

**Allgemeine Hinweise:**

- *Kommentieren Sie Ihre Lösungen! (Erläuterungen, Begründungen, Folgerungen)*
- *Rechnen Sie in SI-Einheiten (kg, m, s etc.)*
- *Überprüfen Sie die physikalischen Einheiten in Ihren Rechenschritten und Lösungen! (Vor allem bei längeren Rechenwegen!)*
- *Lesen Sie die Aufgaben zunächst alle einmal und beginnen Sie dann mit der für Sie einfachsten Aufgabe!*

**Erlaubte Hilfsmittel:** Taschenrechner, Schreibutensilien, Formelsammlung

**Aufgabe 1: Die Expansion des Universums**

1.1. 1965 entdeckten Penzias und Wilson bei Versuchen zur Verbesserung des Satellitenempfangs eine Strahlung von etwa 10 cm, deren Intensität bis auf ein Promille genau aus allen Richtungen des Alls kam.

Erläutern Sie die Bedeutung dieser Entdeckung für das „Standardmodell der Kosmologie“. Welche genauen Messergebnisse bezüglich dieser Strahlung lieferte der 1989 gestartete Satellit COBE? Welche Gesetze beschreiben das Strahlungsfeld?

In der letzten Klausur haben Sie gezeigt, dass mit Hilfe des Doppler-Effektes ein Zusammenhang zwischen der beobachteten und der ursprünglichen Wellenlänge des Lichtes einer bewegten Quelle herleitbar ist, der zuerst von Edwin Hubble 1923 veröffentlicht worden ist:

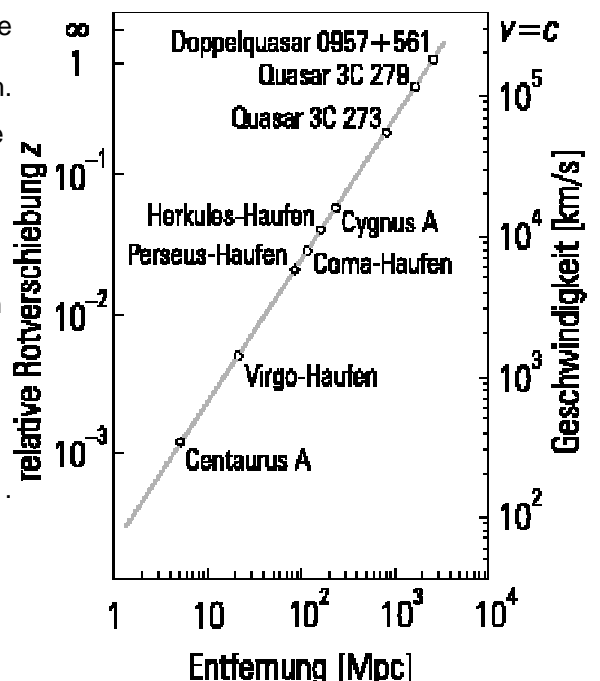
$$\frac{\lambda_{beob}}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} = 1 + \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad \text{mit } \Delta\lambda = \lambda_{beob} - \lambda_0$$

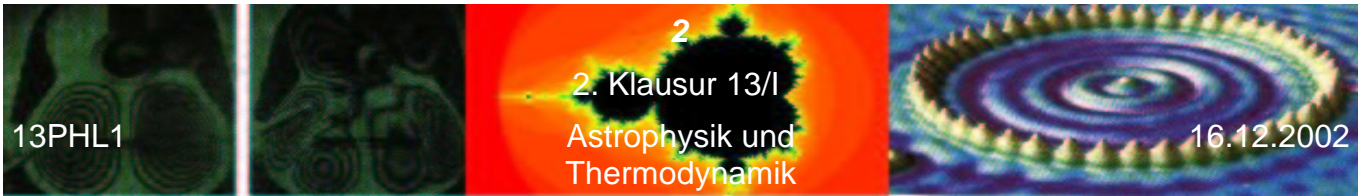
In der Astrophysik gibt man üblicherweise die Doppler-Verschiebung als den Quotienten  $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$  an.

1.2. Leiten Sie eine Formel her, in der die Fluchtgeschwindigkeit  $v$  nur in Abhängigkeit von  $z$  und  $c$  ausgedrückt ist.

1.3. Trägt man die aus der Doppler-Verschiebung ermittelte Fluchtgeschwindigkeit ferner Galaxien gegen deren Entfernung auf, erhält man nebenstehendes Diagramm.

- Ermitteln Sie daraus die Proportionalitätskonstante, die man auch *Hubble-Konstante* nennt, und formulieren Sie das Hubble-Gesetz, was den Zusammenhang zwischen Fluchtgeschwindigkeit und Entfernung der Galaxien mathematisch beschreibt.
- Welche Fluchtgeschwindigkeit besitzt eine Galaxie von der Erde aus betrachtet, die eine Rotverschiebung von  $z=1,4$  aufweist?
- Wie weit ist die Galaxie aus b) entfernt?
- Zeigen Sie, dass sich mit der Hubble-Konstanten das Alter des Universums ergibt und berechnen Sie dieses.





## Aufgabe 2: Wärmestrahlung im Weltall

2.1.

- Berechnen Sie die von einer nackten Person in einem Raum mit  $20\text{ }^\circ\text{C}$  netto abgestrahlte Leistung. Die Hautfläche, die wie ein schwarzer Strahler wirke, sei  $1,4\text{ m}^2$  groß, und die Körperoberfläche habe die Temperatur  $33\text{ }^\circ\text{C} = 306\text{ K}$ . (Sie ist wegen des Wärmewiderstandes der Haut etwas niedriger als die Körpertemperatur.)
- Welche Energie muss die Person über die Nahrung aufnehmen, um die Strahlungsleistung über einen ganzen Tag zu erbringen?
- Eine  $100\text{ g}$ -Tafel Schokolade besitzt einen Energiegehalt von ca.  $2000\text{ kJ}$ . Wieviele Schokoladen benötigt die Person zur Deckung der täglichen Strahlungsenergie?

Weicht die absolute Temperatur eines Körpers  $T$  nur wenig von der Umgebungstemperatur  $T_0$  ab, dann ist die von ihm netto abgestrahlte Leistung etwa proportional zur Temperaturdifferenz. Dieser Zusammenhang, den man bei allen Mechanismen der Wärmeübertragung (Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung) finden kann, ist auch als Newtonsches Abkühlungsgesetz bekannt.

- Beweisen Sie das Newtonsche Abkühlungsgesetz für den Prozess der Wärmestrahlung unter der Voraussetzung  $T \approx T_0$ .

2.2.

- Außerhalb der Erdatmosphäre misst man für die Sonne einen Strahlungsstrom von  $S_{\text{sonne}} = 1,37\text{ kW/m}^2$ . Berechnen Sie die gesamte Strahlungsleistung, die eine Kugelfläche um die Sonne mit dem Radius von  $r = 1\text{ AE}$  durchsetzt.
- Aus der spektralen Intensitätsverteilung der Sonne lässt sich ein Strahlungsmaximum bei einer Wellenlänge von  $\lambda_{\text{max}} = 501\text{ nm}$  ermitteln. Berechnen Sie daraus die Oberflächentemperatur der Sonne.
- Berechnen Sie mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes die Strahlungsleistung und -intensität der Sonne, die in guter Näherung als schwarzer Körper behandelt werden darf.
- Erklären Sie den Zusammenhang zwischen den beiden in a) und c) berechneten Strahlungsintensitäten.
- Bestimmen Sie die Massenverlustrate  $\frac{dM}{dt}$  der Sonne und schätzen Sie ab, wann die Sonne nur noch halb so schwer wie zur Zeit ist.

### Konstanten und Einheiten:

- Astronomische Einheit = mittlerer Abstand zwischen Sonne und Erde:  $1\text{ AE} = 150\text{ Mio km}$
- $1\text{ pc} = 3,26\text{ Lj} = 3,086 \cdot 10^{16}\text{ m}$
- Stefan-Boltzmann-Konstante:  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}\text{ K}^{-4}$
- Konstante im Wienschen Verschiebungsgesetz:  $2,898 \cdot 10^{-3}\text{ m K}$
- Sonnenradius:  $R_{\text{Sonne}} = 6,898 \cdot 10^8\text{ m}$
- Sonnemasse:  $M_{\text{Sonne}} = 1,989 \cdot 10^{30}\text{ kg}$