

Das Weltraumteleskop HERSCHEL

Reiner Hennig, Monika Maintz

Himmelsobjekte wie Sterne, Planeten, Galaxien, interstellares Gas oder interstellarer Staub senden Licht oder allgemein elektromagnetische Strahlung ganz unterschiedlicher Wellenlängen aus. Um sie möglichst genau erforschen zu können, benötigt man Messinstrumente, die für die verschiedenen Wellenlängen- bzw. Spektralbereiche empfindlich sind. Sehr kalte Objekte strahlen zum Beispiel den größten Teil ihres Lichts im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums aus. Auch die Strahlung sehr weit entfernter Himmelskörper lässt sich am besten im Infraroten beobachten.

Als wichtiger Beitrag Europas zur Erforschung sehr kalter und sehr weit entfernter Objekte wurde das Weltraumteleskop HERSCHEL entwickelt (Abb. 1). Das Gerät wird sehr genau Infrarotstrahlung aus dem Weltraum messen und Objekte abbilden können, die Infrarotstrahlung aussenden. Der Schwerpunkt dieser Weltraummission liegt im Bereich des „fernen Infrarot“. Denn dieser langwelligste Teil des infraroten Spektralbereichs kann mit HERSCHEL zum ersten Mal beobachtet werden!

Die folgenden **Aufgaben** sollen helfen zu verstehen, warum bestimmte Himmelskörper Infrarotstrahlung aussenden oder warum sie speziell in diesem Spektralbereich „sichtbar“ sind. Darüber hinaus wird betrachtet, welche **Probleme** beim Bau von Messinstrumenten für Infrarotstrahlung auftauchen und **wie man sie löst**. Damit solche Geräte funktionieren, müssen sie sehr stark, d. h. in diesem Fall bis knapp oberhalb des absoluten Nullpunkts der Temperatur gekühlt werden. Wir beschäftigen uns vor allem damit, warum eine so starke Kühlung erforderlich ist und wie sie funktioniert.



Abb. 1: Das Weltraumteleskop HERSCHEL. (Bild: <http://www.mpe.mpg.de/PIFICONS/herschel.jpg>)

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Astronomie	Raumfahrt, Astropraxis, Diffuses Medium, Kosmos	Elektromagnetisches Spektrum, kalte Objekte, Infrarotstrahlung, Objekte im frühen Universum, Kosmologische Rotverschiebung, interstellare Materie
Physik	Thermodynamik	Thermische Strahlung (Wärmestrahlung), Intensität, Strahlungsleistung, Schwarzer Körper, Schwarze Strahlung, Planck-Funktion, Planck-Kurven, Wien'sches Verschiebungsgesetz, Wärmeleitung, Kryophysik
Verknüpfungen	Astro / Physik	

1. Wozu braucht man Weltraumteleskope und Infrarot-Astronomie?

Mit unseren Augen oder mit fotografischen Methoden können wir nur einen ganz kleinen Teil der aus dem Weltraum kommenden elektromagnetischen Strahlung wahrnehmen: das sichtbare Licht oder, physikalischer ausgedrückt, den optische Spektralbereich (Abb. 2). Der weitaus größte Teil des elektromagnetischen Spektrums, die kurzwellige Gamma-, Röntgen- und UV-Strahlung sowie die langwellige Infrarot-, Mikrowellen- und Radiostrahlung, bleibt für uns unsichtbar.

Dazu kommt noch, dass die Erdatmosphäre fast die gesamte kurzwellige und damit hochenergetische und gefährliche Strahlung sowie den größten Teil der harmlosen Infrarotstrahlung verschluckt (Abb. 2). Sie bleibt einfach in den höheren Atmosphärenschichten stecken wie etwa das UV-Licht in der Ozonschicht. Die für das Leben auf der Erde ungefährliche langwelligere Mikrowellen- und Radiostrahlung kommt dagegen größtenteils ungehindert bis zum Erdboden durch.

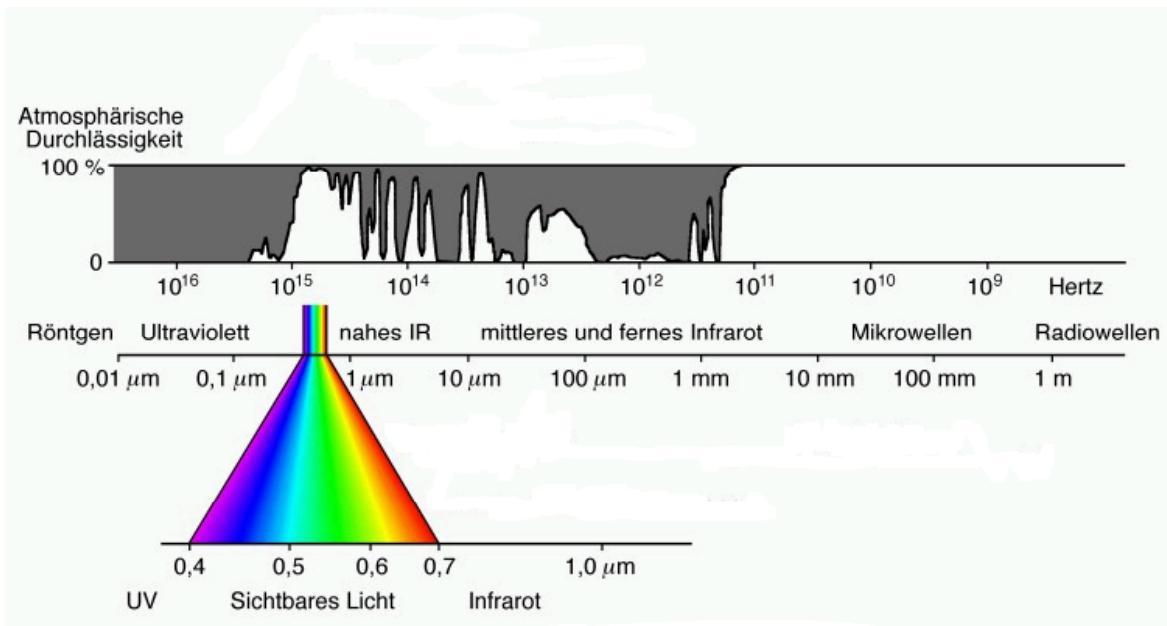


Abb. 2: Spektrum der elektromagnetischen Strahlung und Durchlässigkeit der Erdatmosphäre für die verschiedenen Wellenlängen (in Meter) bzw. Frequenzen (in Hertz). Die weißen Bereiche geben an, wie viel Prozent der auf die Atmosphäre auftreffenden Strahlung einer bestimmten Wellenlänge bzw. Frequenz auf der Erde ankommt. (Bild: www.fe-lexikon.info/images/Spektrum.jpg)

Würden wir uns auf die Erforschung des sichtbaren Lichts beschränken, würden uns viele Vorgänge im All verborgen bleiben. Um zu verstehen, wie das Universum „tatsächlich funktioniert“, müssen wir folglich die komplette aus dem Weltraum kommende elektromagnetische Strahlung und daher alle Wellenlängenbereiche untersuchen. Das von der Europäischen Raumfahrtagentur ESA entwickelte Weltraumteleskop HERSCHEL ist ein wichtiger Schritt in diese Richtung. Es wird bereits vermessene Teile des Infrarotlichts wesentlich genauer unter die Lupe nehmen und erschließt uns erstmals den bisher der Beobachtung nicht zugänglichen Bereich des Fernen Infrarot.

Körper senden aufgrund ihrer Temperatur elektromagnetische Strahlung aus. Man nennt diese Strahlung „Thermische Strahlung“, „Temperaturstrahlung“ oder „Wärmestrahlung“. Sterne sind so heiß, dass sie den größten Teil ihrer Wärmestrahlung im Bereich der UV-Strahlung und des sichtbaren Lichts aussenden. Sie erscheinen uns daher je nach Temperatur bläulich-weiß (sehr heiß, bis $50\,000 \text{ K}^1$), gelb, orangefarben oder rot (sehr kühl, bis 2500 K).

¹ : Die Temperatur wird in der Physik und damit auch in der Astrophysik in der Einheit Kelvin (K) gemessen. Der Nullpunkt der Kelvin-Skala ist der absolute Temperaturnullpunkt. Hätte ein Körper eine Temperatur von 0 Kelvin , würde er absolut keine kinetische Energie mehr besitzen. 0 Grad Celsius entspricht $273,16 \text{ Kelvin}$.

Wenn Körper wie Sterne aufgrund ihrer Temperatur Licht abstrahlen, müsste das prinzipiell auch für alle anderen Objekte gelten, egal, ob sie eine extrem hohe oder eine extrem niedere Temperatur haben. Und genau das trifft auch zu. Die Wärmestrahlung sehr kalter Objekte können wir jedoch nur mit Hilfe von speziellen Detektoren wie den Messgeräten des Weltraumteleskops HERSCHEL „sehen“. Denn sehr kalte Objekte senden den größten Teil ihrer Wärmestrahlung im für uns unsichtbaren infraroten Spektralbereich aus.

Aber nicht nur sehr kalte, auch sehr weit entfernte Objekte kann man am besten im Infraroten beobachten. Gemeint sind damit die ersten Sterne und Galaxien, die sich in der frühesten Jugend des Universums bildeten (Abb. 3). Auch diese Himmelskörper strahlten einen großen Teil ihres Lichts, das heute nach einer Milliarden Jahre langen Reise bei uns ankommt, im optischen Spektralbereich aus. Dennoch können wir sie in diesem Spektralbereich nicht beobachten. Sie sind sozusagen aus dem Bereich des sichtbaren Lichts „verschwunden“. Was auf den ersten Blick widersinnig erscheint, wird verständlich, wenn man betrachtet, was mit dem Licht auf seinem langen Weg durch das Weltall bis zur Erde passiert (Stichwort „Kosmologische Rotverschiebung“).

Aufgabe 1.1: In welche Bereiche unterteilt man die Infrarotstrahlung und welche Wellenlängen umfassen die einzelnen Bereiche?

Aufgabe 1.2: Warum kann man Infrarotlicht am bestem mit Weltraumteleskopen beobachten?

Aufgabe 1.3: Auch kalte interstellare Staubwolken senden aufgrund ihrer Temperatur Wärmestrahlung aus. Welche Temperatur haben sie? Bei welcher Wellenlänge λ_{\max} liegt ihr Strahlungsmaximum? In welchem Spektralbereich senden sie demzufolge das meiste Licht aus? (siehe Anhang: „Schwarzer Körper“)?

Aufgabe 1.4: Was versteht man unter „Rotverschiebung“? Wie ist sie definiert? Was bedeutet „hoch rotverschoben“? Wodurch werden hohe Rotverschiebungen verursacht?

Aufgabe 1.5: Warum verwendet man zur Untersuchung sowohl kalter, staubverhüllter als auch hoch rotverschobener Strahlungsquellen fernes Infrarot? Handelt es sich bei beiden Objektarten um ähnliche physikalische Vorgänge oder sind diese grundverschieden?

Aufgabe 1.6: Was versteht man unter dem Begriff „frühes Universum“? Warum ist es möglich, mit HERSCHEL das „frühe Universum“ zu erforschen?

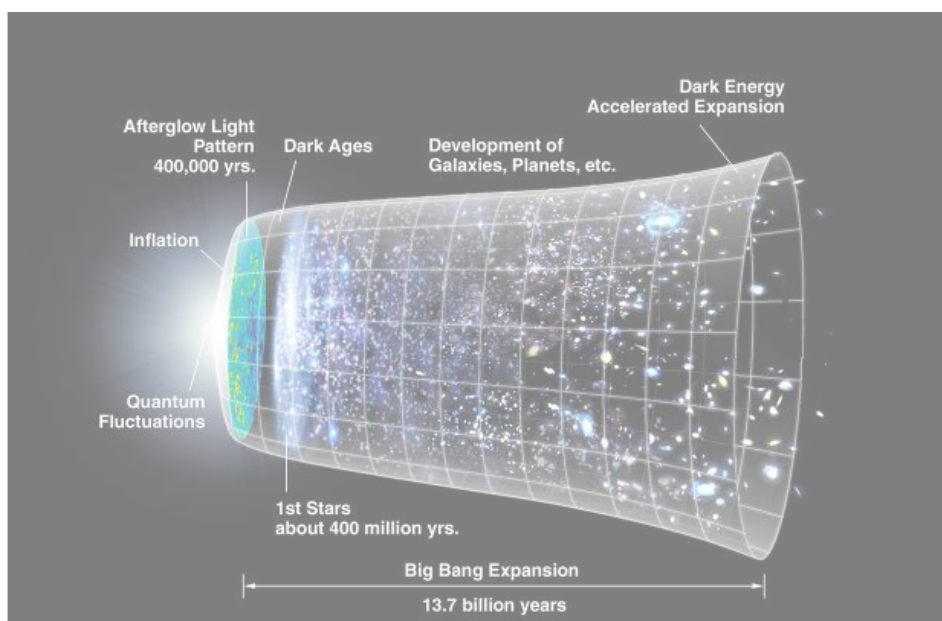


Abb. 3: Zeitliche Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute (von links nach rechts). Wichtige Entwicklungsphasen sind eingezeichnet. Die ersten Sterne entstanden etwa 400 Millionen Jahre nach dem Urknall. (Bild: http://map.gsfc.nasa.gov/m_mm.html).

2. Anforderungen an den Bau von Infrarot-Teleskopen: Kühlung

Messinstrumente für Infrarotstrahlung sind Spezialgeräte, die besonderen Anforderungen genügen müssen. Welche praktischen Probleme bei ihrem Bau auftauchen und wie man sie löst, soll mit den folgenden Aufgaben verdeutlicht werden. Besonders wichtig ist hierbei die Kühlung der Detektoren, die eine Messung der Infrarotstrahlung überhaupt erst möglich macht.

Aufgabe 2.1: Schätze ab, wie viel Energie von der Sonne auf HERSCHEL auftrifft. Das Teleskop entspricht einem Zylinder mit einem Durchmesser von 4 m und einer Höhe von 7,5 m (Abb. 4). Die Erde erhält von der Sonne pro m^2 eine Strahlungsleistung von 1370 W. HERSCHEL ist etwa 1 % weiter von der Sonne entfernt als die Erde. (Die empfangene Intensität ist proportional zu $1/r^2$).



Abb. 4: Weltraumteleskop HERSCHEL im All, künstlerische Darstellung. (Bild: http://regmedia.co.uk/2007/09/20/artist_view.jpg)

Aufgabe 2.2: Schätze ab, wie viel Energie in Form von Wärmestrahlung von der Erde auf HERSCHEL auftrifft. Die Erde strahlt pro Sekunde und pro cm^2 genau so viel Energie in den Weltraum ab wie ein „Schwarzer Körper“, der eine Temperatur von 256 K hat (siehe Anhang). Man sagt daher: „Die Erde hat eine Effektivtemperatur T_{eff} von 256 K.“ Insgesamt strahlt die Erde als Wärmestrahlung in den Weltraum ab:

$$I_{\text{gesamt}} = 4\pi R_{\text{Erde}}^2 \sigma T_{\text{eff}}^4 \quad (\text{mit } R_{\text{Erde}}: \text{Erdradius})$$

Berechne die Abstrahlung I_{gesamt} . Ein Schwarzer Körper mit einer Temperatur von 300 K strahlt pro Sekunde und pro cm^2 in den gesamten Raum eine Wärmestrahlung von 46 mW ab. Erkläre die Begriffe „Schwarzer Körper“, „Albedo“ bzw. „Rückstrahlungsvermögen“ und „Absorptionsvermögen ε “ (siehe Anhang). Warum kann man einen Schwarzen Körper als Referenzobjekt für die Erde oder andere Objekte verwenden, die Wärmestrahlung aussenden?

HERSCHEL hält sich im Abstand $r = 1,5$ Mio km von der Erde auf. Wenn das Weltraumteleskop die von der Erde pro Sekunde kommende Strahlung mit der Fläche F und dem Absorptionsvermögen ε aufnimmt, so empfängt es von der Erde die Strahlungsleistung $I = (I_{\text{gesamt}} \varepsilon F) / (4\pi r^2)$. Berechne die von HERSCHEL aufgenommene Strahlungsleistung I . Für ε gelte: $\varepsilon = 1$.

Aufgabe 2.3: Wie wirkt der große Strahlungsschild des Teleskops (Abb. 5, links)? Da von HERSCHEL aus gesehen Sonne und Erde in der gleichen Richtung stehen (Abb. 4), bewirkt der Strahlungsschild einen Schatten sowohl für die Strahlung von der Sonne als auch für die Strahlung von der Erde. Wenn man annimmt, dass der Strahlungsschild 5 % der auftreffenden, von Sonne und

Erde kommenden Strahlungsleistung aufnimmt ($\varepsilon = 5\%$), so erhöht sich seine Temperatur so lange, bis seine Abstrahlung durch Wärmestrahlung von der Vorderseite (Abb. 5, links), $\varepsilon = 5\%$, und von der Rückseite (Abb. 5, rechts), $\varepsilon = 1\%$, zusammen genau gleich groß wie die aufgenommene Strahlung ist. Welche Temperatur hat dann der Strahlungsschild und welche Strahlungsleistung gibt er dabei auf das Teleskop ab?

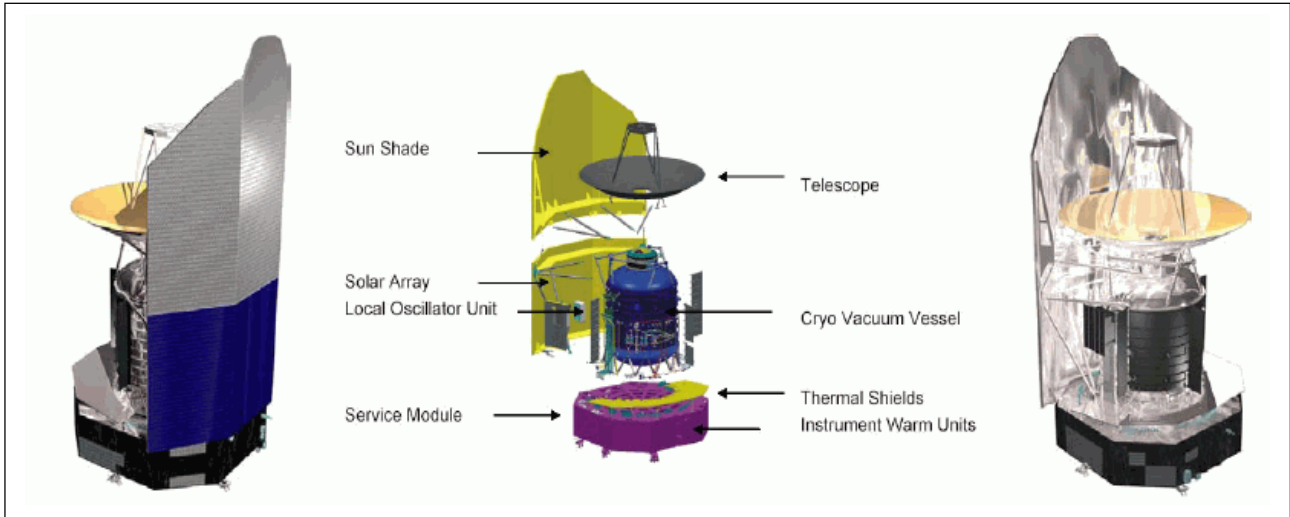
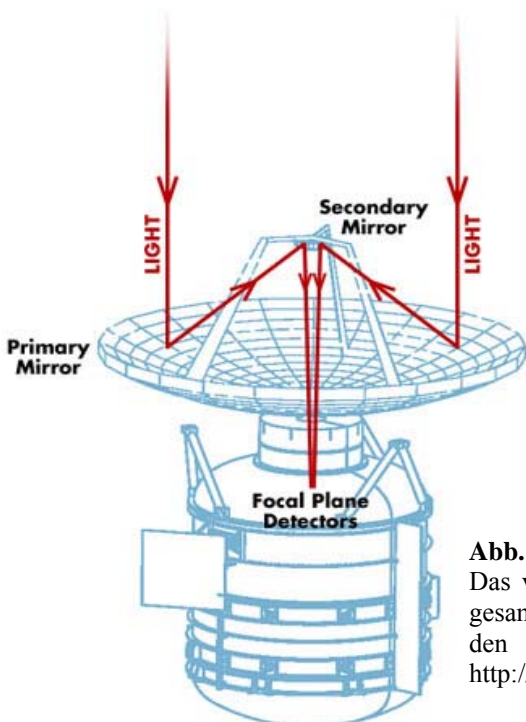


Abb. 5: Aufbau des Weltraumteleskops HERSCHEL. Links: „Warme“, d.h. der Sonne und der Erde zugewandte Seite; Mitte: Überblick über die einzelnen Bestandteile; rechts: „kalte“, d.h. von der Sonne und der Erde abgewandte Seite von HERSCHEL. (Bild: <http://herschel.esac.esa.int/Docs/Herschel/html/ch01.html>)

Aufgabe 2.4: Schätze die Strahlungsintensität I_{Spiegel} ab, die das Teleskop aufgrund seiner eigenen Temperatur aussendet. Für den Primärspiegel mit einem Durchmesser von 3,50 m ist $\varepsilon = 0,8\%$. Es gilt: $I_{\text{Spiegel}} = \pi r_{\text{Spiegel}}^2 \varepsilon \sigma (80 \text{ K})^4$. Wie groß ist der Anteil der vom Primärspiegel selbst verursachten Wärmestrahlung, der auf den Sekundärspiegel fällt und von dort ins Innere von HERSCHEL geleitet wird (Abb. 6)?



Aufgabe 2.5: Das Wellenlängen-Maximum λ_{max} der Wärmestrahlung verschiebt sich mit der Temperatur T : $\lambda_{\text{max}} = 0,002898 \text{ mK}/T$ (Wien'sches Verschiebungsgesetz, Abb. 9). Für welche Temperaturen T läge dieses Maximum im Bereich der Wellenlängen, die von den Instrumenten HERSCHELs beobachtet werden können ($60 \mu\text{m} - 600 \mu\text{m}$)?

Abb. 6: Schematische Darstellung des Weltraumteleskops HERSCHEL: Das von den Himmelskörpern kommende Licht wird vom Primärspiegel gesammelt und auf den Sekundärspiegel geleitet. Von dort gelangt es in den Kryostaten, in dem sich die Messgeräte befinden. (Bild: <http://herschel.jpl.nasa.gov/spacecraft.shtml>)

Aufgabe 2.6: Erkläre ausgehend von den Aufgaben 2.4 und 2.5, warum die Messinstrumente an Bord von HERSCHEL so stark gekühlt werden müssen.

Aufgabe 2.7: Warum kann man durch den Vergleich von Messungen in verschiedenen Wellenlängenbereichen mit Strahlungskurven von Schwarzen Körpern auf die Temperatur eines Objekts schließen?

Aufgabe 2.8: Die Messgeräte von HERSCHEL befinden sich in einer Thermoskanne, dem Kryostaten (Abb. 7 und 8). Diese ist so gebaut, dass möglichst wenig Wärme von außen nach innen dringen kann. Der Innenteil wird durch Verdampfen von flüssigem Helium gekühlt. Er ist von drei weiteren Hüllen, den Strahlungsschilden, umgeben.

Das Helium, das innen bei 2,8 K verdampft, wird über Rohrleitungen nacheinander zu den drei Strahlungsschilden geleitet. Wenn es die Außenhülle erreicht, wird es an den Weltraum abgegeben. Am ersten Strahlungsschild hat das Heliumgas eine Temperatur von 15 K erreicht, beim dritten Strahlungsschild sind es 150 K. Beim Verlassen des Teleskops hat es sich auf 200 K aufgeheizt. Welche Wärmemenge hat 1 Liter flüssiges Helium a) beim Verdampfen innen, b) als Gas bis zum ersten Strahlungsschild, c) bis zum dritten Strahlungsschild und d) bis zum Austritt aus dem Teleskop aufgenommen?

Aufgabe 2.9: Die Außenhülle und die Strahlungsschilde geben Energie in Form von Wärmestrahlung auch nach innen ab. Schätze die Leistung ab, die der 1. Strahlungsschild, der 3. Strahlungsschild und die Außenhülle nach innen abgeben, wenn ihre Oberfläche jeweils $\varepsilon = 1\%$ hat.

Aufgabe 2.10: Das kalte Innenteil des Kryostaten muss so an der Außenhülle des Gerätes befestigt sein, dass das Gerät die Erschütterungen beim Start der Trägerrakete aushalten kann. Über diese Aufhängungen dringt natürlich Wärme ins Innere. Deshalb sollen diese Aufhängungen möglichst dünn sein. Beim Fahrrad bilden die Speichen eine sehr dünne, aber sehr zugfeste Aufhängung der Nabe am Rad. In ähnlicher Weise ist der Innenteil des Kryostaten an sehr dünnen Speichen aufgehängt. Schätze ab, wieviel Wärme durch eine solche Speiche fließt, die 1 m lang ist und eine Querschnittsfläche von 1 mm^2 hat, wenn das eine Ende die Temperatur 2,8 K und das andere 15 K hat. Wie wäre der Wärmeeinfall, wenn die Speiche an der Außenhülle mit 200 K befestigt wäre?



Abb. 7: Kryostat und Servicemodul des Weltraumteleskops HERSCHEL. (Bild: http://www.esa.int/esaSC/SEM0ZJPK6F_index_0.html)

Wie ändert sich der Wärmeeinfall durch die Speiche, wenn man die Länge der Speichen verdoppelt oder wenn man die Querschnittsfläche verdreifacht?

Aufgabe 2.11: Bei welchem Dampfdruck von Helium erreicht man eine Temperatur von 1,6 K? Wie kann man diesen niedrigen Druck erzeugen?

Aufgabe 2.12: Ein Absorber (Zeolith oder Aktivkohle) bindet ^3He an sich und pumpt es auf diese Weise weg. Wie groß muss der Dampfdruck von ^3He sein, damit eine Temperatur von 0,3 K erreicht wird?

Aufgabe 2.13: Welche Menge von ^3He benötigt man, wenn man eine Wärmeleistung von 10 μW über 45 Stunden hinweg erreichen will?

Aufgabe 2.14: Warum kann der Chopper das Signal-zu-Rauschverhältnis verbessern?

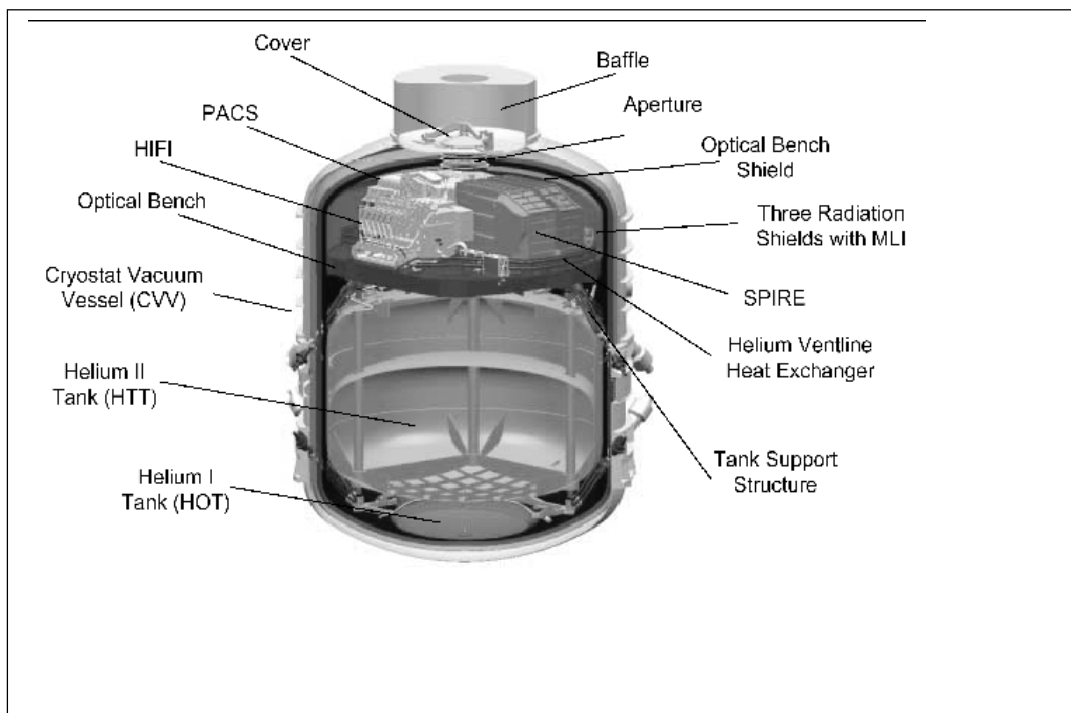


Abb. 8: Im Kryostaten des Weltraumteleskops HERSCHEL befinden sich die Messinstrumente und die für ihre Kühlung erforderlichen Strahlungsschilde sowie die Tanks für das Kühlmittel Helium. Die Tanks nehmen fast zwei Drittel des Kryostaten ein. (Bild: <http://herschel.esac.esa.int/Docs/Herschel/html/ch01.html>)

Anhang

Der Schwarze Körper

Jeder Körper sendet aufgrund seiner Temperatur Wärmestrahlung aus. Die Intensität dieser Strahlung hängt sehr stark von der Wellenlänge λ (der Farbe) der Strahlung und von Materialeigenschaften des Körpers ab. Außerdem ist wichtig, wie groß der Winkelbereich $d\Omega$ im Raum ist, in den die Wärmestrahlung abgegeben wird, und welchen Wellenlängenbereich $d\lambda$ man untersucht.

Ein Körper, der die gesamte auf in auftreffende Strahlung aufnehmen bzw. absorbieren kann (dessen Absorptionsvermögen ε also 100 % beträgt) und der diese Strahlung auch wieder vollständig abgeben, d.h. abstrahlen kann (dessen Rückstrahlungsvermögen oder Albedo also 100 % beträgt), ist ein idealer Strahler, ein „Schwarzer Körper“. Die Intensität I , die von einer Fläche dA des Schwarzen Körpers ausgesandt wird, erhält man mit Hilfe des Planck'schen Strahlungsgesetzes:

$$I = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}\right) - 1} \right] \cdot d\lambda \cdot d\Omega \cdot dA.$$

Die Wärmestrahlung, die ein Schwarzer Körper oder Schwarzer Strahler mit der Temperatur T aussendet, hat gemäß des Wien'schen Verschiebungsgesetzes ihr Maximum bei der Wellenlänge λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} = 0,0029 \text{ m} \cdot \text{K} / T$$

Der Schwarze Körper ist ein idealisierter Körper, der in der Natur nicht vorkommt. Experimentell kann man seine Eigenschaften nur näherungsweise innerhalb begrenzter Wellenlängenintervalle realisieren. Da er seine Wärmestrahlung entsprechend dem Planck'schen Strahlungsgesetz abgibt, das ausschließlich von der Temperatur abhängt, spielen Materialeigenschaften keine Rolle.

Die Abstrahlungscharakteristik eines Schwarzen Körpers, also die Strahlungsintensität I (abgegebene Strahlungsmenge pro Zeiteinheit und pro Flächeneinheit) bzw. die Strahlungsleistung P (abgegebene Strahlungsmenge pro Zeiteinheit) je Wellenlänge λ bei gegebener Temperatur T , lässt sich genau berechnen (Abb. 9). Wegen ihrer idealisierten Eigenschaften (nur Temperatur-Abhängigkeit) kann man Schwarze Körper dazu verwenden, um die von realen Körpern („graue Strahler“) abgegebene Wärmestrahlung (keine reine Temperaturabhängigkeit!) zu untersuchen und zumindest näherungsweise zu bestimmen.

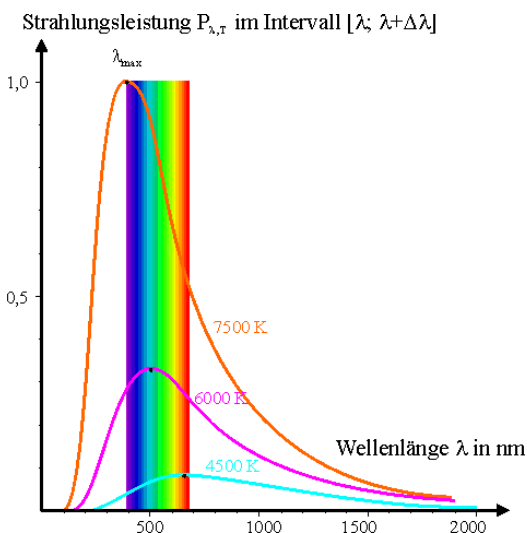


Abb. 9: Abstrahlungscharakteristik eines Schwarzen Körpers (Planck'sche Strahlungskurven): Mit steigender Temperatur nimmt auch die Gesamtmenge der abgegebenen Wärmestrahlung zu. Die Wellenlänge, bei der die meiste Strahlung abgegeben wird (λ_{\max}), verschiebt sich mit steigender Temperatur zu immer kürzeren Wellenlängen. Als Strahlungsleistung P oder Intensität I bezeichnet man die pro Zeit auf eine bestimmte Fläche einfallende Strahlungsmenge. Der Bereich des sichtbaren Lichts ist farblich markiert. (Bild: <http://leifi.physik.uni-muenchen.de>)

Tabelle 1: Charakteristische Daten von ³He (Helium-3) und ⁴He (Helium-4)

	Helium-3	Helium-4
Gasdichte bei Normalbedingungen	0,135 kg / m ³	0,179 kg / m ³
Dichte der Flüssigkeit am Siedepunkt	0,058 kg / l	0,125 kg / l
Verdampfungswärme (V-Enthalpie)	8,302 kJ / kg	20,43 kJ / kg
Siedepunkt	3,2 K	4,2 K

Tabelle 2: Energiegehalt (Enthalpie) H von gasförmigem Helium-4

<i>T / K</i>	4,2	15	50	100	150	200
<i>H / (kJ / kg)</i>	0	4,8	15	30	45	59

Tabelle 3: Dampfdruck über flüssigem Helium-3

<i>T / K</i>	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
<i>p / hPa</i>	0,0016	0,009	0,037	0,21	0,72	1,84	3,85	7,06

Tabelle 4: Dampfdruck über flüssigem Helium-4

<i>T / K</i>	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
<i>p / hPa</i>	0,16	0,83	2,88	4,80	16,63	31,69	53,94	84,39	124,96	177,27

Zur Wärmeleitung

Wenn ein Stab die Länge l und die Querschnittsfläche A hat und wenn sein eines Ende die Temperatur T_1 und sein anderes Ende die Temperatur T_2 hat, so fließt durch ihn die Wärme $Q = \kappa \cdot (T_2 - T_1) \cdot A / l$. Für Nylon gilt:

<i>T / K</i>	0,4	1,0	4,0	10,0
<i>κ / (mW / cm K)</i>	0,006	0,025	0,125	0,390

Für einen Stab aus Nylon findet man auch eine Tabelle, die angibt, welche Wärmemenge Q von der Temperatur T_2 zur Temperatur $T_1 = 4$ K fließt: $Q = W(T_2) \cdot A / l$

<i>T / K</i>	6	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
<i>W / W/cm</i>	0,321	1,48	8,23	38,5	85,9	142	204	269	336	405	475	545

Literatur

Andersen, H.L. (Hrsg.): AIP 50th Anniversary Physics Vade Mecum. New York 1981.

Fischer, Jacqueline et al.: Cryogenic far-infrared laser absorptivity measurements of the Herschel Space Observatory telescope mirror coatings. in: Applied Optics Vol. 43, Nr. 19, S. 3765 – 3771.

Herrmann, J.: dtv-Atlas Astronomie. München, 2005

Müller, A.: Lexikon der Astrophysik, <http://www.mpe.mpg.de/~amueller/lexdt.html>

Unsöld, A. und Baschek, B.: Der neue Kosmos. Berlin und Heidelberg, 1999⁶.

Wutz, M., Adam, H. und Walcher, W.: Theorie und Praxis der Vakuumtechnik. Braunschweig, 1988⁴.

Zimmermann, H. und Weigert, A.: ABC-Lexikon Astronomie. Heidelberg, Berlin und Oxford, 1995

Internetseiten

<http://herschel.esac.esa.int/>

http://www.esa.int/esaSC/120390_index_0_m.html

<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=16>

<http://herschel.jpl.nasa.gov/>