Lösungen

1. Teil

Aufgabe 1.1: Die Infrarotstrahlung unterteilt man in drei Bereiche:

Nahes Infrarot (NIR):	780 nm – 5 µm
Mittleres Infrarot (MIR):	5 µm – 30 µm
Fernes Infrarot (FIR):	30 µm – 600 µm

Es gilt:

1 nm = 1 Nanometer = 0,000 000 001 m = $1 \cdot 10^{-9}$ m

1 µm = 1 Mikrometer = 0,000 001 m = $1 \cdot 10^{-6}$ m

(Nicht irritieren lassen! Die Grenzen der jeweiligen Spektralbereiche sind nicht eindeutig festgelegt. Daher können sich die Angaben von Buch zu Buch etwas unterscheiden.)

Aufgabe 1.2: Infrarotes Licht wird zum größten Teil von der Erdatmosphäre geblockt, d. h. es wird auf seinem Weg durch die Atmosphäre verschluckt und kann deshalb nicht bis zur Erdoberfläche gelangen. Dafür ist hauptsächlich der in der Atmosphäre in großen Mengen vorhandene Wasserdampf verantwortlich. Außerdem spielen CO_2, Ozon, Methan, Lachgas und die FCKWs eine wichtige Rolle. Diese Moleküle absorbieren vor allem die Strahlung in den Bereichen des mittleren und fernen Infrarot. Nur Infrarotstrahlung einzelner und sehr schmaler Wellenlängenbereiche können ungehindert bis auf die Erdoberfläche vordringen. Daher lässt sich infrarotes Licht am besten mit Weltraumteleskopen außerhalb der Erdatmosphäre beobachten.

Aufgabe 1.3: Kalte interstellare Staubwolken, die weit von heißen Sternen entfernt sind, haben eine Temperatur von etwa 15 bis 20 K. Wenn sie sich in der Nähe von heißen Sternen befinden, können sie Temperaturen von 30 bis 50 K erreichen. Aus dem Wien'schen Verschiebungsgesetz erhalten wir für diese Temperaturen die entsprechende Wellenlänge λ_{max}, bei der die maximale Ausstrahlung erfolgt:

Temperatur	λ_{max}
15 K	193,3 µm
20 K	145 µm
30 K	96,7 µm
50 K	58 µm

Interstellare Staubwolken mit Temperaturen von 15 bis 20 K haben demzufolge ihr Strahlungsmaximum im Bereich von 145 µm bis 193,3 µm. Bei Staubwolken mit Temperaturen von 30 bis 50 K liegt es im Bereich von 58 µm bis 96,7 µm. Gemäß dem Planck'schen Strahlungsgesetz senden kalte interstellare Staubwolken das meiste Licht im fernen Infrarotbereich aus.

Aufgabe 1.4: Die Rotverschiebung (z) gibt an, wie stark sich die Wellenlängen im Weltraum ändern. Wird im Labor für einen bestimmten Prozess eine Wellenlänge λ_0 (Referenzwellenlänge) gemessen, während der gleiche Prozess bei einem bestimmten Stern oder einer Galaxie die Wellenlänge λ hat (Abb. 10), so bezeichnet man als Rotverschiebung die Größe $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$.

Die Ursache für die eine solche Wellenlängenverschiebung spielt bei der Definition keine Rolle. Ist λ größer als λ_0, wurde die Strahlung in Richtung größerer Wellenlängen also zum „roten Ende“ des elektromagnetischen Spektrums hin verschoben. Daher kommt der Begriff „Rotverschiebung“. Die Strahlung kann aber auch in Richtung kleinerer Wellenlängen also zum „blauen Ende“ des elektromagnetischen Spektrums hin verschoben sein. In diesem Fall ist λ kleiner als λ_0 und man spricht von einer „Blauverschiebung“.

Die Rotverschiebung z wird umso größer, je weiter die Strahlung zum langwelligen Teil des elektromagnetischen Spektrums hin verschoben ist. Wenn sie Werte von $z \geq 1{,}0$ erreicht, spricht man von „hoch rotverschobenen Objekten“.

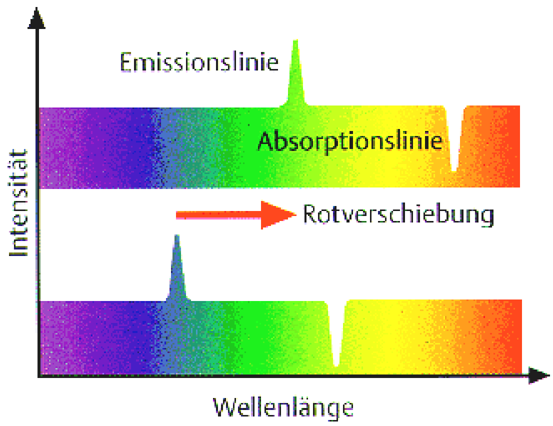

Abb. 10: Erklärung des Prinzips der Rotverschiebung mit Hilfe von Spektrallinien: Die Spektrallinien im oberen Teil des Bildes sind gegenüber den Spektrallinien im unteren Teil des Bildes zu höheren Wellenlängen hin verschoben . (Bildquelle:http://www.usm.uni-muenchen.de/people/saglia/dm/galaxien/alldt/node50.html)

Wellenlängenverschiebungen gibt es nicht nur bei elektromagnetischer Strahlung bzw. elektromagnetischen Wellen, sondern auch bei Schallwellen. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die Änderung der Tonhöhe eines Signalhorns, wenn ein Krankenwagen vorbeifährt. Die Rot- und Blauverschiebung der Schallwellen wird in diesem Beispiel durch den Dopplereffekt verursacht.

Auch in der Astronomie gibt es Rot- und Blauverschiebungen infolge des Dopplereffekts, wenn sich Sterne oder nahe Galaxien auf uns zu oder von uns wegbewegen. Betrachtet man jedoch weit entfernte Objekte wie hoch rotverschobene Galaxien, misst man nur noch Rotverschiebungen. Die Rotverschiebung dieser Objekte ist die Folge der kosmischen Expansion (kosmologische Rotverschiebung!) und haben absolut gar nichts mit dem Dopplereffekt zu tun. (Leider kommt es immer noch vor, das selbst Astronomen die kosmologische Rotverschiebung als Dopplereffekt deuten. Das ist aber völlig falsch.) Durch die Ausdehnung des Weltalls wird auch die von fernen Objekten auf uns zulaufende Strahlung gedehnt. Da das Licht an der kosmischen Expansion teilnimmt, liegt die Ursache für die Rotverschiebung in der Expansion des Weltalls begründet.

Aufgabe 1.5: Kalte Objekte wie interstellare Staubwolken senden Wärmestrahlung im fernen Infrarot aus. Das von weit entfernten Objekten vor Jahrmilliarden ausgestrahlte UV- und sichtbare Licht, das wir heute empfangen, wurde auf seinem Weg durch die Expansion des Weltalls so sehr rotverschoben, dass wir es nur im fernen Infrarot beobachten können. Deshalb muss man für die Untersuchung sowohl von kalten, staubverhüllten als auch von hoch rotverschobener Strahlungsquellen fernes Infrarotlicht messen. Obwohl es sich um grundverschiedene physikalische Phänomene handelt, benötigt man zu ihrer Erforschung dieselben Hilfsmittel.

Aufgabe 1.6: Mit dem Begriff „frühes Universum“ bezeichnet man die erste Entwicklungsphase des Universums direkt nach dem Urknall. Dazu zählt auch der Zeitraum, in dem sich die ersten Sterne und Galaxien bildeten. Da es sich bei diesen Sternen und Galaxien um hoch rotverschobene Objekte handelt, deren Strahlung in den Spektralbereich des fernen Infrarot verschoben wurde, kann man mit dem Weltraumteleskop HERSCHEL das „frühe Universum“ erforschen. Es ist, salopp gesagt, „der Ort, an dem die hoch rotverschobenen Objekte hausen“.

2. Teil

Aufgabe 2.1: HERSCHEL wendet der Sonne eine Fläche A = 4 m · 7,5 m = 30 m² zu. Da das Weltraumteleskop etwa 1% weiter von der Sonne entfernt ist als die Erde, ist die empfangene Strahlungsleistung P:

$$P = 1370\ \text{W/m}^2\ 30\ \text{m}^2\ (1/1{,}01)^2 = 41926\ \text{W} = 42\ \text{kW}.$$

Aufgabe 2.2: Die Erde strahlt pro cm² etwa 46 mW/cm² (256 K/300 K)^4 = 24,4 mW/cm². Mit einem Erdradius R_{Erde} = 6371 km ergibt sich dann:

$$I_{\text{gesamt}} = 4\pi\ R_{\text{Erde}}^2\ P = 1{,}245\ 10^{17}\ \text{W}.$$

Schwarzer Körper: Idealisierter, nicht in der Natur vorkommender Körper, der die gesamte auf ihn auftreffende Strahlung aufnimmt und wieder abgibt. Aufgrund seiner Temperatur strahlt er Wärmestrahlung ab, die exakt dem Planck'schen Strahlungsgesetz gehorcht.

Albedo / Rückstrahlungsvermögen: Sie gibt an, wieviel Prozent der auftreffenden Strahlung eine Oberfläche zurückreflektiert. Eine Albedo von 1,00 bzw. 100 % bedeutet, dass die gesamte einfallende Strahlung zurückreflektiert wird, eine Albedo von 0,00 bzw. 0 % bedeutet, dass alle einfallende Strahlung wird von der Oberfläche absorbiert wird.

Absorptionsvermögen ε: Fähigkeit eines Körpers, Strahlung aufzunehmen (zu absorbieren).

Warum kann man einen Schwarzen Körper als Referenzobjekt für die Erde oder andere Objekte verwenden, die Wärmestrahlung aussenden? Bei schwarzen Körpern weiß man genau, wieviel Strahlung sie bei einer bestimmten Wellenlänge aussenden, wenn ihre Temperatur bekannt ist. Deshalb kann man von ihnen auf das Verhalten von realen Körpern schließen, bei denen die Aussendung der Wärmestrahlung nicht nur von der Temperatur, sondern auch von Materialeigenschaften, Größe, Ausdehnung etc. abhängen kann.

Die von der Erde kommende und auf HERSCHEL auftreffende Strahlung beträgt:

$$I = (I_{\text{gesamt}}\ F) / (4\pi\ r^2) = 1{,}245\ 10^{17}\ \text{W}\ 30\ \text{m}^2 / [4\pi\ (1{,}5\ 10^9\ \text{m})^2] = 0{,}132\ \text{W}.$$

Aufgabe 2.3: Die gesamte auftreffende Strahlungsleistung beträgt 42 kW + 0,132 W ≈ 42 kW. Der Strahlungsschild nimmt 5 % davon auf, also etwa 2100 W. Diese Strahlungsleistung wird insgesamt an den Weltraum wieder abgegeben, davon 5/6 zurück in Richtung Sonne und 1/6 oder 350 W zum Gerät hin. Pro cm² werden also zur Sonne P = 2100 W · (5/6) / (300 000 cm²) = 5,83 mW abgestrahlt. Für die Temperatur T des Strahlungsschildes gilt dann T = 379 K, da
P = 5,83 mW = 0,05 · 46 mW · (T / 300 K)^4 ist.

Aufgabe 2.4: Die Abstrahlung des Primärspiegels beträgt: $I_{\text{Spiegel}} = \pi\ r_{\text{Spiegel}}^2\ \varepsilon\ \sigma\ (80\ \text{K})^4 = 17{,}9\ \mu\text{W}$. Der Sekundärspiegel dürfte etwa 1/300 der Fläche des Primärspiegels haben. Bei einem geschätzten Abstand von etwa r_{Spiegel} = 1,7 m vom Primärspiegel würde von der ausgesandten Strahlung ein Anteil von etwa $(\pi\ r_{\text{Spiegel}}^2 / 300) / (0{,}5\ 4\ \pi\ r_{\text{Spiegel}}^2) = 1/600$ auf den Sekundärspiegel treffen, also 0,03 µW.

Aufgabe 2.5: Es gilt: $T = 0{,}002898\ \mathrm{mK}/\lambda_{max}$. Für 60 µm ist $T = 48{,}3$ K, für 600 µm ist $T = 4{,}83$ K.

Aufgabe 2.6: Bei der Beobachtung sehr kalter Objekte, bei deren das Maximum λ_{max} der Intensitätsverteilung der Wärmestrahlung (Planck-Kurven) weit im Infraroten liegt, würde die Wärmestrahlung eines „warmen", d.h. nicht gekühlten Messgerätes sehr stören oder die Messung sogar unmöglich machen. Das wäre genauso, als wolle man mit einem weißglühenden Teleskop Sterne im sichtbaren Licht beobachten. Die Wärmestrahlung des Teleskops würde das schwache Sternlicht einfach überstrahlen.

Aufgabe 2.7: Bei einer Planck'schen Strahlungskurve hängen die Verhältnisse von Intensitäten an verschiedenen Wellenlängen stark von der Temperatur ab. Wenn man die Intensität der Wärmestrahlung bestimmt, die ein Himmelskörper bei bestimmten Wellenlängen aussendet, und wenn man eine vernünftige Abschätzung seines Emissionsvermögens machen kann, lässt sich aus den Verhältnissen solcher Messwerte zumindest näherungsweise die Temperatur des beobachteten Himmelsobjekts bestimmen.

Aufgabe 2.8: Beim Verdampfen hat 1 Liter flüssiges Helium = 0,125 kg = 1/8 kg die Verdampfungswärme von 20,43 kJ / 8 = 2,554 kJ aufgenommen. Dazu kommen bis 15 K zusätzlich 0,6 kJ, bis 150 K zusätzlich 5,63 kJ und bis 200 K weitere 7,38 kJ.

Aufgabe 2.9: Die Außenhülle von HERSCHEL ist ein Zylinder mit dem Radius $r = 2$ m und der Höhe $h = 7{,}5$ m. Ein solcher Zylinder hat die Oberfläche $A = 2\,\pi\,r^2 + 2\,\pi\,r\,h = 188{,}5\ \mathrm{m}^2$. Ihre Emission nach innen beträgt $I = A\,\varepsilon\,\sigma\,(200\ \mathrm{K})^4 = 17{,}13$ mW. Wenn wir den dritten Strahlungsschild mit $r = 1{,}9$ m und $h = 7{,}3$ m betrachten, so erhalten wir die Emission $I = 3{,}16$ mW. Für den innersten Strahlungsschild ergäbe sich für $r = 1{,}5$ m und $h = 7$ m bei 15 K eine Gesamtemission $I = 0{,}23$ µW. Möglicherweise ist der innerste Strahlungsschild und damit seine Emission nach innen noch kleiner.

Aufgabe 2.10: Zwischen 1 K und 4 K nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur etwa linear zu. Deshalb kann man im Temperaturbereich von 2,8 K bis 4 K den Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit mit etwa 0,1 mW/(cm K) abschätzen. Für die Wärmeleitung zwischen 4 K und 15 K lässt sich die Größe $W(15\ \mathrm{K})$ mit etwa 4 W/cm abschätzen. Hat die Speiche am einen Ende eine Temperatur von 2,8 K und am anderen nach 1 m eine Temperatur von 15 K, so ist die Temperatur von 4 K nach einer Strecke z erreicht. Dann gilt: Der Wärmefluss von 0 m bis z ist so groß wie der Wärmefluss von z bis 1 m:

$$Q = \kappa \cdot (T_2 - T_1) \cdot A/l = 0{,}1\ [\mathrm{mW/(cm \cdot K)}] \cdot (4\ \mathrm{K} - 2{,}8\ \mathrm{K}) \cdot (1\ \mathrm{mm^2}/z) = 4\ (\mathrm{W/cm}) \cdot [1\ \mathrm{mm^2}/(1\ \mathrm{m} - z)].$$

Kürzen und Umformen der Gleichung liefert:

$0{,}0001 \cdot 1{,}2\ (1\text{ m} - z) = 4 \cdot z \quad \Rightarrow \quad z \cdot (4 - 0{,}00012) = 0{,}00012\text{ m} \quad \Rightarrow \quad z = 0{,}00003\text{ m}.$

Deshalb muss man für die Berechnung des Wärmeflusses hier nur den Wärmetransport von 4 K bis T berücksichtigen.

2,8 K – 15 K: Q = 4 W/cm · 1 mm²/1m = 0,0004 W,
2,8 K – 200 K: Q = 545 W/cm · 1 mm²/1m = 0,0545 W.

Eine Verdopplung der Länge halbiert den Wärmefluss. Eine Verdreifachung der Querschnittsfläche führt zu einem dreifachen Wärmefluss.

Aufgabe 2.11: Eine Temperatur von 1,6 K erreicht man, indem man Helium über ein Regelventil so in den Weltraum entweichen lässt, dass der Druck des Heliums nur noch 4,8 hPa beträgt.

Aufgabe 2.12: Der Dampfdruck muss 0,009 hPa betragen.

Aufgabe 2.13: Um eine Wärmeleistung von 10 µW über 45 Stunden hinweg zu erreichen, benötigt man eine Energie von 1,62 J. Dazu braucht man 1,62 J / 8302 J/kg = 0,1951 g ^{3}He.

Aufgabe 2.14: Bei jeder Messung eines astronomischen Objekts wird das Signal des gemessenen Objekts von Störungen überlagert, die im Detektor und in der dazugehörigen Elektronik entstehen: dem Rauschen. Da dieses Rauschen unabhängig vom gemessenen Objekt auftritt, misst man zuerst das Objekt und gleich danach eine Himmelsgegend ohne das Objekt. Anschließend subtrahiert man das Mess-Signal ohne Objekt vom Mess-Signal mit Objekt. So kann man den Einfluss des Rauschens auf die Messung sehr stark reduzieren.