

DE WETENSCHAP VAN DE KOSMOS  
OVER DE UNIVERSALITEIT VAN DE NATUURWETTEN



# De wetenschap van de kosmos

Over de universaliteit van de natuurwetten

Christoffel Waelkens

Acco Leuven / Den Haag

*Eerste druk: 2007*  
*Tweede druk: 2010*  
*Derde druk: 2011*  
*Vierde druk: 2012*

*Gepubliceerd door*  
Uitgeverij Acco, Blijde Inkomststraat 22, 3000 Leuven, België  
E-mail: [uitgeverij@acco.be](mailto:uitgeverij@acco.be) – Website: [www.uitgeverijacco.be](http://www.uitgeverijacco.be)

*Voor Nederland:*  
Acco Nederland, Westvlietweg 67 F, 2495 AA Den Haag, Nederland  
E-mail: [info@uitgeverijacco.nl](mailto:info@uitgeverijacco.nl) – Website: [www.uitgeverijacco.nl](http://www.uitgeverijacco.nl)

*Omslagontwerp:* [www.frisco-ontwerpbureau.be](http://www.frisco-ontwerpbureau.be)

© 2010 by Acco (Academische Coöperatieve Vennootschap cvba), Leuven (België)  
Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.  
No part of this book may be reproduced in any form, by mimeograph, film or any other means without permission in writing from the publisher.

# INHOUD

Ten geleide	9
-------------	---

## HOOFDSTUK 1

<b>Het heelal waargenomen</b>	<b>13</b>
-------------------------------	-----------

1.1 Inleiding	13
1.2 Elektromagnetische straling van de hemel	14
1.2.1 Het elektromagnetische spectrum	14
1.2.2 De zwarte straler	15
1.2.3 De stralingswetten van Kirchhoff	17
1.2.4 Het dopplereffect	21
1.2.5 Eigenbewegingen van sterren	22
1.3 Het heelal in kaart gebracht	23
1.3.1 De verdeling van de sterren aan de hemel	23
1.3.2 Het heelal bij hoge energieën	26
1.3.3 Het radioheelal	27

## HOOFDSTUK 2

<b>Sterren en astrofysica</b>	<b>29</b>
-------------------------------	-----------

2.1 De fysica van de zon	29
2.2 De sterren gemeten	35
2.2.1 Afstanden tot de sterren	35
2.2.2 De helderheid van sterren	38
2.2.3 De afmetingen van sterren	41
2.2.4 De temperaturen van sterren	42

2.2.5	Chemische samenstelling van sterren	44
2.2.6	Stellaire massa's	45
2.3	Het Hertzsprung-Russell-diagram	47
2.3.1	Het diagram van Hertzsprung en Russell	47
2.3.2	Kleur-magnitude-diagrammen voor sterrenhopen	50
2.3.3	Interpretatie van de hoofdreeks	51
2.4	De evolutie van sterren	52
2.4.1	Evolutie op de hoofdreeks	52
2.4.2	De kern krimpt in, de buitenkant zet uit	53
2.4.3	Evolutie van sterren van lage en intermediaire massa	55
2.4.4	Evolutie van sterren van grote massa	57
2.5	Het ontstaan van de elementen	59

### HOOFDSTUK 3

	<b>Het interstellaire midden en astrochemie</b>	65
3.1	Het interstellaire midden (ISM): een overzicht	65
3.1.1	De verschillende fasen van het ISM	65
3.1.2	Gas en stof in het ISM	66
3.1.3	Moleculaire wolken	70
3.2	Astrochemie	72
3.2.1	De randvoorwaarden van de chemie in het ISM	72
3.2.2	Basisprocessen in de astrochemie	73
3.2.3	Astrochemie als diagnostiek van het ISM	75
3.2.4	Complexe moleculen in de kosmos	78
3.3	Stervorming	80
3.3.1	Gravitationele instabiliteit	80
3.3.2	Hiërarchische fragmentatie	81
3.3.3	De verschillende stadia van stervorming	83

### HOOFDSTUK 4

	<b>Planetenstelsels en 'astrogeologie'</b>	87
4.1	Het zonnestelsel	87
4.1.1	Een overzicht	87
4.1.2	Stervorming en de vorming van planeten	89

---

4.1.3	Planeten en hun satellieten	92
4.2	Planeten rond andere sterren	93
4.2.1	Inleiding	93
4.2.2	Detectie van exosolaire planeten	93
4.2.3	Systemen met exoplaneten	99
4.2.4	Migratie van planeten	102
4.2.5	Systematiek van exoplaneten	103
4.3	De mogelijkheid van buitenaards leven	106
4.3.1	Inleiding	106
4.3.2	Exploratie van het zonnestelsel	107
4.3.3	Leefbare zones rond andere sterren	110
4.3.4	Waar zijn zij?	111
4.3.5	De hypothese van de ‘Zeldzame Aarde’	112

## HOOFDSTUK 5

<b>Sterrenstelsels</b>		115
5.1	Het Melkwegstelsel	115
5.1.1	De structuur van ons Melkwegstelsel	115
5.1.2	Afstandsbepaling in het Melkwegstelsel	118
5.1.3	Scheikundige evolutie van het Melkwegstelsel	120
5.2	De diverse soorten sterrenstelsels	122
5.2.1	Morfologie van melkwegstelsels	122
5.2.2	Clusters van sterrenstelsels	125
5.2.3	Actieve melkwegstelsels	126

## HOOFDSTUK 6

<b>De evolutie van het heelal</b>		131
6.1	De oerknalhypothese	131
6.1.1	Het heelal in evolutie	131
6.1.2	De expansie van het heelal	133
6.1.3	De kosmologische achtergrondstraling	136
6.1.4	Nucleosynthese in het vroege heelal	139
6.2	Fysische kosmologie	141
6.2.1	Het oerknalparadigma	141

6.2.2	Een epistemologisch intermezzo	142
6.2.3	De opeenvolgende fasen van het heelal	144
6.2.4	Het allervroegste heelal	147
6.2.5	Donkere materie en ‘donkere energie’	150
6.2.6	Heelalmodellen	152
6.2.7	Het ontstaan van sterrenstelsels	154
6.2.8	Het convergentiemodel	158
<b>EPILOOG</b>		
	<b>Het heelal als laboratorium</b>	161
	Gravitatie	162
	Elektromagnetisme	163
	Zwakke wisselwerking	163
	Sterke wisselwerking	165
	Afsluitende mijmeringen	166
<b>APPENDIX A</b>		
	Iets meer over de zwarte straler	169
<b>APPENDIX B</b>		
	Iets over orbitale bewegingen	171
<b>APPENDIX C</b>		
	Iets over relativiteit	173
<b>APPENDIX D</b>		
	Iets over kwantumfysica	175
	Bibliografie	177



# TEN GELEIDE

Het is op aarde dat wij de *basiswetten van de natuur* hebben leren kennen. Basiswetten in de zin dat een veelheid van fenomenen gereduceerd wordt tot een beperkt aantal wetmatigheden waaraan die fenomenen gehoorzamen. Basiswetten die ontrafeld werden door gepaste experimenten uit te voeren en door het inzicht dat die wetten geschreven zijn in de taal van de wiskunde.

Wij weten allemaal dat de aarde een onooglijke plaats is in het heelal. De natuurwetten die we hier hebben leren kennen, zomaar extrapoleren naar de sterren en sterrenstelsels, lijkt dan op het eerste zicht een vrij naïeve onderneming. Als we in Tokyo of Sidney komen, verwachten we toch ook niet dat de Belgische taalwetten daar gelden. Maar het wonderbare is dat de natuurwetten wel aanspraak lijken te kunnen maken op algemene geldigheid, op *universaliteit*. Daarover willen we het hier in eerste instantie hebben.

Het begon met Newton en de appel. Het revolutionaire inzicht uitgedrukt in dat verhaal, was dat de val van die appel en de beweging van de maan rond de aarde veroorzaakt worden door eenzelfde kracht, de gravitatiekracht van de aarde. De aanname dat de gravitatiewet een universeel karakter had, was nieuw en stond haaks op de aristotelische visie dat andere wetten golden in het bovenmaanse en het ondermaanse. Aristoteles dacht trouwens ook dat de substantie telkens anders was: de vier elementen aarde, water, vuur en lucht maken het ondermaanse uit, en het wat chiquere bovenmaanse is gevormd uit een vijfde essentie. De aanname van universaliteit luidde de moderniteit in: ze was de grondslag van de mechanica der hemellichamen, die grote successen kende en nog kent bij de beschrijving van de bewegingen van planeten, sterren en sterrenstelsels.

De *astrofysica* is ontstaan toen men ook de andere natuurwetten die men op aarde had leren kennen, is gaan gebruiken om te proberen de hemellichamen te begrijpen. Niet alleen de bewegingen zouden overal aan dezelfde wetmatigheden als hier

gehoorzamen, ook thermodynamica, kernfysica en atoomfysica moeten overal gelden. Op zichzelf zijn dat boude veronderstellingen die een zekere schroom vergen, en die men hoort te verlaten wanneer ze weinig resultaten opleveren. Maar indien een eenvoudige, zij het in eerste instantie gedurfde veronderstelling telkens opnieuw tot positieve resultaten aanleiding geeft, dan krijgt die veronderstelling zelf ook de rang van een natuurwet. Dat de natuurwetten universeel zijn, is inmiddels niet meer zomaar een aanname, het is een fundamentele vaststelling die telkens opnieuw bevestigd wordt in de verklaringen die wij vinden voor kosmische fenomenen.

Het mooie van de astrofysica is nu juist dat ze ook inhoudelijk aannemelijk maakt waarom de natuurwetten universeel zijn. Het komt ons zo raar over, omdat we beseffen dat de aarde slechts een nietige uitkijkpost is in het heelal. Welnu, de aarde is helemaal geen geïsoleerd systeem dat bestaat los van het onmetelijke heelal om ons heen. Ze is, zoals planeten bij andere sterren, ontstaan uit een schijf van gas en stof rond een vormende ster, uit interstellaire materie die een mengeling is met een voorgeschiedenis die overal analoog is en gezien moet worden in de evolutie van de hele kosmos. Ons lichaam bevat atomen die in duizenden verschillende sterren gesynthetiseerd zijn, en de andere atomen van die sterren zijn nu verspreid over het hele Melkwegstelsel. Dat Melkwegstelsel is al vroeg een eigen leven gaan leiden, maar is met de andere uit dezelfde vrij homogene oersoep ontstaan en heeft trouwens al verschillende andere kleine stelsels opgeslorpt. We zijn dus – met vele andere – een product van het heelal, en als dusdanig niet onderscheiden van de rest. Het zijn niet onze natuurwetten, maar deze van het hele heelal, die overal op dezelfde manier herkenbaar zijn.

Naast de astrofysica is ook de *astrochemie* van belang. Op plaatsen in het heelal waar de temperatuur laag genoeg en de dichtheid hoog genoeg zijn, spelen moleculaire processen, met de ons vertrouwde chemische elementen, een belangrijke rol. Ook daar is enerzijds veel herkenbaar en zijn de omstandigheden anderzijds zo verschillend van deze in onze laboratoria dat zij ons een onvermoede rijkdom aan chemische processen en diagnostieken laten ontdekken. Tussen de moleculen bevinden zich stofdeeltjes waaruit grotere vaste lichamen zoals planeten kunnen groeien; men spreekt dan van *astrogeologie*, een wat dubbelzinnige term. Ook *astrobiologie* is in opmars: niet in de zin dat er elders al levende wezens zouden zijn gevonden, maar eerder om de kosmische context te duiden waarin het leven op aarde is ontstaan.

In dit boek verkennen wij de kosmos om ons heen. Het vertrekpunt in ons verhaal is telkens de verwondering over hetgeen om ons heen gebeurt, in de wereld waarin wij ontstaan zijn. Verwondering over die eindeloze leegte waarin zovele merkwaardige

fenomenen blijkbaar gratis gebeuren. Maar met vooral aandacht voor de mechanismen achter die fenomenen. Want het grootste wonder is wellicht dat wij erin slagen tot op zekere hoogte dit geheel om ons heen te overzien.

Waar het reductionisme – het hiërarchisch ontrafelen van problemen in hun bestanddelen – ons geholpen heeft om de natuur te begrijpen, is het merkwaardig op het einde van de rit vast te stellen dat alles aaneenhangt. Op die manier willen wij ook graag de boodschap brengen dat er een grote verbondenheid bestaat tussen alle natuurwetenschappelijke disciplines. Met de heimelijke hoop ook de lezer ervan te overtuigen dat het de sterrenkunde – de oudste van alle wetenschappen – is die deze verbondenheid het beste aantoont.



# HET HEELAL WAARGENOMEN

## 1.1 Inleiding

Hetgeen de sterrenkunde enigszins onderscheidt van andere experimentele disciplines, is dat een experiment zoals deze waarmee wij de natuur bevragen in onze laboratoria, er meestal niet mogelijk is omdat de objecten die de sterrenkundige bestudeert, niet rechtstreeks toegankelijk zijn. Een kikker kan je opensnijden, een ster niet. In die zin is een sterrenkundige in eerste instantie een *waarnemer* die zijn wetenschap moet opbouwen met de gegevens die door de objecten die hij bestudeert ter beschikking gesteld worden. Deze gegevens liggen voornamelijk besloten in de *elektromagnetische straling* die uit de kosmos kan gedetecteerd worden.

Meten is interageren. De interacties die wij kennen in de natuur kunnen worden teruggebracht tot vier fundamentele wisselwerkingen: de sterke en zwakke wisselwerkingen, elektromagnetisme en gravitatie. De sterke (nucleaire) wisselwerking heeft een erg korte dracht; hoe fundamenteel ze ook is, ze heeft geen effecten op de grote afstanden in de kosmos. Gravitatie is dan weer erg zwak: er zijn al onrechtstreekse aanwijzingen voor gravitationele straling in de kosmos, maar rechtstreekse detectie is nog steeds niet mogelijk gebleken. Ook de zwakke wisselwerking is erg zwak: kosmische neutrino's zijn al waargenomen en leiden tot heel interessante diagnostieken, maar blijven een relatief marginale vorm van informatie. De wetenschap van de kosmos is dan ook vooral tot ons gekomen via de elektromagnetische straling die we van de hemellichamen mogen ontvangen.

Het kunnen lezen van de informatie die in elektromagnetische straling vervat ligt, is dan ook essentieel om de signalen uit de kosmos te decoderen. Het is dus nuttig om eerst enkele kernbegrippen onder de aandacht te brengen. Vervolgens wordt een overzicht gegeven van de structuur van de kosmos, zoals deze aan de waarnemer verschijnt.

## 1.2 Elektromagnetische straling van de hemel

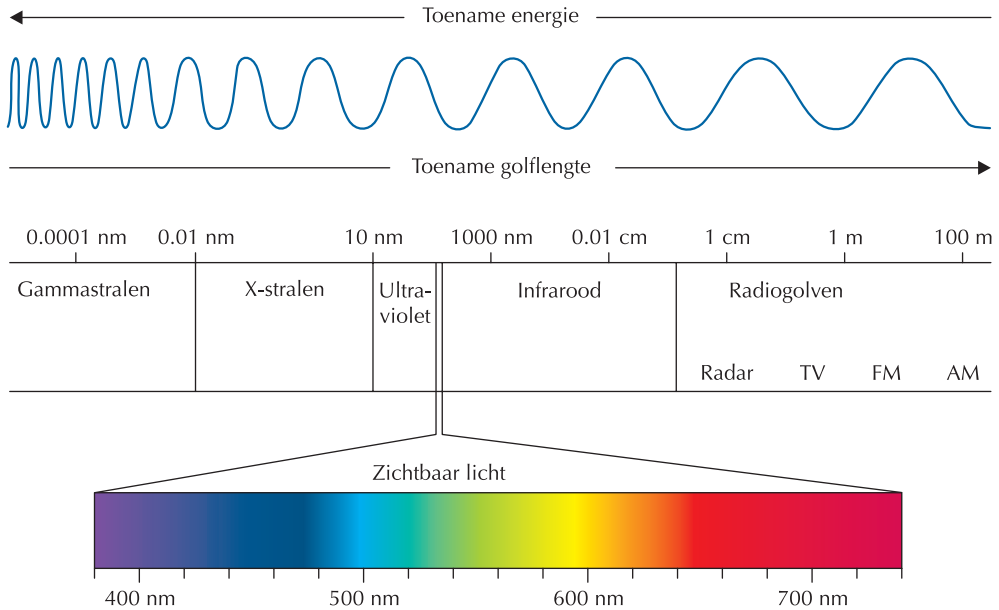
### 1.2.1 Het elektromagnetische spectrum

Elektromagnetische straling plant zich in vacuüm voort met de lichtsnelheid,  $c = 299\,790\text{ km/s}$ . Men kan deze straling beschouwen als een golfverschijnsel, met frequentie  $\nu$  en golflengte  $\lambda$ , verbonden door de betrekking  $\lambda \nu = c$ . Een equivalente beschrijving is in termen van stralingsdeeltjes of *fotonen*; bij een golf met een frequentie  $\nu$  hoort een foton met een energie  $E = h \nu$ , waarbij  $h$  de constante van Planck voorstelt. Het elektromagnetische spectrum wordt gewoonlijk opgedeeld als volgt, volgens stijgende energie van de fotonen:

- **Radiogolven** hebben golflengten groter dan 30 cm.
- **Microgolven** hebben golflengten kleiner dan 30 cm en groter dan 1 mm.
- **Infrarode straling** is straling met golflengten kleiner dan 1 mm en groter dan 780 nm. In de sterrenkunde wordt dit ruime en belangrijke spectrale gebied nog opgedeeld in het submm-gebied en verre, midden en nabije infrarode straling.
- **Optische straling** is een nauwe band tussen 780 en 380 nm, die alle kleuren van de regenboog beschrijft.
- **Ultraviolette straling** is straling met golflengten van 380 tot 1 nm. Ook hier maakt men een onderscheid tussen nabij, ver en extreem UV.
- **Röntgenstralen** of **x-stralen** hebben golflengten kleiner dan 1 nm en groter dan ongeveer 6 pm. Het onderscheid dat men maakt is tussen zachte (sic) en harde röntgenstraling.
- **Gammastralen** ten slotte hebben de hoogste energieën, met golflengten kleiner dan 6 pm.

Het smalle optische venster is hetgene waarvoor ons menselijk oog gevoelig is. De elektromagnetische straling van hemellichamen is voor onze instrumenten toegankelijk in een ruimer gebied, maar de aardse atmosfeer absorbeert alle straling met golflengten kleiner dan ongeveer 300 nm. Het elektromagnetische spectrum dat vanop aarde toegankelijk is, spreidt zich verder uit in het nabije infrarood, met brede onderbrekingen die te wijten zijn aan absorptie aan moleculen ( $\text{H}_2\text{O}$  en  $\text{CO}_2$  vooral) in onze atmosfeer en verder tot het radio- en microgolfgebied. Om optimaal de signalen van de hemel te detecteren, worden sterrenkundige instrumenten vaak op hoge en droge plaatsen, ver van storend licht neergezet; de radiosterrenkunde, die weinig of niet wordt gehinderd door de atmosfeer, heeft vandaag de dag sterk te lijden onder allerhande emissie van straling door de menselijke activiteit zelf. Met de mogelijkheden om waarnemingen vanuit de ruimte te verrichten, zijn verschillende spectrale

vensters opengegaan die voorheen ontoegankelijk waren. Het ruimtetijdperk heeft onze visie op de kosmos aanzienlijk verbeterd, vooral bij hoge energieën, maar ook in het infrarode gebied.



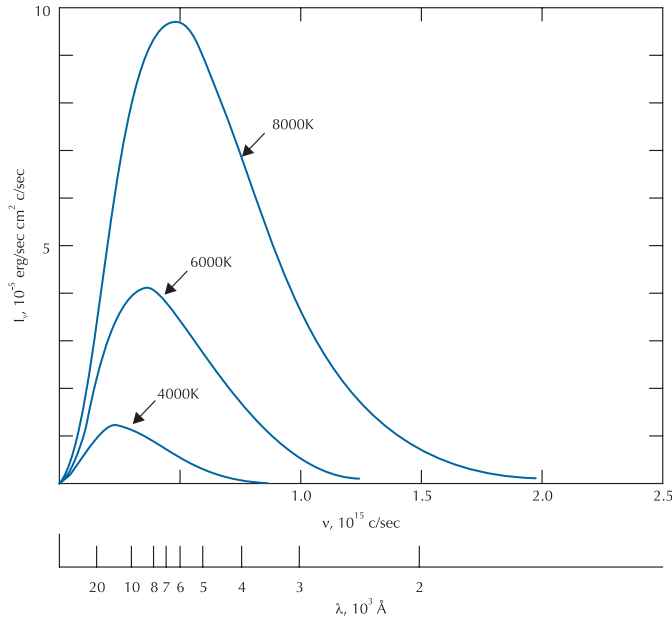
FIGUUR 1.1 Golflengtegebieden van het elektromagnetische spectrum.

### 1.2.2 De zwarte straler

Een aanzienlijke fractie van de elektromagnetische straling die wij uit het heelal waarnemen, is bij goede benadering *thermische straling*: het uitzicht van de straling wordt in hoge mate bepaald door de temperatuur die het uitstralende lichaam heeft. Een lichaam met een bepaalde temperatuur  $T$  vertoont een spectrum of energieverdeling met een welbepaalde en goed herkenbare afhankelijkheid van de golflengte of de frequentie. Dit thermisch spectrum is gekend als de *wet van Planck*. De naam Planck is verbonden met de vroege ontwikkeling van de kwantummechanica, en juist het verklaren van de thermische straling van lichamen heeft bij die ontwikkeling een grote rol gespeeld.

Men heeft het ook vaak over een ‘zwarte straler’ in die context. Zwart is iets dat geen straling weerkaatst. De straling die zo een lichaam uitzendt, hangt dus enkel af van

de eigen energievoorraad, en die is nauw verbonden met de temperatuur. Overdag zijn wij geen zwarte stralers, we zien elkaar aan het (zon)licht dat we weerkaatsen. 's Nachts is er geen zonlicht om te weerkaatsen en zijn we bij goede benadering zwarte stralers in het infrarode spectrum.



**FIGUUR 1.2** De intensiteit van een zwarte straler wordt hier uitgezet voor drie verschillende temperaturen in functie van de frequentie en de golflengte. Bemerkt dat voor hogere temperaturen het maximum verschuift naar hogere frequenties, en dat het oppervlak onder de kromme sterk afhankelijk is van de temperatuur (met een vierde macht).

De stralingswet van Planck beschrijft mathematisch hoe de intensiteit van een zwarte straler met een bepaalde temperatuur afhankelijk is van de golflengte. Uit die wet kan men enkele andere wetten afleiden. Eén ervan is vrij eenvoudig, en ook nuttig, namelijk de *verplaatsingswet van Wien*, die aangeeft bij welke golflengte het maximum van de energie optreedt voor een zwarte straler met een temperatuur  $T$ , namelijk

$$\lambda_{\max} T = \frac{hc}{4.9651k} = 2897 \mu m K.$$

Een typische temperatuur voor de buitenlagen die wij van de zon kunnen waarnemen, is 5770 K (kelvin), zodat het maximum van de energieverdeling van de zon ons



verschijnt rond  $0.5 \mu\text{m}$ , in het zichtbare licht dus (de zon is geel!). De optische, nabije UV- en nabije IR-gebieden van het elektromagnetische spectrum zijn inderdaad deze waarin wij de sterren het best kunnen waarnemen. Objecten bij kamertemperatuur, zoals onze aarde en wijzelf, stralen vooral in het infrarood; hete kosmische objecten kunnen bronnen zijn van röntgenstraling en  $\gamma$ -straling.

Uit de wet van Planck volgt ook hoe grootheden zoals de hoeveelheid energie per eenheid van volume en de druk van de straling afhangen van de temperatuur. Het blijkt telkens met de vierde macht van de temperatuur te gebeuren: hoe heter een bron, hoe intenser de straling die ze uitzendt.

### 1.2.3 De stralingswetten van Kirchhoff

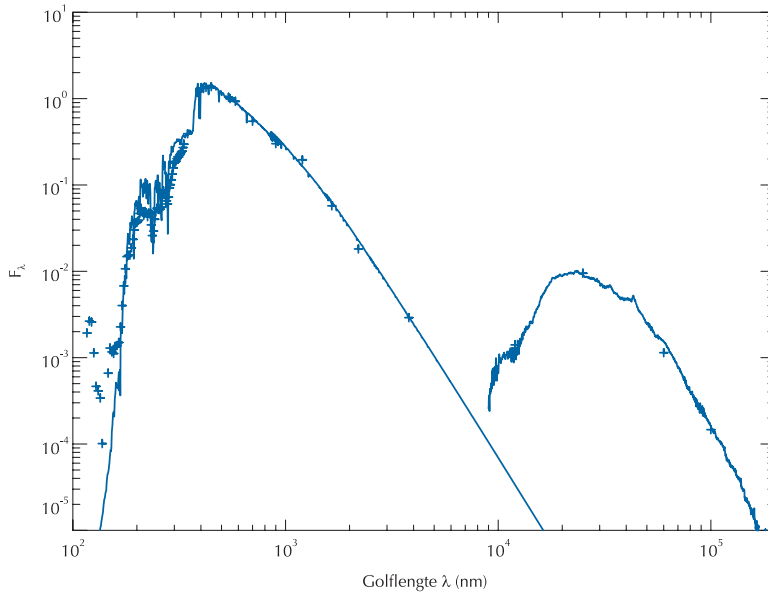
De wet van Planck is erg nuttig om uit het golflengteverloop van een bron een idee te vormen van de temperatuur waarbij de bron uitzendt, zelfs al is die bron maar bij benadering een zwarte straler. Wanneer we de spectra meer in detail bekijken, blijkt vaak dat ze geen netjes continu en monotoon verloop tonen als een zwarte straler, maar dat bij welbepaalde golflengten *absorptie-* en *emissielijnen* voorkomen, lokale minima en maxima dus. Dergelijke absorptielijnen werden voor het eerst waargenomen in het spectrum van de zon door Wollaston in 1802 en door Fraunhofer in 1815.

Op grond van laboratoriumexperimenten met warmtebronnen en gassen, uitgevoerd door Kirchhoff en Bunsen in de periode 1859-1862, konden de mysteries rond die absorptie- en emissielijnen enigszins opgehelderd worden. Kirchhoff formuleerde uiteindelijk de volgende stralingswetten:

1. Een gloeiende vaste stof, vloeistof of dicht gas zendt een continu spectrum uit.
2. Een gloeiend gas met lage dichtheid zendt een spectrum van emissielijnen uit.
3. Het spectrum van een gas dat waargenomen wordt op de voorgrond van een heter bron van continue straling, bestaat uit donkere absorptielijnen, waarvan de golflengte overeenkomt met deze waarbij emissielijnen voorkomen indien het gas verhit wordt.

De eerste wet van Kirchhoff is gewoon een primitieve vorm van de wet van Planck. Met de andere wetten van Kirchhoff kunnen we al enkele nuttige kwalitatieve uitspraken doen over de kosmos. Sterspectra bevatten vooral absorptielijnen en moeten dus geïnterpreteerd worden in termen van de derde wet: de atmosfeer van een ster

is koeler dan de lagen eronder. Inderdaad, de zon is een gasbol met een temperatuursgradiënt: de temperatuur aan het oppervlak bedraagt ongeveer 4200 K, en we kunnen kijken tot in lagen met een temperatuur van om en bij de 8000 K, maar niet dieper. Het waarnemen van een absorptiespectrum leert ons dus dat het heter wordt naarmate we dieper afdalen in een ster, en dat zal een fundamenteel aspect blijken te zijn om de structuur van een ster te begrijpen.

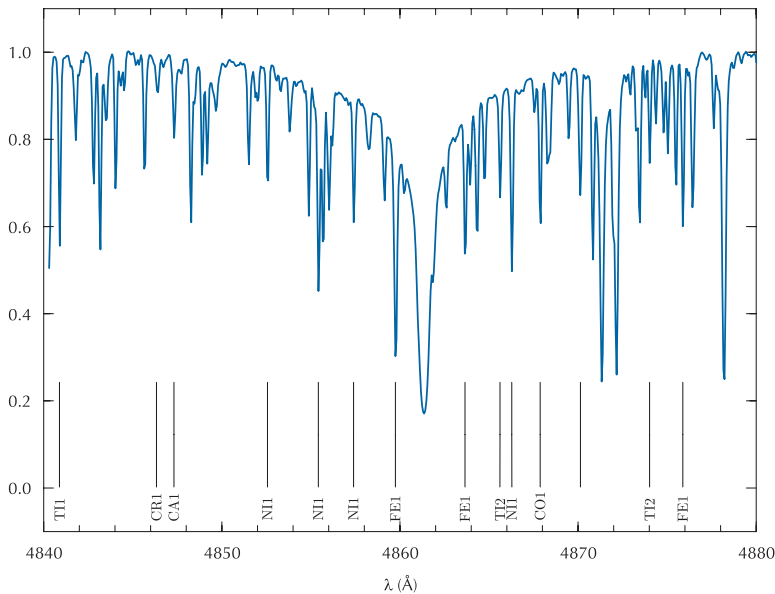


**FIGUUR 1.3** Het breedbandige spectrum, of de energieverdeling van de ster HD 161796. In het optische gedeelte zien we een verloop dat toch enigszins aanleunt bij een zwarte straler, met een temperatuur van ongeveer 6000 K; over het algemeen is een zwarte straler inderdaad een goede benadering voor sterren; rond 365 nm wijkt het spectrum evenwel sterk af, als gevolg van de ionisatie van waterstof in de steratmosfeer. Bij de langere infrarode golflengten zien we een tweede bult, veroorzaakt door koel stof dat de ster omgeeft.

Het was in de 19de eeuw niet duidelijk hoe de absorptie en emissie juist tot stand kwamen, en wat de golflengten bepaalde waarbij het telkens gebeurde. Wel stelden Kirchhoff en Bunsen reeds vast dat welbepaalde spectrale lijnen telkens overeenkomen met de effecten op de straling van welbepaalde elementen. Ook hier is het de kwantummechanica die de antwoorden geeft. De elektronen in atomen bevinden zich in welbepaalde energietoestanden, die voor elk element van de tabel van Mendeljev anders zijn. Een elektron kan van een lager naar een hoger niveau springen door absorptie van een foton, waarbij het verband tussen de energiesprong  $\Delta E$  en de

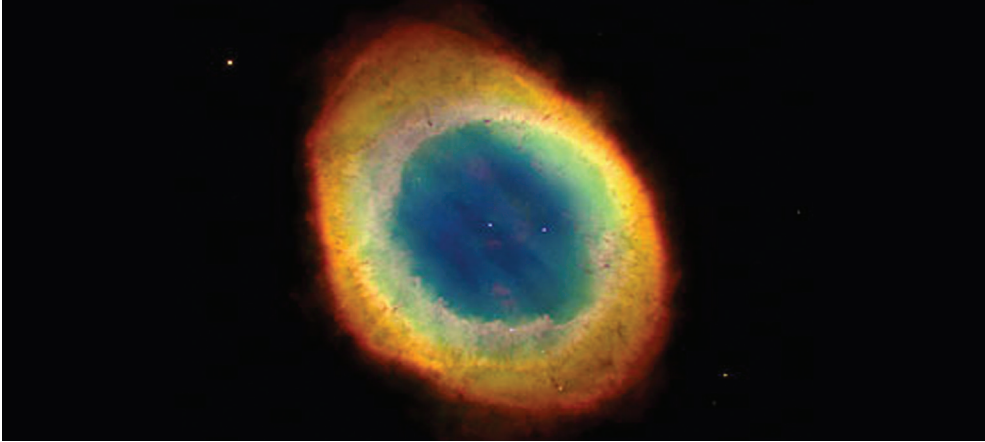
frequentie van het foton  $\nu$  gegeven wordt door  $\Delta E = h\nu$ ; emissie komt overeen met de overgang van een hoger naar een lager niveau. Ook die energiesprongen zijn dus anders naargelang het een ander element betreft.

In een systeem in evenwicht zijn er evenveel overgangen in beide richtingen, evenveel absorpties als re-emissies. Hoe komt het dan dat we in de atmosfeer van de zon nettoabsorptie zien? Het komt omdat we in de richting van de temperatuurs- en dus energiegradiënt kijken: naar ons toe is er netto meer absorptie, terwijl de re-emissie isotroop, in alle richtingen gelijk, gebeurt; het beetje re-emissie in onze richting slaagt er niet in de absorptie te neutraliseren. Emissielijnen zien we wanneer we de re-emissie zien, maar geen absorptie in onze richting, met andere woorden wanneer we naast de bron kijken.

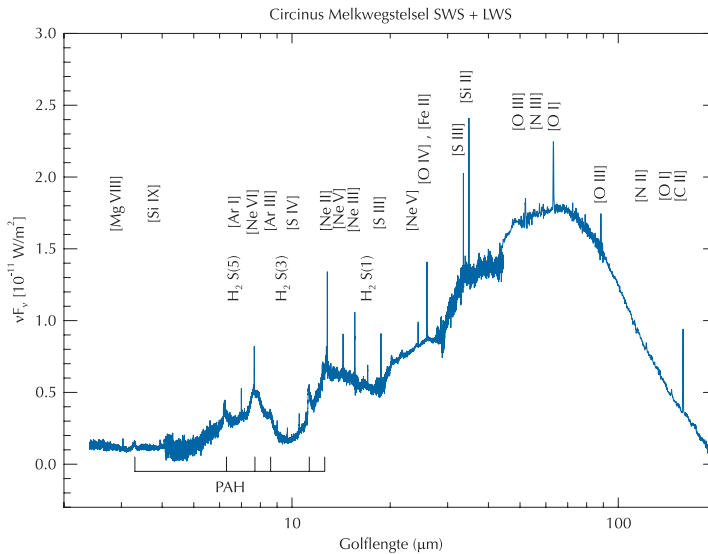


**FIGUUR 1.4** Een (klein) stukje van het absorptiespectrum van de zon, waarbij de intensiteit van het continu op 1 werd genormaliseerd. Opvallend is de brede en diepe lijn van waterstof bij 486 nm; waterstof is dan ook het meest voorkomende element in sterren.

Indien we bij een kosmisch object emissielijnen waarnemen, betekent dit dus dat de bron omgeven is door een uitgebreid ijl gas. Bronnen met pure emissiespectra stralen sterk bij welbepaalde golflengten en nauwelijks bij andere. Het is deze eigenschap die zorgt voor de merkwaardige kleurenpracht van ijle nevels aan de hemel. Om deze emissiespectra te genereren, is een energiebron nodig die telkens weer de atomen



**FIGUUR 1.5** De Helixnevel is een zogenaamde planetaire nevel. In het centrum van de nevel bevindt zich een hete ster, die het ijle gas van de nevel met een intens stralingsveld beïnvloedt. De dieprode kleur van de buitenste ring komt doordat de straling vrijwel exclusief via de  $H\alpha$ -lijn van waterstof bij 656 nm gebeurt. De groene kleur van de binnengebieden wordt veroorzaakt door emissie in de  $H\beta$ -lijn van waterstof bij 486 nm. Opname Anglo-Australian Observatory.



**FIGUUR 1.6** Op deze figuur zien we het infrarode spectrum van een befaamd melkwegstelsel in Circinus. Het spectrum bevat een continuüm, dat te wijten is aan (zwarte) straling van interstellair stof met lage temperaturen, en talrijke emissielijnen en -banden veroorzaakt door ijl interstellair gas en warme moleculen. De meeste energie die hier wordt uitgestraald, kan uiteindelijk worden teruggebracht tot het licht van sterren, maar mede omdat het interstellaire midden een veel groter oppervlak beslaat, zijn het vooral de opgelichte wolken die we waarne- men. Opname Infrared Space Observatory (ESA).

exciteert of ioniseert, en die energiebron is vaak een hete ster die zich in de nevel bevindt. In stervormingsgebieden (zoals de Orionnevel) zijn dat jonge, hete sterren die de materie waarin ze geboren zijn, doen oplichten. In de zogenaamde planetaire nevels zijn het de hete centrale overblijfselen van een ster die de uitgeworpen vroegere buitenlagen van de ster nog een tijdje doen oplichten vooraleer deze het interstellaire midden vervoegen.

### 1.2.4 Het dopplereffect

Dat sterspectra aanleiding geven tot absorptielijnen, deze lijnen soms scherp zijn en steeds voorkomen bij golflengten die via natuurconstanten afhangen van de aard van de atomen of moleculen waarbij zij horen, heeft een bijzonder belangrijk supplementair gevolg. De meting van de positie van gekende spectrale lijnen in de spectra van sterren stelt ons immers in staat de snelheid van de bron volgens de gezichtslijn te bepalen aan de hand van het *dopplereffect*.

Het dopplereffect kennen we het best van geluidsgolven. Het (afgezaagde) voorbeeld is dat van de ambulance waarvan de toon hoger klinkt als ze naar ons toe beweegt, en lager als ze zich verwijderd. De hoogte van de toon (frequentie) komt overeen met het aantal golven die ons per seconde bereiken. Indien de bron naar ons toekomt – en de golf zelf zich met een eindige snelheid voortplant – dan halen de golven zichzelf in en nemen we een hogere frequentie waar.

Het effect is net eender voor elektromagnetische golven. En dankzij de spectrale lijnen, kunnen we nauwkeurig de snelheid (in onze richting!) van het object bepalen. Indien men een spectrale lijn, waarvan de golflengte in het laboratorium gelijk is aan  $\lambda_0$ , voor een hemellichaam meet bij een golflengte  $\lambda_w$ , dan wordt de *radiale snelheid* van het hemellichaam gegeven door

$$v_{rad} = c \frac{\lambda_w - \lambda_0}{\lambda_0}.$$

Deze uitdrukking geldt zolang de snelheid niet te groot is, anders zijn er zogenaamde relativistische correcties nodig. Typische stersnelheden zijn van de orde van tientallen of honderdtallen km/s, zodat de niet-relativistische benadering gerechtvaardigd is. In sommige exotische systemen van dubbelsterren en dicht bij de centra van sommige melkwegstelsels worden soms wel relativistische snelheden waargenomen.

Voor de studie van de bewegingen van sterren in ons melkwegstelsel en van de banen van dubbelsterren, zijn nauwkeurigheden van de orde van een km/s op de snelheid voldoende. Recente technologische ontwikkelingen maken het mogelijk voor sommige sterren, waarvan de spectrale lijnen talrijk en scherp zijn, nauwkeurigheden van de orde van enkele m/s op de radiale snelheid te halen, waarmee het mogelijk wordt de kleine schommelingen van de stersnelheid als gevolg van de aanwezigheid van grote planeten te detecteren. Het blijft echter zo dat de methode ons enkel in staat stelt één component van de snelheid, deze in de kijkrichting, te bepalen. De componenten loodrecht erop moeten we op een andere manier vinden.

### 1.2.5 Eigenbewegingen van sterren

Halley was de eerste die opmerkte dat de aanblik van de sterrenhemel traag verandert in de tijd, nadat hij sterposities gemeten gedurende zijn epoche vergeleek met deze die Hipparchus had opgemeten in de 2de eeuw vóór Christus. Men definieert de eigenbeweging  $\mu$  als de verandering van de positie van de ster aan de hemel, in boogseconden per jaar.

Uit de metingen van radiale snelheden, via het dopplereffect dus, weten we dat typische relatieve snelheden van sterren in de omgeving van de zon van de orde van 20 km/s bedragen. Omwille van de grote afstanden tot de sterren, resulteren die bewegingen in slechts kleine eigenbewegingen. In hoofdstuk 2 zal een eenheid van afstand, de *parsec*, gedefinieerd worden, die overeenkomt met de afstand van waarop de *astronomische eenheid* – de halve grote as van de aardbaan om de zon, of ongeveer 149.6 miljoen km – onder een hoek van 1 boogseconde gezien wordt. Een ster met een tangentiële snelheid van 1 km/s legt per jaar 31.56 miljoen km af, of 1/4.74 astronomische eenheden. De tangentiële snelheid van een ster (in km/s) is dus gelijk aan 4.74 maal de eigenbeweging in boogseconden per jaar maal de afstand in parsec:

$$v_{\text{tan}} = 4.74 \mu d.$$

Wanneer men weet dat geen enkele ster dichter staat dan 1 parsec, wordt het duidelijk dat slechts een handvol sterren sneller beweegt dan enkele boogseconden per jaar. Recordhouder is de *ster van Barnard*, die een eigenbeweging van een tiental boogseconden per jaar vertoont; het is dan ook intrinsiek een snel bewegende ster. Voor positiebepalingen haalt men nauwkeurigheden van de orde van 0.01" vanaf het aardoppervlak, en van de orde van 0.001" met de gegevens van de astrometrische

satelliet Hipparcos. Vermits deze satelliet gedurende verschillende jaren operationeel was, is (enigszins optimistisch) een nauwkeurigheid van 1 m/s haalbaar voor een ster op 1 parsec, en dus van de orde van 10 km/s voor een ster in de omgeving van het melkwegcentrum (op 8 kiloparsec). Radiale snelheden zijn dus nog altijd nauwkeuriger meetbaar dan eigenbewegingen. De astronomische gemeenschap kijkt wel met verwachting uit naar de lancering van de satelliet Gaia, die nauwkeurigheden van de orde van een tiental miljoenensten van een boogseconde zal halen voor de posities van sterren.

## 1.3 Het heelal in kaart gebracht

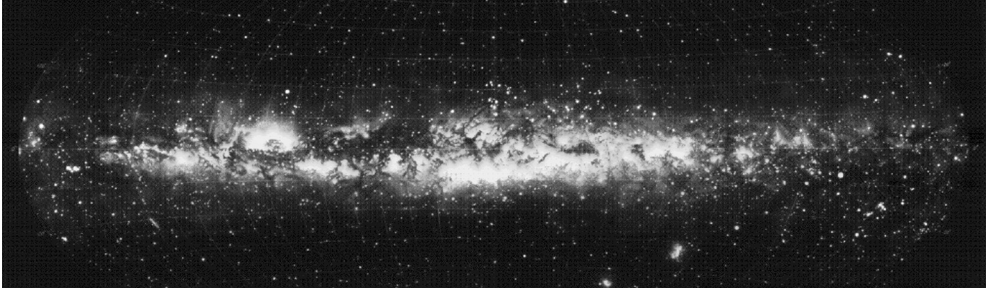
Elektromagnetische straling komt op ons af, voortdurend en van alle kanten. Die straling bestrijkt ook het gehele elektromagnetische spectrum. De optische hemel is met telescopen in noord en zuid vrij goed in kaart gebracht, zeker wat onze nabije omgeving in het heelal betreft. Voor de meeste andere gebieden van het spectrum is het de ruimtevaart die deze vensters voor ons heeft geopend. Door die verschillende spectrale vensters zien we telkens hetzelfde heelal, maar vanuit een ander en complementair perspectief.

Het ‘in kaart brengen’ van de hemel betekent dat we ons beperken tot een tweedimensionaal beeld, en de diepte verwaarlozen. Dat doen we impliciet wanneer we de sterren in sterrenbeelden onderbrengen, we worden de derde dimensie niet zo direct gewaar. De ‘hemelsfeer’ is in die zin een abstractie, die zich evenwel op natuurlijke wijze aandient. Om die bol om ons heen in twee dimensies te projecteren, moeten we een ‘evenaar’ en een ‘poolas’ definiëren, en dat kan op verschillende manieren. Een verstandige keuze is waarbij we voor de ‘evenaar’ refereren aan de grote cirkel die de Melkweg vormt aan de hemel. In de volgende secties overlopen we hoe het heelal eruit ziet bij grote, middelmatige en lage energieën. Hierbij worden sommige types voorwerpen vermeld die verder meer uitgebreid aan bod komen.

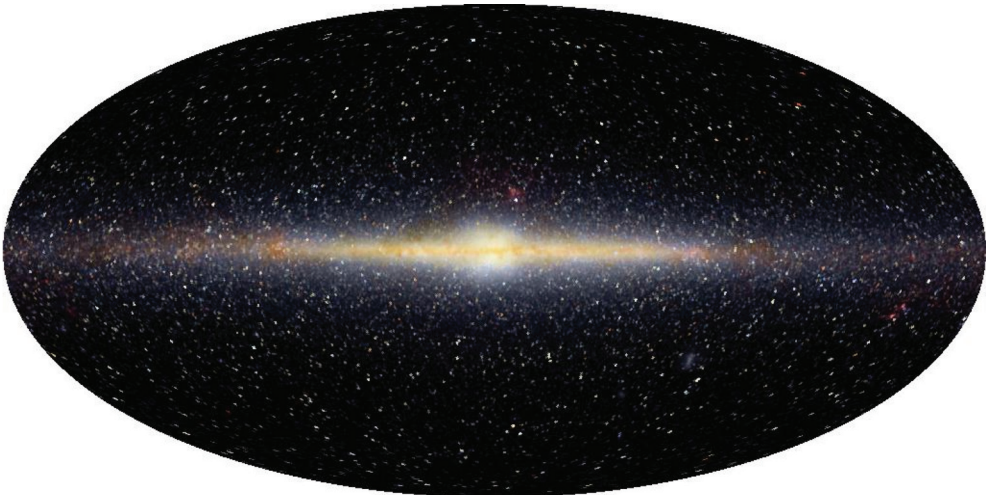
### 1.3.1 De verdeling van de sterren aan de hemel

Newton dacht over de kosmos als bestaande uit oneindig veel sterren in alle richtingen. Als we de hemel in kaart brengen, blijkt de verdeling van de sterren echter niet isotroop te zijn. De dichtheid aan bronnen aan onze *optische* hemel wordt

gedomineerd door een heldere band van sterren die wij de Melkweg noemen. Het is dan ook aangewezen bij een tweedimensionale projectie van de hemelsfeer deze band als ‘evenaar’ te kiezen. In optisch licht is wel een maximale helderheid van de Melkweg waar te nemen in de richting van het sterrenbeeld Sagittarius, maar het contrast is vrij gering. Inderdaad, de verduistering door interstellair stof is ervoor verantwoordelijk dat wij met optisch licht slechts in beperkte mate kunnen doordringen in ons eigen melkwegstelsel.



**FIGUUR 1.7** Een kaart van de hemel bij optische golflengten, waaruit blijkt dat de meeste sterren van ons sterrenstelsel tot een schijf behoren die we zien als de Melkweg. De donkere gebieden zijn stofwolken die ons beletten verder te kijken. Boven en onder de Melkweg kunnen we dieper in het heelal kijken; op de figuur vallen onderaan, rechts van het midden, de Kleine en de Grote Magellaanse Wolk op; links, iets onder de Melkweg, zien we de Andromedanevel, het meest nabije grote sterrenstelsel



**FIGUUR 1.8** Een kaart van de hemel bij infrarode golflengten, opgemeten met het DIRBE-experiment aan boord van de COBE-satelliet van de NASA. Bij deze infrarode golflengten dringt de straling door het interstellair stof, en wordt de centrale bult van ons melkwegstelsel goed zichtbaar.



Wanneer wij de *infrarode* puntbronnen in kaart brengen, dan valt de centrale verdikking van onze melkwegschijf wel duidelijk op: meteen is duidelijk dat de zon zich op een excentrische plaats bevindt in een schijfvormig melkwegstelsel zoals wij er in ondiepe opnamen van het heelal vele andere zien. Sinds Newton weten wij dat de zon een ster is tussen vele andere, sinds het begin van de 20ste eeuw is duidelijk geworden dat de sterren op hun beurt gegroepeerd zijn in sterrenstelsels. Ons stelsel is schijfvormig, en door die schijf kunnen wij niet ver kijken in optisch licht. Zolang we ons enkel steunen op de optische gegevens, is het niet zo duidelijk dat wij ons ver van het centrum bevinden, maar de infrarode gegevens geven dadelijk uitsluit- sel! Boven en onder de schijf is het extragalactische heelal wel toegankelijk; nabije stelsels die wij met het blote oog kunnen zien, zijn de twee Magellaanse Wolken en de Andromedanevel.

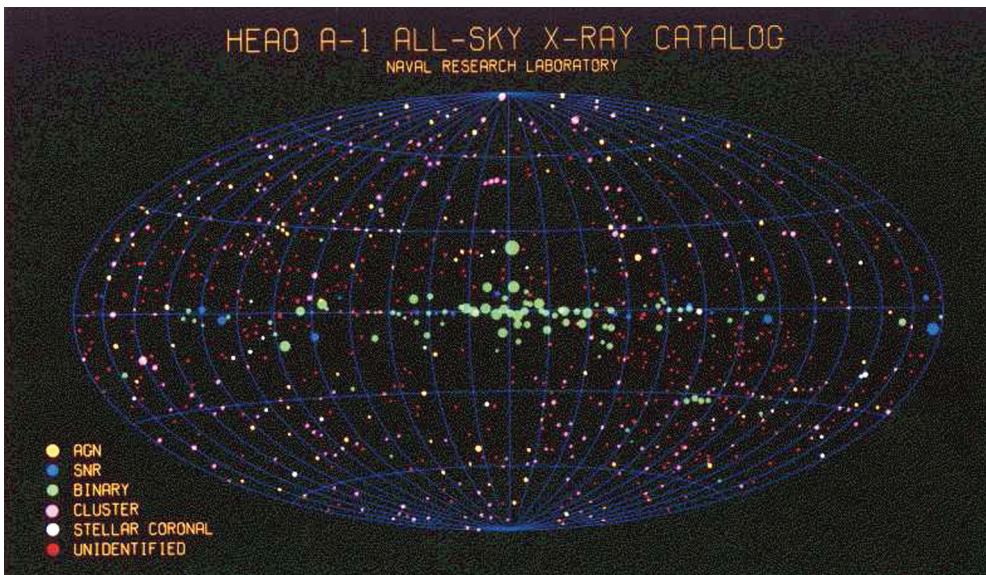


**FIGUUR 1.9** De Andromedanevel, het meest nabije grote externe sterrenstelsel. Stel dat de zon een ster was van Andromeda, gelegen in de schijf, maar een eind weg van het centrum: de aanblik van het eigen stelsel zou sterk gelijken op wat wij zien in de figuren 7 en 8. Net zoals ons melkwegstelsel trouwens heeft Andromeda twee kleinere satellietstelsels.

Met het blote oog kan men maar enkele andere melkwegstelsels zien, maar de telescoop toont ons er meer dan er sterren zijn in ons melkwegstelsel. Op grote schaal zijn de melkwegstelsels, verdeeld in clusters, de bouwstenen van het heelal. Elk van die stelsels bevat grote hoeveelheden sterren, en rond vele van die sterren bevinden er zich vermoedelijk planeten. De sterrenkunde valt dus in de disciplines uiteen: zonnestelsel, sterren, melkwegstelsels. Maar onafhankelijk zijn deze disciplines niet.

### 1.3.2 Het heelal bij hoge energieën

Volgens de verplaatsingswet van Wien verwachten wij sterren vooral te zien in het optische spectrum, in het nabije ultraviolet en in het infrarood. De eerste voorstellen om via ruimtemetingen ook de röntgenhemel te verkennen, werden dan ook op scepticismus onthaald. Ten onrechte, bleek uiteindelijk, want de röntgenhemel is bijzonder rijk en divers. Röntgenbronnen zijn veel heter dan sterren, hun temperaturen zijn van de orde van miljoenen K. De x-stralenhemel is er dus een van spectaculaire fenomenen en evenementen.



**FIGUUR 1.10** Een kaart van de röntgenbronnen aan de hemel, opgemeten met de NASA-satelliet HEAO-1. Deze bronnen zijn zowel galactisch van aard (supernovaresten, hete coronae rond sterren, binaire systemen met een compacte begeleider) als extragalactisch (heet gas in clusters van melkwegstelsels, actieve melkwegkernen).

Het heelal is in hoge mate transparant voor röntgenstraling, zodat de röntgenmetingen ons in staat stellen om hete objecten tot op grote afstanden te detecteren. Bepaalde klassen van röntgenbronnen behoren tot ons melkwegstelsel, vermits zij vooral in de richting van onze melkwegschijf gelegen zijn. Een eerste klasse bestaat uit supernovaresten, waarbij de röntgenstraling veroorzaakt wordt de botsingen van de ejecta met het interstellaire midden. Röntgenbronnen zijn ook vaak binaire systemen waarvan één component een compact object is, zoals een neutronenster. Door de sterke gravitatie van de neutronenster wordt materie van de begeleider aan gigantische snelheden geaccreteerd, opnieuw met röntgenstraling tot gevolg. Merkwaardig is toch dat ook vele röntgenbronnen voorkomen op hoge galactische breedten, en dus extragalactisch van aard moeten zijn. Inderdaad blijken zij samen te vallen met *actieve melkwegkernen* of AGN's, waar het eveneens de accretie op een grote centrale massa is die de röntgenstraling veroorzaakt. Maar in de plaats van de 1.4 zonsmassa's van een neutronenster, betreft het hier massa's van de orde van  $10^8 M_{\odot}$ .

Bij nog hogere energieën, deze van gammastraling, zien we de relatief nabije neutronsterren en actieve melkwegstelsels. Gammastraling is ook een interessante diagnostiek voor supernovaresten, omdat bepaalde nucleaire vervallen tot  $\gamma$ -stralen aanleiding geven. Een ander type bronnen zijn de zogenaamde  $\gamma$ -*bursters*, korte explosies diep in het heelal. Pas recent is het mogelijk geworden dergelijke bronnen ook bij andere golflengten waar te nemen vooraleer ze aan de hemel verdwenen waren. Het blijkt dat het inderdaad gaat om gigantische explosies op kosmologische afstanden.

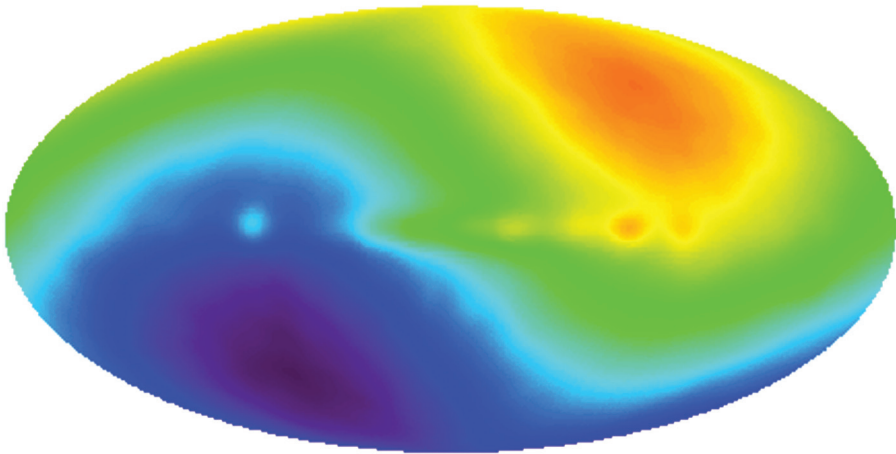
### 1.3.3 Het radioheelal

De koudste moleculaire wolken in ons melkwegstelsel hebben temperaturen van de orde van 20 K en zijn dus het best waarneembaar in het verre infrarood of zelfs het submm-gebied. Op langere golflengte is de straling niet langer thermisch van aard, met één nootore uitzondering die verder aan bod komt.

Radiostraling van andere melkwegstelsels wordt meestal veroorzaakt door synchrotronstraling, de straling van elektronen die zich bewegen in een magnetisch veld. In het radiogebied vindt men ook emissies van moleculen in het interstellaire midden. Het grote voordeel van radiometingen is dat ze nauwelijks beïnvloed zijn door interstellaire absorptie. De meest voorkomende interstellaire molecule is  $H_2$ , maar doordat deze molecule geen dipoolmoment heeft, geeft ze slechts zwakke signalen. Het interstellair midden wordt daarom vooral verkend via de CO-molecule, die sterke

spectrale lijnen vertoont in het mm-gebied. Van groot belang ten slotte is de 21cm-lijn van neutraal atomair waterstof: dit is de (onwaarschijnlijke) overgang waarbij de spin van het elektron omklapt.

De notoire uitzondering waarvan hoger sprake, betreft de continue straling rond 1 mm. In dit gebied wordt de straling gedomineerd door een heldere achtergrond met het spectrum van een zwarte straler met een temperatuur van 2.74 K. Dit is het enige gebied van het spectrum waarvoor de achtergrondstraling niet kan worden verklaard als een som van zwakke bronnen. Integendeel, er is maar één bron, en dat is het heelal zelf. De thermische straling van het heelal zelf is een belangrijk argument voor de oerknaltheorie.



**FIGUUR 1.11** Een kaart van de hemel bij 1 mm, opgemeten met de satelliet COBE (NASA). Bij deze golflengte is de hemel vol van een vrijwel homogene gloed, die niet veroorzaakt is door een superpositie van individuele puntbronnen, maar door één bron zelf, het heelal. De straling noemt men dan ook de kosmologische achtergrondstraling. Ze vertoont een geringe dipool-anisotropie; de kleurschakeringen op de figuur geven een contrast weer dat slechts van de orde van 0.01 % is. Deze anisotropie is een dopplereffect, als gevolg van onze lokale beweging ten opzichte van de achtergrond. Het spectrum van de achtergrond is dat van een zwarte straler met een temperatuur van 2.74 K. In het evenaarsvlak ziet men ook enige straling van onze eigen Melkweg. Meer uitleg volgt in Hoofdstuk 6.