Daten die Temperatur  $T$  des Universums und geben Sie einen Fehler für Ihr Resultat an.
- Seit dem Urknall dehnt sich das Universum adiabatisch (*Gesamtenergie bleibt konstant*) von jedem Punkt aus. Mathematisch kann

[1]

diese Ausdehnung durch einen zeitabhängigen Faktor  $a(t)$ , dem kosmischen Skalierungsfaktor, beschrieben werden, mit dem *Abstände* multipliziert werden. Dabei gilt  $a(t) > a(t')$  für  $t > t'$  und  $a(t_0) = 1$  ist die Ausdehnung des heutigen Universums. Da sich die Photonen seit  $t_{SLS}$  ungehindert ausdehnen konnten, ist seitdem die Form des Schwarzkörperspektrums erhalten geblieben. Wie skalieren demnach Wellenlänge  $\lambda$ , Frequenz  $\nu$  und die Temperatur  $T$ ? [ $\frac{1}{2}$ ]

- (c) Zur Zeit  $t_{SLS}$  hatte das Universum eine Temperatur von etwa  $3000\text{K}$ . Bestimme  $t_{SLS}$ , wenn sein Volumen quadratisch mit der Zeit wächst und heute etwa  $13.75 \cdot 10^9$  Jahre alt ist. [ $\frac{1}{2}$ ]

**2. Schwarzer Körper in 2D**  $\sum 2\frac{1}{2}$

Leiten Sie in Anlehnung an die in der Vorlesung gezeigte Vorgehensweise die folgenden Formeln für die Strahlung eines zwei-dimensionalen schwarzen Körpers her.

- (a) Die Planck-Verteilung. [ $1\frac{1}{2}$ ]  
 (b) Das Rayleigh-Jeans Gesetz ( $h\nu \ll k_B T$ ). [ $\frac{1}{2}$ ]  
 (c) Das Wien'sche Gesetz ( $h\nu \gg k_B T$ ). [ $\frac{1}{2}$ ]

**3. Strahlung schwarzer Körper**  $\sum 2$

- (a) Leiten Sie ausgehend vom Planckschen Strahlungsgesetz das Stefan-Boltzmann Gesetz für die gesamte Abstrahlungsleistung der Oberfläche  $A$  eines schwarzen Körpers her. [1]  
 (b) Betrachten Sie die Erde als perfekten schwarzen Körper. In welcher Distanz zur Sonne wäre die Oberflächentemperatur genau  $300\text{K}$ ? [1]

(Der Radius der Umlaufbahn der Erde um die Sonne beträgt  $R_E = 150 \times 10^6\text{ km}$ . Die Strahlungsintensität der Sonne auf der Erdumlaufbahn beträgt  $E_E = P/A = 1366\text{ Wm}^{-2}$ .)

**4. Thermische Abschirmung**  $\sum 3\frac{1}{2}$

Ein Experiment soll gegen Schwarzkörperstrahlung abgeschirmt werden. Dazu werden rund um die kugelförmige Probe mit Radius  $r_0 = 5\text{ mm}$  zwei sphärische Schilde mit Radius  $r_1 = 15\text{ cm}$  und  $r_2 = 20\text{ cm}$  angebracht, die auf einer Temperatur von  $T_1 = 4\text{ K}$  und  $T_2 = 70\text{ K}$  gehalten werden und deren Emissivität  $\epsilon_1 = 1$  und  $\epsilon_2 = 0.05$  beträgt. Die Probe kann dabei als schwarzer Körper angenommen werden. Die Umgebungstemperatur beträgt  $T_3 = 300\text{ K}$ .

- (a) Welche Temperatur hat die Probe? Berechnen Sie die Wärmeleistung die vom 4 K-Schild auf die Probe ( $P_{1 \rightarrow 0}$ ) bzw. von der Probe auf das 4 K-Schild ( $P_{0 \rightarrow 1}$ ) gestrahlt wird. [1]
- (b) Wie groß ist die vom 70 K-Schild auf das 4 K-Schild eingestrahlte Wärmeleistung  $P_{2 \rightarrow 1}$ ? [1]
- (c) Berechnen Sie, welche Leistung zur Kühlung des äußeren Schildes benötigt wird. Warum kann die vom 4 K-Schild abgestrahlte Wärmeleistung dabei vernachlässigt werden? [ $\frac{1}{2}$ ]
- (d) Zwecks Einbringung eines Laserstrahls wird eine Durchführung in Form eines Rohres zwischen innerem und äußerem Schild mit Radius  $r_L = 5$  mm angebracht. Die Durchführung hat nur thermischen Kontakt zum inneren 4 K-Schild. Wie gross ist die zusätzlich Strahlungsleistung am Ort der Probe? [ $\frac{1}{2}$ ]
- (e) Da nur ein Laser mit einer Wellenlänge von 650 nm eingesetzt werden soll, wird am Ende des Rohres ein Filterglas mit einer Bandbreite von 10 nm eingebaut. Wie gross ist die Wärmelast nun? [ $\frac{1}{2}$ ]

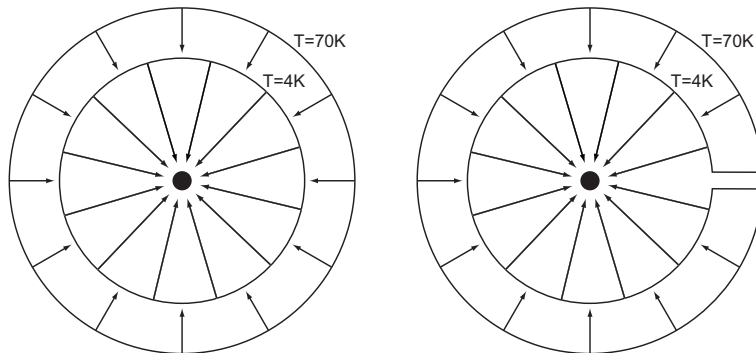


Abbildung 2: Zweifache thermische Abschirmung ohne (links) und mit (rechts) Laserdurchführung.

I. **Mathematica (optional)**

$\Sigma$  2

Überlegen Sie, für welche physikalische Problemstellung aus Ihrem bisherigen oder derzeitigem Studium Mathematica ein geeignetes Werkzeug zur Lösung oder Veranschaulichung darstellt. Erstellen Sie ein Mathematica-Notebook, das die von Ihnen gewählte Problemstellung erklärt, implementieren Sie diese in Form einer oder mehrerer Funktionen und zeigen Sie einen wichtigen Aspekt des Problems anhand eines geeigneten Graphen. Als Anhaltspunkt können Sie die in der Zusatzvorlesung gezeigten Beispiele zum photoelektrischen Effekt bzw. zur Bragg-Streuung verwenden.