

**J.W. van Holten**

# Kosmologie *een geschiedenis van licht en donker*

**Kosmologie**  
*een geschiedenis*  
*van licht en donker*

J.W. van Holten



# Colophon

## Nikhef

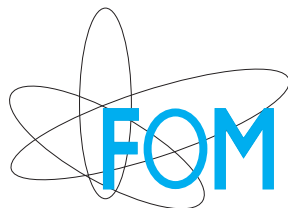
Nationaal instituut voor subatomaire fysica  
National Institute for Subatomic Physics

### Visiting address

Science Park 105  
1098 XG Amsterdam  
The Netherlands

Telephone: +31 (0)20 592 2000  
Fax: +31 (0)20 592 5155  
E-mail: [info@nikhef.nl](mailto:info@nikhef.nl)  
URL: <http://www.nikhef.nl>

Layout: Kees Huyser



Nikhef is the National institute for subatomic physics in the Netherlands, in which the Foundation for Fundamental Research on Matter (FOM), the Universiteit van Amsterdam (UvA), the Vrije Universiteit Amsterdam (VU), the Radboud Universiteit Nijmegen (RU) and the Universiteit Utrecht (UU) collaborate. Nikhef co-ordinates and supports activities in experimental and theoretical particle and astro-particle physics in the Netherlands.

Nikhef participates in the preparation of experiments at the Large Hadron Collider at CERN, notably ATLAS, LHCb and ALICE. Astroparticle physics activities at Nikhef are threefold: the ANTARES neutrino telescope in the Mediterranean Sea; the AUGER cosmic ray observatory in Argentina; and the VIRGO gravitational wave interferometer in Italy. Detector R&D, design and construction of detectors and the data analysis take place at the laboratory located at Science Park Amsterdam as well as at the participating universities. Nikhef has a theory group with both its own research programme and close contacts with the experimental groups.

# De studie van de kosmos

Kosmologie is de tak van wetenschap die zich bezighoudt met de structuur en evolutie van de kosmos als geheel. De kosmologie ligt op het snijvlak van de natuurkunde en sterrenkunde, en beschikt heden ten dage over een indrukwekkende hoeveelheid waarnemingen en gegevens, waaruit ze haar inzichten put en waaraan ze haar theorieën toetst.

De kosmologie kent wel een aantal praktische beperkingen die inherent zijn aan het onderwerp. De eerste beperking is het gevolg van de eindige lichtsnelheid:  $c = 300.000 \text{ km/sec}$ , en de eindige levensduur van het zichtbare heelal: 13,7 miljard jaar. In die tijd heeft het licht slechts een eindige afstand kunnen afleggen, zodat licht van al te verre objecten ons niet of nog niet heeft kunnen bereiken. We zien dus maar een deel van het totale heelal, en kunnen geen zekere uitspraken doen over wat daarbuiten ligt. Bovendien kunnen we geen licht ontvangen uit de periode voordat het heelal transparant werd, wat ook de tijd tot wanneer we kunnen terugkijken beperkt.

Een tweede beperking heeft te maken met onze instrumenten van waarneming: telescopen, radiotelescopen of Röntgenapparatuur maken alle gebruik van elektromagnetische straling om een beeld te vormen van de kosmos. Het belangrijkste verschil zit in de golflengte waarbij we ze waarnemen, van meters tot duizendsten van nanometers of nog korter. Er zijn echter ook vormen van materie en energie die niet gevoelig zijn voor licht of andere elektromagnetische straling, en die zelf zulke straling ook niet kunnen uitzenden. Het is niet eenvoudig om greep op zulke onzichtbare materie of energie te krijgen, maar we hebben sterke vermoedens dat er heel veel van is.

Ideeën over de aard en vorm van de kosmos zijn er geweest sinds mensenheugenis, en vormen een bestanddeel van de meeste godsdiensten en wereldbeschouwingen. Het is echter pas relatief kort geleden een onderwerp van nauwkeurig wetenschappelijk onderzoek geworden. Wat dat heeft opgeleverd wordt in dit verhaal uiteengezet.

# De samenstelling van het heelal

Ons heelal is samengesteld uit een groot aantal bestanddelen. Verschillende soorten materie, waaronder de scheikundige elementen, maar ook neutrino's en andere onzichtbare vormen van massa, behoren tot de belangrijkste ingrediënten. Daarnaast is er een verscheidenheid aan straling, waaronder de kosmische microgolfstraling die in intensiteit alle andere vormen van straling overtreft. Ook uitgestrekte magneetvelden in en tussen de melkwegstelsels spelen een rol, die echter tot heden nogal onbelicht is gebleven. Maar een belangrijke plaats is vooral weggelegd voor ruimte en tijd zelf, die meer zijn dan een toneel waarop de evolutie van het heelal zich afspeelt; ruimte en tijd blijken zelf dynamisch, en staan in wisselwerking met alles wat energie heeft, zowel straling als materie. De meetkunde van het heelal bepaalt niet alleen hoe materie en straling bewegen, maar afstanden en tijdsverschillen tussen verschillende gebeurtenissen zijn zelf ook afhankelijk van de aanwezigheid en de beweging of stroming van massa en energie. De wiskundige beschrijving van het gedrag van ruimte en tijd, en de invloed van materie en straling daarop, is het onderwerp van de algemene relativiteitstheorie; deze theorie werd in 1915 voor het eerst geformuleerd door Albert Einstein.

## Materie

### De elementen

Onder materie verstaan we hier alles wat massa heeft. Daaronder vallen natuurlijk alle scheikundige elementen, van waterstof tot uranium. De kleinste hoeveelheid van een element is een atoom, opgebouwd uit een positief geladen kern met daaromheen een schil van negatief geladen elektronen. De scheikundige eigenschappen van een atoom worden vooral door het aantal en de beweging van de elektronen bepaald. De totale massa van het atoom is echter vrijwel geheel geconcentreerd in de kern. Daar vinden we protonen en neutronen, elk ruim 1800 keer zo zwaar als een elektron. Protonen en neutronen behoren tot de klasse van kerndeeltjes die *baryonen* genoemd worden. Daarom worden de scheikundige elementen vaak gezamenlijk aangeduid als de baryonische materie.

Het lichtste element is waterstof, met een kern bestaande uit slechts één proton, begeleid door een enkel elektron. Daarna komt helium, met een kern van twee protonen en twee neutronen, waaromheen twee elektronen cirkelen. Ruim 99% van de baryonische materie in het heelal bestaat uit deze twee elementen. De zwaardere elementen, zoals koolstof, zuurstof en ijzer, vertegenwoordigen samen minder dan 1% van de baryonische massa in het heelal.

De baryonische materie is voornamelijk te vinden in gaswolken en sterren, als onderdeel van melkwegstelsels. In een typisch melkwegstelsel bevinden zich zo'n 100 tot 1000 miljard sterren, voor het grootste deel geconcentreerd in een min of meer bolvormig centrum, met in veel gevallen daaromheen een uitgestrekte schijf in de vorm van spiraalarmen; een voorbeeld is het melkwegstelsel NGC3198 afgebeeld op de titelpagina. De melkwegstelsels zelf zijn gegroepeerd in clusters, groepen van enige honderden of duizenden stelsels die door de onderlinge aantrekking van de zwaartekracht bij elkaar blijven. In die clusters bevinden zich nog aanzienlijke hoeveelheden waterstof en heliumgas tussen de melkwegstelsels, de intergalactische materie. Maar buiten de clusters zijn er grote gebieden waarin in het geheel geen materie te vinden is. Deze lege ruimten —voids in het engels— zijn zo uitgestrekt, dat de gemiddelde dichtheid van baryonische materie in het heelal slechts twee à drie baryonen per tien kubieke meter bedraagt. Om een idee te geven hoe weinig dit is: een liter gewone lucht zou over een volume van honderdduizend bij honderdduizend bij honderdduizend kilometer moeten worden verspreid om een vergelijkbare dichtheid te bereiken.

Omdat er ter plekke geen stervorming plaats heeft, bezitten de intergalactische gaswolken nog hun oorspronkelijk samenstelling. Analyse van de spectraallijnen van deze wolken leert ons dat 75 procent van de oorspronkelijke baryonische massa bestaat uit waterstof, en bijna 25 procent uit helium. Er zijn slechts sporen van andere lichte elementen, zoals lithium, te vinden, en in het geheel geen zwaardere elementen. De zware elementen zijn in de loop van de evolutie van het heelal gevormd in het binnenste van sterren, waar kernfusie plaats heeft. Hier wordt waterstof verbrand tot helium, en als de ster massief genoeg is helium tot koolstof, zuurstof en zwaardere elementen, tot ijzer aan toe. Sterren zijn de ovens waarin de natuur de zware elementen smeedt die niet in de oerknal gevormd konden worden. Sommige zeer massieve sterren beëindigen hun levensloop met een thermonucleaire explosie, een supernova, waarbij een groot deel van hun materie de ruimte ingeslingerd wordt. Zo komen de zwaardere elementen uiteindelijk in melkwegstelsels vrij, en kunnen dan dienen als bouw materiaal voor nieuwe sterren, planeten of uitgestrekte stofwolken. In melkwegstelsels komen naar verhouding dan ook iets meer zware elementen voor dan in de kosmos als geheel: ongeveer drie procent van hun baryonische massa wordt gevormd door elementen zwaarder dan helium.

## Neutrino's

Het neutrino is het lichte en ongeladen broertje van het elektron, een verwantschap vergelijkbaar met die tussen het proton en het neutron. Alleen zijn neutrino's nog veel lichter dan elektronen: hun precieze massa is niet bekend, maar in iedere geval niet

meer dan een miljoenste van de elektronmassa. Die massa is zo klein, dat neutrino's vrijwel altijd met snelheden in de buurt van de lichtsnelheid bewegen. Omdat ze geen elektrische lading bezitten, zijn ze ook niet gevoelig voor elektrische en magnetische velden, worden ze niet vastgehouden door atoomkernen en kunnen ze ongehinderd door het heelal reizen.

Neutrino's worden geproduceerd bij radioactieve processen, met name bij het verval van het neutron. Een vrij neutron is namelijk niet stabiel: het valt gemiddeld na bijna een kwartier uiteen in een proton, een elektron en een neutrino. Wanneer een neutron gebonden is in de atoomkern van een stabiel element, zoals helium met twee protonen en twee neutronen, dan kan dit proces echter niet optreden. Daarom kennen we het neutron in de natuur alleen als onderdeel van atoomkernen, en niet als vrij element.

Gedurende de eerste minuten van het heelal konden neutronen echter wel in grote aantallen vrij voorkomen; de temperaturen waren zeer hoog en onder andere in botsingen van protonen en elektronen konden neutronen en neutrino's worden gemaakt:

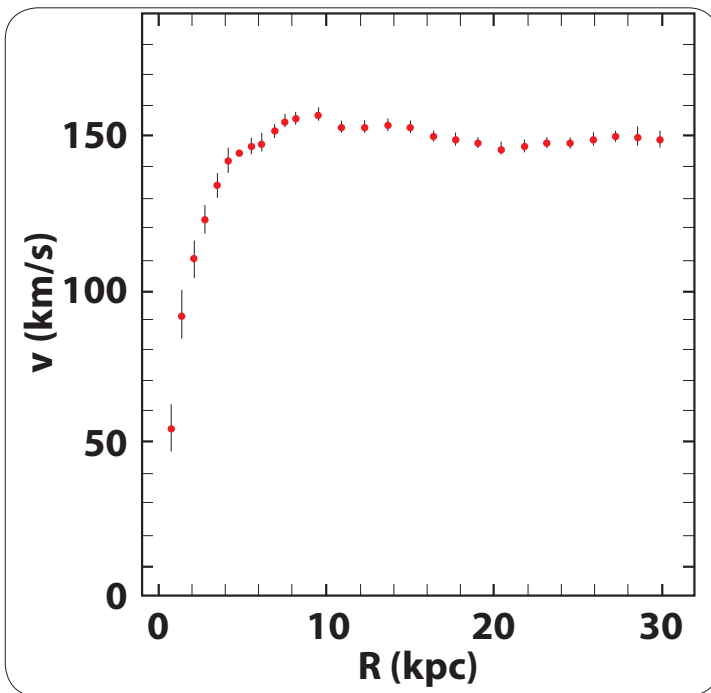


Het verval van deze neutronen was in het begin zo'n langzaam proces, dat er voortdurend nieuwe konden worden gevormd voordat de oude weg waren. De bijbehorende neutrino's zijn waarschijnlijk nog altijd in het heelal aanwezig. Het is alleen bijkans onmogelijk ze waar te nemen: ze reageren niet op licht, radiogolven of andere vormen van elektromagnetische straling. Hun aanwezigheid zou alleen kunnen blijken uit secundaire effecten, zoals botsingen met hoogenergetische protonen en elektronen in het heelal.

Een andere bron van neutrino's zijn supernova's: bij de thermonucleaire explosie waarmee een supernova gepaard gaat worden zeer grote aantallen neutrino's geproduceerd. Deze zijn in 1987 voor het eerst daadwerkelijk waargenomen, afkomstig van een supernova in de Grote Magalhãese Wolk op niet al te grote afstand van ons eigen melkwegstelsel.

### *Donkere materie*

Neutrino's zijn onzichtbaar omdat ze geen elektrische lading dragen, en dus ook geen licht kunnen uitzenden of verstrooien. Er zouden meer soorten materie kunnen zijn met deze eigenschap. Daar bestaan verschillende sterke aanwijzingen voor. De eerste aanwijzing kwam uit de bepaling van de omloopsnelheid van sterren in het buitengebied



Figuur 1. Snelheidsverdeling van sterren in het melkwegstelsel NGC3198.

van melkwegstelsels. Deze sterren draaien op afstand om het bolvormig centrum waar het grootste deel van de sterren zich bevindt; die beweging is vergelijkbaar met de manier waarop de planeten om de zon draaien. Van de planeten weten we dat hun omloopsnelheid naar buiten toe afneemt: Mars beweegt langzamer dan de aarde, en Jupiter weer langzamer dan Mars. Kepler ontdekte dat de omloopsnelheid van een planeet in een cirkelvormige baan afneemt met de wortel uit de afstand tot de zon; als  $v$  de snelheid is en  $R$  de afstand tot de zon, dan zegt Kepler's wet dat

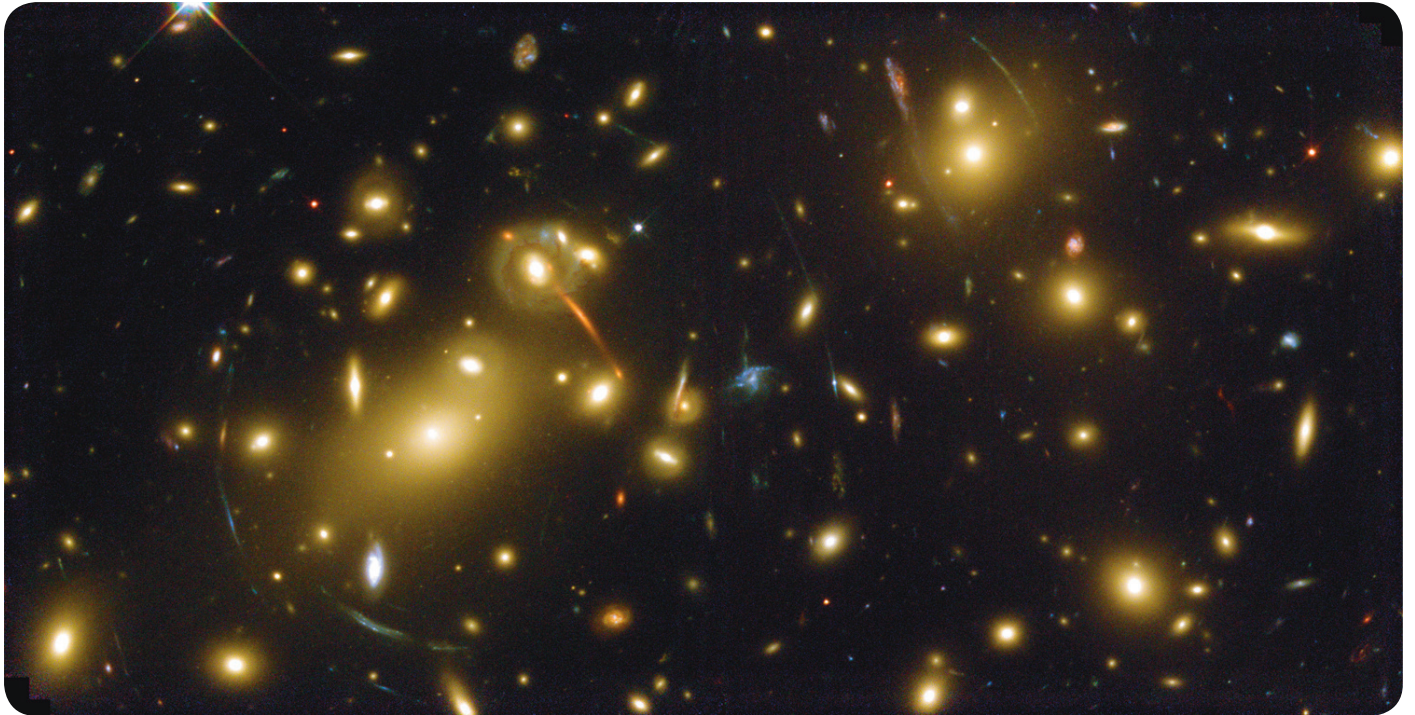
$$v \sim \frac{1}{\sqrt{R}}.$$

Zoals blijkt uit fig. 1 is de snelheid van de buitenste sterren van het melkwegstelsel NGC3198 (te zien op het titelblad) vrijwel onafhankelijk van hun afstand tot het centrum. Dat geldt ook voor andere soortgelijke sterrenstelsels. Daaruit volgt dat de zwaartekracht die hun baan bepaalt sterker is dan je op grond van de massa van de sterren in het centrum zou verwachten.

Dat zou kunnen betekenen dat de wet van Newton niet meer geldt over zulke grote afstanden, maar daarvoor bestaat geen enkele andere aanwijzing. Een betere verklaring is, dat er in melkwegstelsels meer massa zit dan je uit het aantal en de verdeling van sterren zou afleiden. Deze massa moet dan wel veel groter zijn dan de massa van de zichtbare materie: ongeveer vijf keer zo veel, en ook over een groter gebied verdeeld zijn: minstens tot aan de rand van het zichtbare deel van de schijf.

Een tweede aanwijzing voor het bestaan van donkere materie in en tussen melkwegstelsels volgt uit metingen van het gravitatielenseffect. Het gravitatielenseffect is het gevolg van de afbuiging van licht in het zwaartekrachtveld van een grote massa zoals dat van de zon. Deze afbuiging werd voorspeld door Einstein op grond van zijn algemene relati-





*Figuur 2. Gravitationeel lenseffect door de cluster Abell 2218.*

viteitstheorie, en in 1919 voor het eerst waargenomen door Eddington. Hij observeerde hoe tijdens een zonsverduistering sterren die al achter de verduisterde zon verdwenen hadden moeten zijn, toch nog zichtbaar waren. Volgens de algemene relativiteitstheorie is de ruimte rond de zon gekromd, en volgt licht daarom geen recht pad. In zekere zin wordt licht door de zon aangetrokken, net als de planeten die hun banen rond de zon volgen. Dat is wat Eddington waarnam. Hetzelfde principe zorgt ervoor, dat het licht van verre sterren of sterrenstelsels onderweg kan worden afgebogen door massa's die tussen de bron en de waarnemer liggen. Zo'n massa werkt dan als een soort lens, die het licht afbuigt en het beeld vervormt. Voor het licht van de verste waarneembare sterrenstelsels kunnen hele clusters van tussenliggende melkwegstelsels als lens fungeren. Fig. 2 toont het lenseffect van de cluster Abell 2218.

Uit de mate van afbuiging kan dan worden afgeleid hoe groot de massa van zo'n cluster is. Als je dat vergelijkt met de totale lichtkracht van de melkwegstelsels —een maat voor het aantal daarin voorkomende sterren— dan blijkt de massa opnieuw een factor vijf tot tien groter te zijn dan je kunt verklaren op grond van de hoeveelheid baryonische materie.

Het ligt voor de hand te vragen of deze donkere materie kan bestaan uit neutrino's. Dat is echter niet het geval, omdat de massa van neutrino's zo klein is: minder dan een miljardste van de massa van protonen. Het lijkt er dus op dat het gaat om een nieuwe vorm van materie die tot nu toe onbekend is. Mogelijk kan zo'n vorm van materie ontdekt worden in experimenten met deeltjesversnellers zoals de LHC van het CERN in Genève.

## Straling

Onder straling verstaan we hier alle vormen van elektromagnetische golven, van radio tot licht en gammastraling. Zulke straling ontstaat door de beweging van geladen deeltjes zoals elektronen en protonen. Omgekeerd kunnen geladen deeltjes ook energie opnemen uit straling; bij de afgifte van energie wordt de straling verstrooid.

Op microscopisch niveau bestaat straling uit lichtquanta, of *fotonen*. De energie van een foton is omgekeerd evenredig met de golflengte. Voor zichtbaar licht, met golflengten van enige honderden nanometers, is de energie per foton van de orde van tien elektronvolt (10 eV); voor gammastraling is dit typisch honderduizend keer meer, en voor microgolfstraling, met een golflengte in het centimetergebied, honderdduizend keer minder.

Het zichtbare licht in het heelal is afkomstig van hete gassen en plasma's van geladen deeltjes, vooral van sterren zoals de zon. De kleur van dit licht wordt bepaald door de temperatuur van de ster. Bij iedere temperatuur hoort een brede verdeling van golflengten, maar de golflengte van de meest intense straling wordt korter naarmate de temperatuur hoger wordt. Dat betekent, dat fotonen bij hoge temperatuur gemiddeld meer energie hebben dan bij lage temperatuur.

Verreweg de meeste fotonen in het heelal hebben echter geen energie in het bereik van zichtbaar licht, maar behoren tot de kosmische achtergrondstraling met golflengten in het centimetergebied: microgolven. De kosmische achtergrondstraling is een universele ruis die uit alle richtingen met gelijke intensiteit op ons af komt. Deze straling heeft een karakteristieke temperatuur van 2,73 K, vlak boven het absolute nulpunt.

De oorsprong van deze achtergrondstraling ligt in het vroege heelal, toen het veel warmer was dan nu. Lang voor de eerste sterren geboren werden was er een periode waarin de temperatuur in het heelal ruim boven 3000 K lag, en waterstof permanent geïoniseerd bleef. Bijgevolg was het heelal gevuld met een plasma van geladen deeltjes, elektronen

en protonen, en heel veel fotonen. Die fotonen werden voortdurend verstrooid, zodat het plasma leek op een soort mist waarin straling niet ver kon doordringen. Toen de temperatuur daalde vonden elektronen en protonen elkaar en vormden neutraal waterstof. Vanaf dat ogenblik kon straling ongehinderd over grote afstanden door het heelal reizen. Dat de temperatuur van die straling nu is afgekoeld tot minder dan 3 K is het gevolg van de universele uitdijning van het heelal, waar we nu wat meer over moeten zeggen.

### *Ruimte en tijd*

Zoals je geen muziek kunt maken zonder geluid, kun je geen kosmos maken zonder ruimte en tijd. De meetkundige eigenschappen van de ruimte hoeven echter niet noodzakelijk die van de vlakke meetkunde te zijn. Het is bijvoorbeeld voorstelbaar dat onze ruimte meer gemeen heeft met een boloppervlak, waarop je eeuwig kunt rondreizen zonder ooit een grens tegen te komen, maar dat toch eindige afmetingen heeft in alle richtingen. Ook is het mogelijk dat de meetkundige eigenschappen in de tijd veranderen.

Welke meetkundige eigenschappen ons heelal heeft, kunnen we in principe eenvoudig onderzoeken; zoals Euklides liet zien, tellen de hoeken van een vlakke driehoek op tot  $180^\circ$ . Het is niet moeilijk na te gaan, dat dit op een boloppervlak anders is: daar tellen de hoeken van een driehoek op tot meer dan  $180^\circ$ . Denk maar aan een driehoek gevormd door twee meridianen en de evenaar. Er zijn ook oppervlakken, zoals dat van een zadel, waarin de hoeken van een driehoek optellen tot minder dan  $180^\circ$ . Door nauwkeurige driehoeksmetingen te doen in het heelal kunnen we vaststellen welke meetkundige eigenschappen de kosmos heeft. Voor zover we tot nu toe hebben kunnen nagaan is de ruimte over grote afstanden gemeten vlak, maar verder onderzoek blijft geboden.

De algemene relativiteitstheorie leert dat ruimte en tijd dynamisch zijn, en dat afstanden en tijden worden beïnvloed door de aanwezigheid van materie, straling en eventuele andere vormen van energie. Voor het heelal als geheel leidt dit ertoe dat het heelal een universele uitdijning ondergaat, met een snelheid die afhangt van de aanwezige massa, de temperatuur van de straling, en wat er verder nog in het heelal aanwezig is.

Hoe moeten we ons die uitdijning voorstellen? Anders dan bij de ontploffing van een bom, waarbij er een duidelijk beginpunt is en de scherven alle uit één centrum komen, zwelt het heelal overal gelijkmatig op. De onderlinge afstanden tussen clusters van sterrenstelsels nemen allemaal tegelijk toe, zonder dat de clusters feitelijk van plaats veranderen. Een toepasselijk beeld is dat van rijzend deeg: als er in het deeg rozijnen zitten, zal

tijdens het rijzen de afstand tussen de rozijnen toenemen zonder dat de rozijnen ten opzichte van het deeg bewegen, en zonder dat de rozijnen zelf opzwellen. Tijdens dit opzwellen blijft een vlakke driehoek een vlakke driehoek, zelfs als de afstanden tussen de hoekpunten (b.v. drie rozijnen) veranderen.

Het is ook niet nodig je een omringende ruimte voor te stellen waarin het heelal uitdijt, zoals een ballon tijdens het opblazen een groter deel van de ruimte in een kamer inneemt. De kracht die de ballon doet opzwellen is het verschil in luchtdruk binnen en buiten de ballon, en dus is het van wezenlijk belang dat er een binnen en een buiten is. Maar de kracht die het heelal doet opzwellen komt van binnenuit, niet van buiten.

Toch wordt er onder kosmologen en natuurkundigen wel degelijk nagedacht over de mogelijkheid van extra dimensies: een wereld met vier, vijf of zelfs negen ruimtelijke dimensies, waarvan ons heelal een drie-dimensionale doorsnede is. Meestal wordt dan echter gedacht dat de overige dimensies zich slechts over submicroscopische afstanden uitstrekken, zodat ze voor ons onzichtbaar zijn; dit is zelfs letterlijk zo: de afmetingen in de extra dimensies zijn veel kleiner dan de golflengte van zichtbaar licht, en dat kan zich dus niet in deze extra ruimtelijke richtingen voortplanten. Zulke extra dimensies zouden ook niet meedoen met de universele uitdijning van onze drie dimensies. Als ze al een rol spelen in de ontwikkeling van het heelal dat wij waarnemen, dan alleen in de allereerste fractie van een seconde in de geschiedenis ervan.

# Afstandbepalingen

Om de structuur van het heelal in kaart te kunnen brengen is het belangrijk om afstanden te kunnen bepalen. Er is niet een enkele methode om dat te doen die over alle afstandsschalen werkt. De verschillende methoden die we zullen bespreken vormen een soort kosmische ladder: de eerste sport wordt gevormd door sterren in onze omgeving, waarvan we de afstand direct kunnen bepalen. De tweede sport bestaat uit sterren die specifieke eigenschappen hebben die we kunnen herkennen aan de intensiteit en de kleur van het licht dat ze uitstralen. Als je van een aantal sterren van zo'n type de afstand direct kunt meten, kun je van verderweg gelegen sterren de afstand schatten door hun helderheid te vergelijken met die van soortgelijke sterren op bekende afstand. Een derde sport op de ladder wordt gevormd door verre objecten waarvan de roodverschuiving kan worden gemeten: een verandering in de kleur van hun licht die samenhangt met hun afstand. We zullen een paar van deze methoden nu in wat meer detail beschrijven.

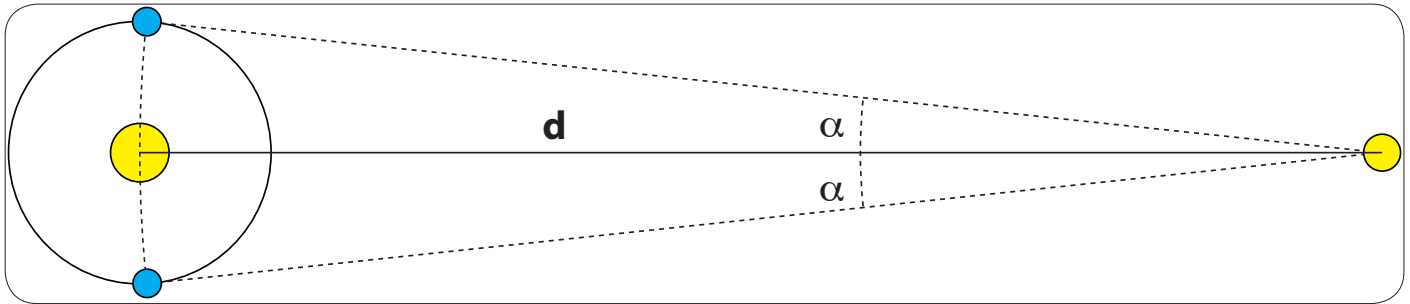
## Parallaxmetingen

Afstandsbepalingen zijn het eenvoudigst in onze directe omgeving, dat wil zeggen in ons deel van de Melkweg. De afstand tot sterren die niet te ver weg staan volgt namelijk gewoon uit driehoeksmeting.

De basis van deze methode is het kennen van de afstand van de aarde tot de zon, en het meten van de positie van de ster aan de hemel op twee tijden met ongeveer een half jaar tussenpauze, zoals weergegeven in fig. 3. Vanuit twee tegenovergelegen punten in de baan om de zon zie je de ster vanaf de aarde onder een iets verschillende hoek. Uit deze hoek  $\alpha$  (de parallax) en de afstand aarde-zon volgt de afstand  $d$  van de ster tot de zon. De astronomische afstandsmaat *parsec* is op deze methode gebaseerd: 1 parsec is de afstand tot een ster met een parallax van 1 boogseconde; deze afstand komt overeen met 3,26 lichtjaar.

## Variabele sterren

Een tweede methode om afstanden te bepalen gebruikt sterren met variabele lichtkracht, waarvan de absolute helderheid bekend is. Een bekende klasse van zulke sterren wordt gevormd door de Cepheiden, die regelmatig in helderheid toenemen en afnemen. De periode tussen twee tijdstippen van maximale helderheid varieert van ster tot ster, maar heeft een statistisch sterk verband met de intrinsieke lichtkracht: hoe langer de periode, hoe helderder de ster is op het maximum. Dit verband werd in het begin van de 20e eeuw ontdekt door Henriette Leavitt, verbonden aan de sterrenwacht van Harvard,



Figuur 3 Afstandsbepaling uit parallaxmeting.

die een aantal Cepheiden bestudeerde die zo dichtbij staan, dat hun afstand door parallaxbepaling kon worden gevonden. Als je weet hoe de periode en de absolute helderheid van een variabele ster samenhangen, kun je uit de waargenomen periode en de schijnbare helderheid op het maximum de afstand afleiden. Het verband tussen afstand en helderheid wordt voor de geïnteresseerde lezer besproken in aanhangsel A.

In 1923 ontdekte Edwin Hubble, ook verbonden aan de sterrenwacht van Harvard, dat er in de Andromedanevel Cepheiden voorkomen, en dat deze op veel grotere afstand staan dan de afmetingen van ons melkwegstelsel: ruim 700 kpc (kiloparsec), ongeveer 2.500.000 lichtjaar; de diameter van ons eigen melkwegstelsel is ongeveer 30 kpc. Hubble's ontdekking was het eerste duidelijke bewijs voor het bestaan van sterrenstelsels buiten het onze. Inmiddels weten we dat er in het deel van het heelal dat we kunnen waarnemen honderden miljoenen sterrenstelsels zijn, met gemiddeld tussen de honderd- en duizendmiljard sterren per stelsel.

Een andere klasse variabele sterren die we kunnen gebruiken om afstanden te bepalen wordt gevormd door supernova's, in het bijzonder supernova's van het type dat bekend staat als Ia. Supernova's zijn massieve sterren die aan hun eind komen door een groot-schalige thermonucleaire explosie of implosie. Bij type Ia supernova's gaat het om een compacte oude ster, een witte dwerg, die een dubbelstersysteem vormt met een gewone ster. Door zijn relatief sterk zwaartekrachtsveld trekt de witte dwergster materie van zijn begeleider af, wat de witte dwerg langzaam in massa doet toenemen. Als deze massa bijna 1,4 keer de massa van de zon bedraagt, wordt de dwergster instabiel en ontstaat er een kernfusiereactie die de ster uiteen doet spatten. De ster kan daarbij in korte tijd bijna even helder worden als een heel melkwegstelsel.

Van type Ia supernova's is bekend dat er een goed statistisch verband bestaat tussen hun maximale helderheid en de tijd die verstrijkt tot ze nog de helft van die maximale

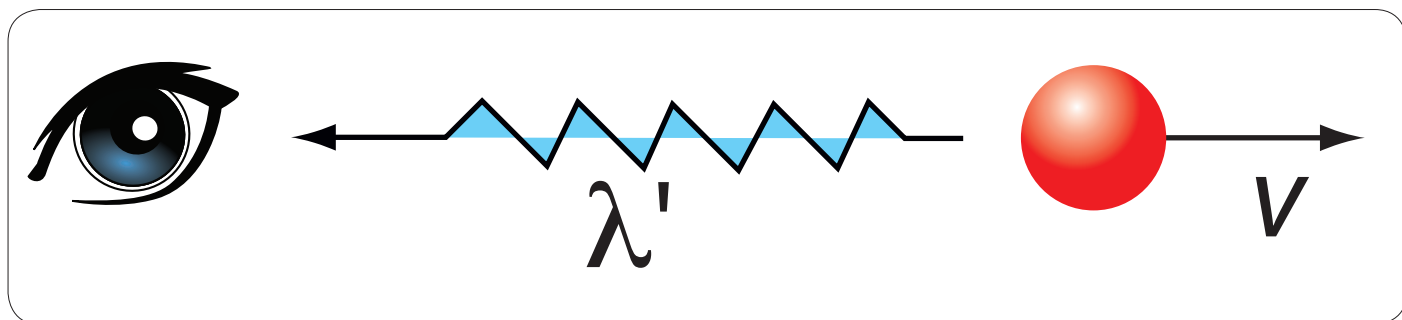
lichtkracht over hebben, typisch enige dagen tot weken. Door dat tijdsverloop te meten kunnen we dus hun absolute maximale helderheid afleiden; vergelijking daarvan met de op aarde gemeten schijnbare helderheid levert dan hun afstand, op dezelfde manier als voor Cepheiden. Door hun grote maximale helderheid, van de orde van die van honderdmiljoen gewone sterren, zijn supernova's van verre zichtbaar. Dat maakt ze heel geschikt als kosmische mijlpalen om grote afstanden in het heelal te markeren.

### Roodverschuiving

Wanneer een lichtbron ten opzichte van een waarnemer beweegt zal de waargenomen kleur van het licht veranderen. Beweegt de bron naar de waarnemer toe, dan wordt de golflengte korter en het licht blauwer; beweegt de bron van de waarnemer af, dan wordt de golflengte juist langer en het licht roder. Zo'n verandering van golflengte treedt niet alleen op bij licht, maar ook bij geluid en staat bekend als het Dopplereffect.

Edwin Hubble voerde in de jaren '20 van de vorige eeuw een systematische studie van door hem waargenomen melkwegstelsels uit. Hij ontdekte op grond van hun roodverschuiving dat deze zich vrijwel allemaal van ons af bewegen, en bovendien dat de roodverschuiving, en dus de snelheid, gemiddeld toeneemt met de afstand. Meer algemeen nemen de afstanden tussen alle melkwegstelsels die niet tot eenzelfde cluster behoren toe, met een snelheid die groter is naarmate de afstand groter is. Hieruit concludeerde Hubble dat het heelal niet statisch is, maar gelijkmatig uitdijt in alle richtingen.

Zolang de snelheden klein zijn in vergelijking met de lichtsnelheid is de verandering in de waargenomen golflengte van het licht evenredig met de snelheid van de bron. Als een lichtbron wanneer hij stil staat licht uitzendt met golflengte  $\lambda$ , dan is de golflengte  $\lambda'$  van dezelfde bron, wanneer die met snelheid  $v$  van de waarnemer af beweegt, langer; dit is weergegeven in fig. 4.



Figuur 4. Dopplereffect voor licht.

De verandering van de golflengte (de relatieve verandering in  $\lambda$ ) staat bekend als de roodverschuivingsparameter  $z$ ; zolang deze klein is geldt

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = 1 + z \approx 1 + \frac{v}{c},$$

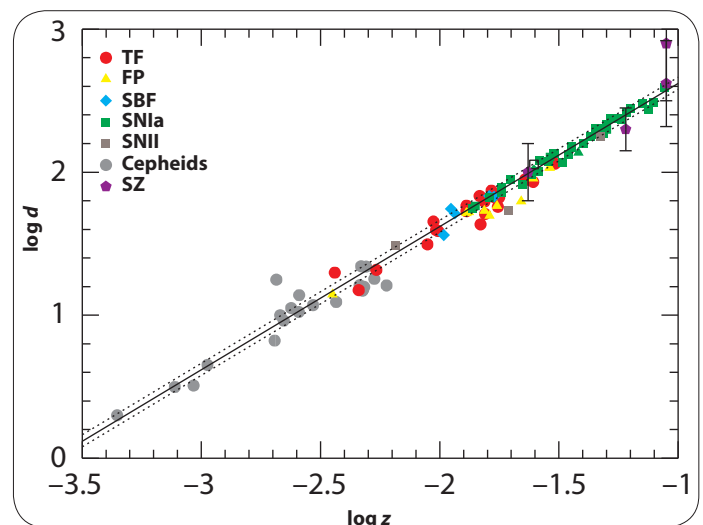
waarin  $c$  staat voor de lichtsnelheid. Dus de roodverschuiving  $z$  is nul als de bron stil staat, en in eerste benadering gelijk aan  $v/c$  als hij beweegt.

In fig. 5 is van een aantal heldere objecten in andere melkwegstelsels, zoals supernova's, de roodverschuiving  $z = v/c \leq 0,1$ , afgezet tegen hun geschatte afstand  $d$  (in megaparsec). Uit deze gegevens blijkt dat de snelheid en de afstand rechteenredig zijn, met een vaste verhouding

$$H_0 = \frac{v}{d} = 72 \pm 8 \text{ km/sec/Mpc.}$$

bekend als de Hubble constante. Dit betekent dat melkwegstelsels bij toenemende afstand met toenemende snelheid van ons af bewegen: iedere megaparsec dat een melkwegstelsel verder weg staat neemt de vluchtsnelheid met gemiddeld 72 km/sec toe.

Als de waarde van de Hubble constante bekend is, kan de roodverschuiving van een object (supernova, sterrenstelsel of iets anders) gebruikt worden om de afstand te schatten. Wel geldt daarbij, dat voor grotere afstanden het verband tussen snelheid en roodverschuiving niet meer evenredig is. In werkelijkheid neemt de roodverschuiving  $z$  sneller toe dan de afstand, en wordt  $z$  oneindig als de vluchtsnelheid  $v$  de lichtsnelheid benadert. Objecten die zo ver weg staan dat hun vluchtsnelheid in de buurt van de lichtsnelheid komt kunnen we daarom niet meer zien. De afstand waarbij de vluchtsnelheid gelijk aan de lichtsnelheid is bepaalt de kosmische horizon, waar voorbij we met onze meetinstrumenten geen waarnemingen kunnen doen. De afstand tot de horizon is op dit ogenblik ongeveer 50 miljard lichtjaar. Met de Hubble Telescoop, die aan boord van een satelliet om de aarde cirkelt, heeft men melkwegstelsels kunnen waarnemen met roodverschuivingen  $z$  tot 6 à 7; deze hebben een vluchtsnelheid van ongeveer 95% van de lichtsnelheid.



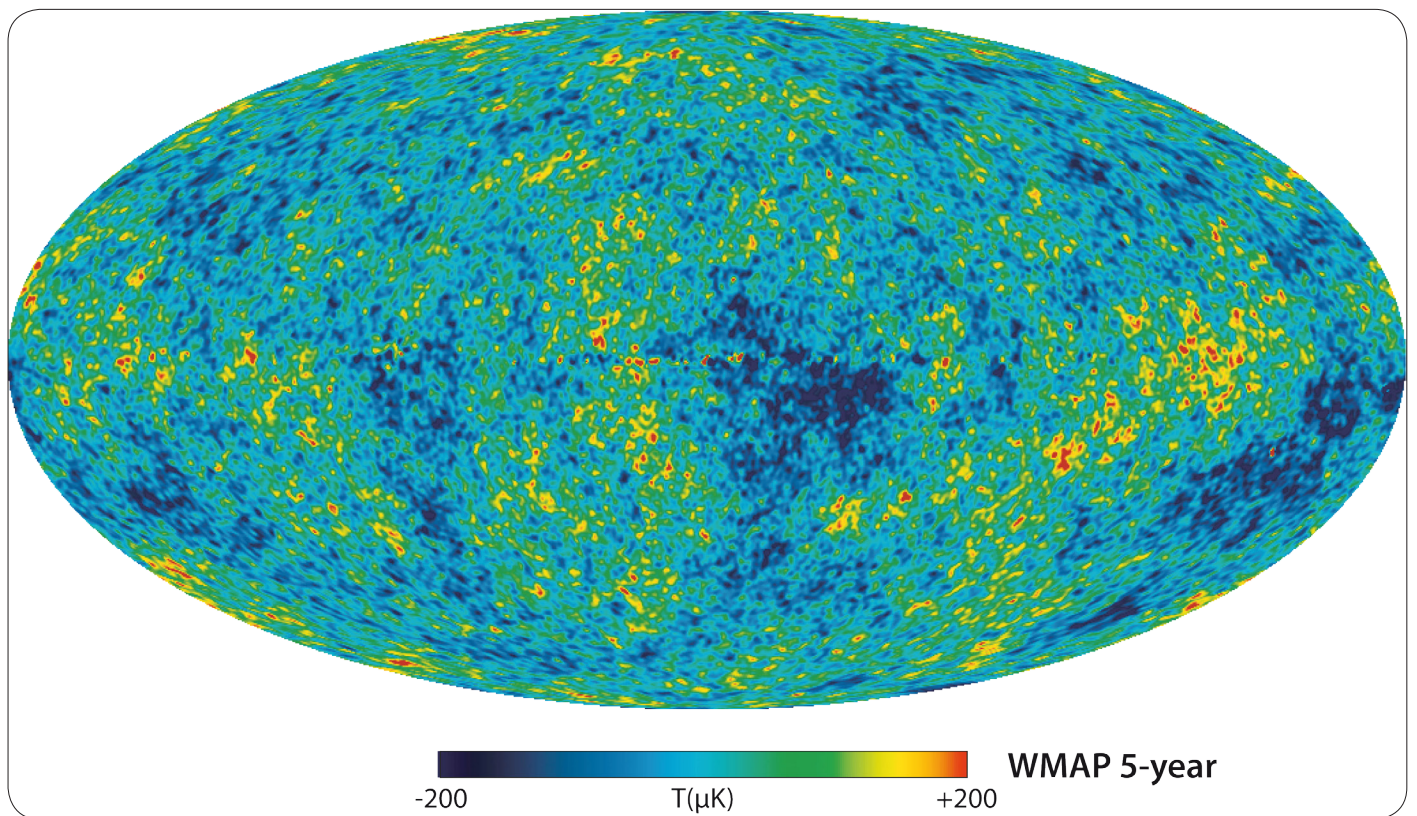
Figuur 5. Roodverschuiving vs. afstand van heldere objecten (supernova's, cepheiden).



# Het uitdijende heelal

Wanneer je vanaf de aarde het heelal in kijkt zie je in verschillende richtingen een verschillende hemel. Niet alleen verschillende sterrenbeelden, maar ook de relatief smalle band van de Melkweg met een enorme concentratie van sterren, en in andere richtingen de nevels en sterrenstelsels zoals de Magalhãese wolken en de Andromedanevel, die ver buiten ons eigen sterrenstelsel liggen. Als je het echter op heel grote schaal bekijkt, dan blijkt het heelal behoorlijk homogeen. Deel je het huidige heelal op in gelijke gebieden van zo'n honderd megaparsec diameter, dan varieert het aantal melkwegstelsels van het ene gebied naar het andere maar heel weinig.

Een nog veel grotere homogeniteit vinden we in de kosmische achtergrondstraling. Deze heeft in alle richtingen een temperatuur van 2,725 K, met variaties van minder dan 0,001 K; zie fig. 6. Daarmee ligt niet alleen de gemiddelde energie van fotonen vast, maar ook hun aantal: ongeveer 410 per kubieke centimeter door het hele heelal, met slechts heel kleine fluctuaties. Het is daarom een goede benadering om het grootschalige heelal te beschrijven als een ruimte gevuld met een homogeen gas of vloeistof, met verscheide-

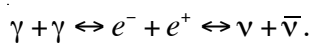


Figuur 6. Temperatuurverdeling van de kosmische achtergrondstraling; de variaties in verschillende richtingen zijn niet groter dan 200  $\mu\text{K}$ .

ne componenten: straling, baryonische materie, neutrino's, enz. Iedere component heeft zijn eigen dichtheid en druk, en een bijbehorende temperatuur.

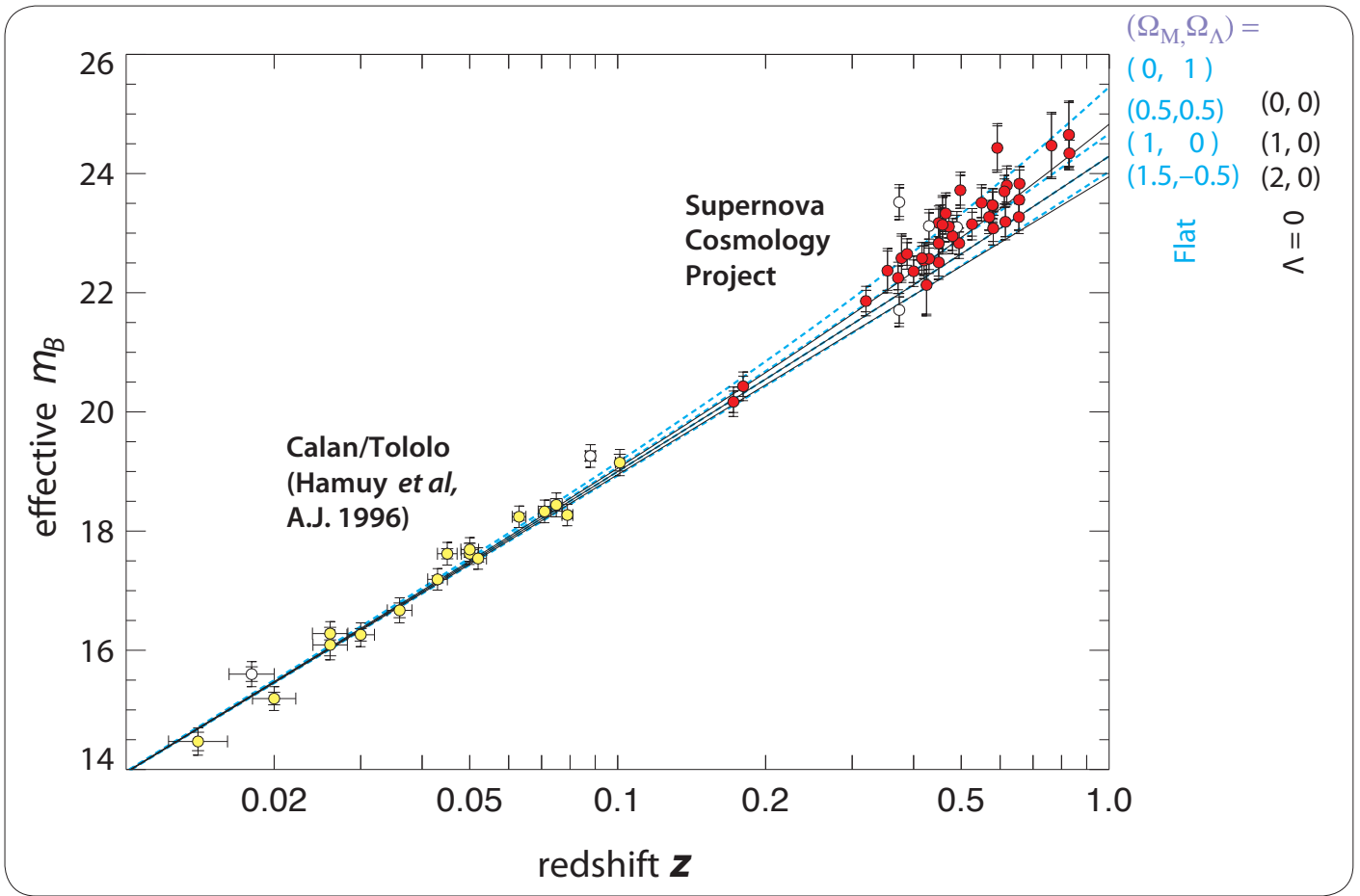
De temperatuur van verschillende componenten kan verschillen, als er onvoldoende wisselwerking tussen de componenten is. Zo kan b.v. de temperatuur van de kosmische achtergrondstraling verschillend zijn van die van de neutrino's, omdat er onder de huidige omstandigheden geen energie en dus geen warmte kan worden uitgewisseld door deze vormen van straling en materie.

In het vroege heelal was dat ongetwijfeld anders. In een veel compacter heelal, met temperaturen boven de  $10^{10}\text{K}$ , is de gemiddelde energie van deeltjes zo groot dat elektronen en positronen (positief geladen anti-elektronen) gemaakt kunnen worden in botsingen tussen fotonen; de elektronen en positronen kunnen weer in neutrino's en anti-neutrino's overgaan:



Daar deze processen op grote schaal voorkwamen was de energie per deeltje, en dus de temperatuur, gemiddeld gelijk voor fotonen, elektronen en neutrino's. Toen de druk en temperatuur door uitdijning van het heelal daalde, ontkoppelden de neutrino's doordat de kans op onderlinge botsingen zo klein werd, dat ze geen  $e^-e^+$ -paren meer konden vormen. Kort daarna konden elektronen en positronen ook niet meer gemaakt worden uit botsingen van fotonen, omdat de gemiddelde energie per foton te klein was geworden. Wel konden positronen en elektronen annihilieren door in twee fotonen over te gaan. Op die manier verdwenen de positronen en de meeste elektronen uit het heelal, terwijl tegelijk het gas van fotonen (de kosmische achtergrondstraling) werd opgewarmd door toevoer van extra hoog-energetische fotonen. Daardoor moet de temperatuur van de kosmische achtergrondstraling iets hoger zijn geworden dan die van de neutrino's, die niet door elektron-positron annihilatie opgewarmd werden.

De uitdijning van het heelal gaat gepaard met een overeenkomstige afname van de druk en temperatuur van de verschillende componenten, en een afname van het aantal deeltjes (protonen, fotonen, neutrino's) per kubieke meter. Daarbij moet de uitdijning arbeid verrichten tegen de onderlinge aantrekking van de verschillende componenten in, waardoor de energiedichtheid van het uitdijende deeltjesgas afneemt en de uitdijning steeds langzamer zou moeten gaan. Om dit te onderzoeken hebben astronomen de roodverschuiving van zeer verre supernova's bestudeerd. Daaruit bleek tot hun verras-



Figuur 7. Roodverschuiving versus schijnbare helderheid van type Ia supernova's.

sing, dat er in de afgelopen 4 miljard jaar geen afname, maar juist een toename van de uitdijingsnelheid is geweest: een kosmische versnelling. Zoals te zien in fig. 7 is de roodverschuiving van verre supernova's namelijk kleiner dan je op grond van hun helderheid zou verwachten in een gelijkmatig uitdijend heelal. Dat betekent, dat ze op het moment van oplichten langzamer van ons af bewogen dan we zouden verwachten als de Hubble constante toen hetzelfde was als nu. Daaruit volgt dat de Hubble constante tegenwoordig groter is dan in het verleden: de snelheid van de uitdijing is toegenomen. Dat is een verbazingwekkende uitkomst. Wat kan de oorzaak zijn van een dergelijke versnelling?

In ieder geval kan het niet het gevolg zijn van enige normale vorm van materie of straling. De druk in een normaal gas of een normale vloeistof, dan wel straling, is positief; bij uitzetting verricht het gas arbeid en neemt de energie per eenheid volume af. Voor het heelal betekent dit, dat het volume steeds langzamer zou groeien. Maar als je een

vloeistof met negatieve druk zou hebben, dan zou de energie in het systeem *toenemen* bij uitzetting; als de druk voldoende negatief is kan de energietoename zelfs zo groot zijn, dat bij uitzetting de energie per eenheid volume (de energiedichtheid) gelijk blijft.

Einstein ontdekte dat hij in de algemene relativiteitstheorie een extra grootheid kon invoeren waarvan het effect op de uitdijing hetzelfde was als dat van zo'n speciale homogene vloeistof met negatieve druk en onveranderlijke energiedichtheid. Einstein noemde deze grootheid de kosmologische constante. Met zo'n kosmologische constante neemt het volume van ieder gebied in het heelal toe met een vaste verdubbelingstijd. Dus na één zo'n periode is het volume verdubbeld, na twee perioden is het volume vier maal zo groot, na drie perioden acht maal zo groot, enz. Het gevolg is een steeds versnelde uitdijing van het heelal. Naarmate de kosmologische constante (de negatieve druk) groter is, is de verdubbelingstijd korter.

De kosmologische constante levert een vaste bijdrage aan de kosmische energiedichtheid, ook in afwezigheid van materie en straling, d.w.z. in een leeg heelal. Daarom spreken natuurkundigen en sterrenkundigen ook meer algemeen over vacuümenergie. Behalve de kosmologische constante zijn er andere vormen van vacuümenergie die het versnelde uitdijen van de kosmos zouden kunnen verklaren; zo kan vacuümenergie geleverd worden door een kosmisch veld, door natuurkundigen *quintessentie* genoemd. Een belangrijk verschil tussen quintessentie en een kosmologische constante is, dat de energiedichtheid van quintessentie niet noodzakelijk constant blijft gedurende de evolutie van het heelal, zodat er een uitgebreidere klasse van kosmische evolutiemodellen ontstaat. Omdat de aard en oorsprong van de vacuümenergie onbekend zijn, en de effecten alleen merkbaar op kosmische schaal, heeft men het in dit verband soms ook over *donkere energie*.

### **Kritische dichtheid**

Uit de studie van de kosmische achtergrondstraling blijkt dat de ruimte in meetkundige zin vlak is; de redenering berust op de interpretatie van de kleine variaties in de temperatuur van de microgolven uit verschillende richtingen. In het plasma van geladen deeltjes en fotonen waaruit die kosmische achtergrondstraling is voortgekomen konden dichtheidsgolven ontstaan, vergelijkbaar met geluidsgolven in lucht. In gebieden met bovengemiddelde dichtheid waren de druk en de temperatuur hoger, en in gebieden met benedengemiddelde dichtheid waren de druk en temperatuur lager. Deze variaties, en de bijbehorende rimpels in de meetkunde van de ruimte, vertaalden zich in variaties in de

dominante golflengte van het licht dat er uit voortkwam. Deze zien we nu als temperatuurfluctuaties in de microgolfachtergrond.

Het uitrekenen van de snelheid waarmee deze golven zich voortplanten is een standaardopgave voor plasmafysici. Als je weet hoe oud het heelal op dat moment was, kun je uitrekenen wat de langste golflengte was die je in het plasma kunt tegenkomen. Dat vertelt je de absolute diameter van de grootste gebieden met verhoogde of verlaagde temperatuur in de achtergrondstraling. Als je ook nog weet hoe lang de straling naar ons onderweg is geweest, dus welke afstand die heeft afgelegd, dan kun je een driehoek construeren met de plasmagolf als basis, en de lichtpaden van de uiteinden naar ons toe als zijden. Wanneer je dat doet voor een groot aantal van die gebieden, dan blijken die driehoeken binnen de meetnauwkeurigheid te voldoen aan de wetten van de vlakke meetkunde. Daaruit volgt dat de ruimte over zeer grote afstanden (miljarden lichtjaren) netto geen kromming vertoont.

Dat is opmerkelijk, omdat afwezigheid van ruimtelijke kromming volgens de algemene relativiteitstheorie alleen mogelijk is bij een zeer specifieke balans tussen energiedichtheid en uitdijingsnelheid. Deze kritische energiedichtheid wordt in termen van de Hubble parameter  $H_0$  en Newton's zwaartekrachtconstante  $G$  gegeven door

$$\varepsilon_c = \frac{3c^2 H_0^2}{8\pi G}.$$

Het is niet moeilijk na te gaan, dat de combinatie  $H_0^2/G$  uitgedrukt wordt in eenheden van massa per volume ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), zodat  $c^2 H_0^2/G$  de dimensie van een energiedichtheid heeft ( $\text{J}/\text{m}^3$ ); het is ook de enige combinatie van  $G$  (de constante van Newton),  $H_0$  (de constante van Hubble) en  $c$  (de lichtsnelheid) die een energiedichtheid oplevert. Wat dan alleen nog verklaard moet worden is de factor  $3/8\pi$  waar je mee moet vermenigvuldigen om de kritische energiedichtheid te krijgen. Een argument gebaseerd op evenwicht tussen de uitdijing en de newtonse zwaartekracht geven we in aanhangsel B.

Nu zijn de waarden van  $G$ ,  $H_0$  en  $c$  alle bekend, dus kunnen we  $\varepsilon_c$  uitrekenen; de kritische energiedichtheid blijkt dan buitengewoon klein:

$$\varepsilon_c = 5,2 \text{ GeV}/\text{m}^3.$$

De energieëenheid GeV (gigaelektronvolt) komt uit de deeltjesfysica, en correspondeert ongeveer met de rustenergie van een proton:  $m_p c^2 = 0,94 \text{ GeV}$ . De kritische energiedicht-

heid wordt dus al bereikt als er iets meer dan vijf protonen per kubieke meter in het heelal zijn. Aangezien er in het heelal ook nog donkere materie, neutrino's, straling en donkere energie aanwezig is, moet het werkelijk aantal protonen in een vlak heelal nog veel lager zijn, ongeveer twintig keer zo klein: twee à drie protonen per tien kubieke meter. De kosmische achtergrondstraling leert ons dus hoe verschrikkelijk leeg het heelal eigenlijk is. De grote lege ruimten tussen clusters van melkwegstelsels (de voids) zijn veel en veel groter dan de ruimte ingenomen door de clusters zelf.

# Verleden en toekomst

## *Het energiebudget van het heelal*

Onze drie-dimensionale ruimte is over kosmische afstanden vlak, en dat kan alleen als het heelal op dit tijdstip, waarop wij het bestuderen, een gemiddelde energiedichtheid heeft van  $5,2 \text{ GeV/m}^3$ . Wat is de bijdrage van de verschillende componenten aan deze energiedichtheid? Deze vraag is het makkelijkst te beantwoorden voor straling. Straling met een temperatuur van  $2,73 \text{ K}$  bestaat uit fotonen met een gemiddelde energie van  $0,6 \text{ meV}$  en een dichtheid van 410 fotonen per kubieke centimeter. Dat levert in totaal  $250 \text{ keV}$  energie per kubieke meter, een twintigduizendste van de kritische energiedichtheid.

Zoals we hierboven hebben gezien is het aantal baryonen per kubieke meter veel kleiner dan het aantal fotonen: er zijn een paar miljard fotonen voor ieder baryon in het heelal. Maar de rustenergie van een proton of neutron is zo groot, dat er veel meer energie zit in baryonen dan in fotonen: de rustenergie van een proton is gelijk aan de energie van ongeveer 1500 miljard microgolf-fotonen. Netto leveren baryonen daarom ongeveer 4% van de kritische energiedichtheid, energie die is opgeslagen in de massa van waterstof en helium in het heelal.

De hoeveelheid donkere materie is nog groter: er is ongeveer vijf keer zo veel donkere massa als baryonische massa; de beste schattingen komen uit op ongeveer 22% van de kritische energiedichtheid in onbekende donkere materie. Dat geeft alles bij elkaar 26% van de kritische energiedichtheid in straling en materie. Daar komen nog neutrino's bij, die echter zo licht zijn, dat zelfs als er evenveel neutrino's zouden zijn als fotonen (een paar honderd per kubieke centimeter), hun bijdrage nog niet veel groter zou zijn dan die van de achtergrondstraling: een fractie van een promille van de kritische energiedichtheid.

Dat laat dan 74% van de kritische energiedichtheid over voor de vacuumenergie, ruim drie maal zoveel als in de vorm van donkere materie. We komen dus tot de verbazingwekkende gevolgtrekking, dat zo'n 96% van het heelal bestaat uit componenten waarvan we geen idee hebben wat het is, behalve dat een kwart ervan massa heeft, en driekwart ervan een niet-materiële energievorm vertegenwoordigt. In het vervolg zullen we zien dat dit niet altijd zo is geweest, en aan de andere kant dat in de toekomst de vacuüm-energie nog belangrijker zal worden.

## De evolutie van het energiebudget

Door het uitdijen van het heelal is de samenstelling ervan in de loop van de tijd veranderd. De verschillende componenten van de kosmos: materie, straling, vacuümenergie, hebben ieder hun eigen evolutie ondergaan. De vacuümenergie gedraagt zich het eenvoudigst: een kosmologische constante levert een vaste energiedichtheid, die in de loop van de tijd niet verandert. Meer dynamische vormen van vacuümenergie, zoals quintessentie, kunnen hooguit heel langzaam in de tijd veranderen, veel langzamer dan de energiedichtheid van andere componenten zoals straling en materie.

Veranderingen in de energiedichtheid van materie zijn ook goed na te gaan zolang de temperatuur niet te hoog is. De temperatuur van een gas is een maat voor de bewegingsenergie van de deeltjes waaruit het bestaat. Het verband tussen temperatuur en deze thermische energie wordt geleverd door Boltzmann's constante  $k = 8,6 \times 10^{-5}$  eV/K; voor een gas van vrije deeltjes bij temperatuur  $T$  is de thermische energie per deeltje

$$E_{therm} = \frac{3}{2} kT.$$

Zolang deze thermische energie per deeltje klein is in vergelijking met de rustenergie ( $kT \ll mc^2$ ), is de totale energiedichtheid van het gas recht evenredig met het aantal deeltjes per eenheid volume  $n$  en hun rustenergie:

$$\epsilon_m \approx n m c^2.$$

Terwijl het heelal opzwellt en afkoelt neemt de deeltjesdichtheid, en dus ook de energiedichtheid, steeds verder af. Omgekeerd was de bijdrage van materie aan de totale energiedichtheid van het heelal in het verleden veel groter dan nu, en groter naarmate de schaal van de kosmos kleiner was.

Eerder in dit hoofdstuk hebben we gezien, dat de energiedichtheid van materie op dit moment ongeveer een derde is van die van de donkere energie. Omdat de donkere energiedichtheid niet of nauwelijks verandert, moeten deze twee energiedichtheden in het verleden (toen het volume van een gebied in het heelal drie kleiner was dan nu) gelijk geweest zijn, terwijl voor die tijd de materiedichtheid domineerde. Gezien de huidige uitdijingsnelheid van het heelal, zoals vastgelegd in de waarde van de constante van Hubble  $H_0$ , lag dat ogenblik op ongeveer tweederde van de huidige leeftijd van het heelal, toen het tussen 9 en 10 miljard jaar oud was.

Als je voldoende ver terug gaat in de tijd, naar temperaturen waarbij  $kT \approx mc^2$ , is de aanname dat de energie per deeltje voornamelijk wordt bepaald door de massa (de rustener-

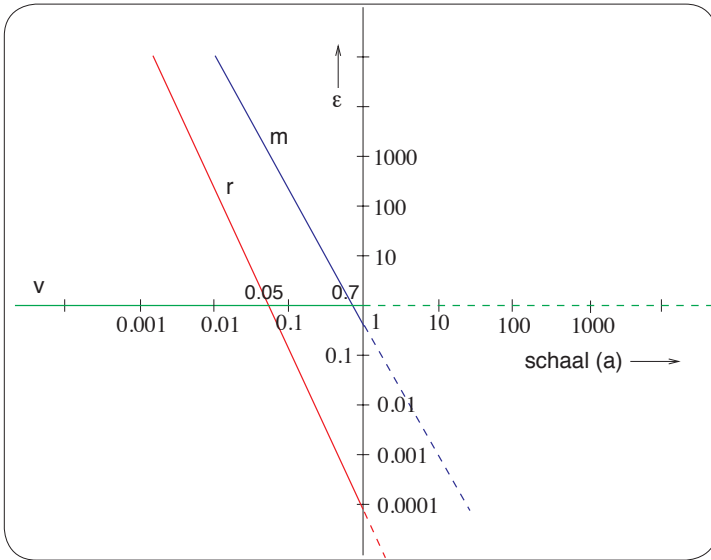


gie) niet meer van toepassing. Bij zulke temperaturen is de gemiddelde snelheid van de deeltjes niet ver onder de lichtsnelheid, en spelen relativistische effecten een belangrijke rol. Als de energie per deeltje nog verder oploopt gaan materiedeeltjes zich gedragen alsof ze geen massa hebben, net als fotonen. Dan gaat het gedrag van materie over in dat van straling.

Deze overgang ligt natuurlijk bij een andere temperatuur voor deeltjes met verschillende massa. Voor baryonen wordt de kritische temperatuur bereikt wanneer de thermische energie ongeveer 1 GeV is, wat overeenkomt met  $T_b = 10^{13}$  K. Voor een licht neutrino, met een massa in de orde van grootte  $m_\nu c^2 = 10$  meV, is de kritische temperatuur veel lager:  $T_\nu = 100$  K. Van donkere materie weten we niet wat de massa van een enkel materiedeeltje is, maar de huidige verwachtingen liggen tussen 100 en 1000 maal de baryonmassa; als dat klopt, dan ligt de temperatuur waarbij donkere materie niet-relativistisch werd op  $T_{dm} = 10^{15}$  à  $10^{16}$  K.

Straling koelt bij uitdijing nog sneller af dan materie. De reden is niet zo ingewikkeld: bij straling neemt niet alleen het aantal deeltjes (fotonen) per volume-eenheid af, maar ook neemt de golflengte toe. Aangezien de energie van een foton omgekeerd evenredig is met de golflengte, neemt de energie per foton dus ook nog af. Teruggaand in de tijd was de bijdrage van straling aan de totale energiedichtheid van het vroege heelal juist veel belangrijker dan nu. In het eerste begin, toen ook alle materie zich als straling gedroeg, was de bijdrage van straling zelfs volledig dominant.

In fig. 8 zijn de bijdragen van de vacuümenergie, materie en straling aan de totale energie-inhoud van het heelal geschetst als functie van de tijd. De vacuümenergie per eenheid volume ( $v$ ), weergegeven door de horizontale groene lijn, is constant. De bijdragen van materie ( $m$ , blauw) en van straling ( $r$ , rood) zijn weergegeven in verhouding tot die van de vacuümenergie. Op dit moment zijn de waarden, zoals we hebben besproken, respectievelijk ongeveer 0,3 en 0,00004. In plaats van de tijd zelf is horizontaal de schaal  $a$  van het heelal op dat moment weergegeven; de afstandsschaal is op 1 gesteld voor de tegenwoordige tijd; afstanden in het verleden waren kleiner, in de toekomst zullen ze groter zijn. Als je teruggaat in de tijd, tot het moment dat afstanden ongeveer twee derde waren van die van nu ( $a \approx 0,7$ ), zie je dat de bijdrage van de materie die van de vacuümenergie daar kruist; voor die tijd was de materiedichtheid dominant. De bijdrage van straling en vacuümenergie waren gelijk toen de afstandsschaal ongeveer een twintigste van de huidige was. In de toekomst zal de vacuümenergie steeds meer gaan domineren, en zal het heelal steeds sneller uitdijen.



Figuur 8. Evolutie van de drie componenten van het kosmische energiebudget.

structuur van de kosmos, over zijn geschiedenis, of over het energiebudget.

Wij zullen daar zelf geen last van hebben. Maar als er in een verre toekomst nog steeds wezens zich bezighouden met de evolutie van de kosmos, zullen ze niet meer de beschikking hebben over de waarnemingen waar wij ons op kunnen baseren. Zo zullen ze geen melkwegstelsels meer zien buiten de lokale groep, want die zijn achter de kosmische horizon verdwenen. Ook zien ze geen kosmische achtergrondstraling meer, want de golflengte daarvan is veel te groot geworden, praktisch oneindig. Onze lokale groep van melkwegstelsels zal waarschijnlijk zijn versmolten tot een enkel groot melkwegstelsel. Er zal dan dus geen mogelijkheid meer zijn om iets te weten te komen over de grootschalige

Was het heelal daarentegen een stuk jonger geweest, zeg half zo jong als nu, dan hadden we nooit iets gezien van het bestaan van vacuümenergie; die zou nog volledig zijn gedomineerd door de dichtheid van materie en straling. We zouden dan geen goed zicht hebben gehad op de toekomstige ontwikkeling van het heelal. We lijken als waarnemers op dit moment in de evolutie van het heelal dus in een bevoorrechte positie te zitten. Maar onze conclusies blijven beperkt tot het deel van het heelal dat we kennen. Wat zich buiten onze horizon bevindt weten we niet, zodat we altijd globale informatie over het universum kunnen missen.

# Aanhangsel

## A. Afstand en helderheid

De absolute helderheid van een ster is de totale hoeveelheid licht die een ster per seconde de ruimte in straalt. Nu kan dat per kleur verschillen, maar je kunt bijvoorbeeld afspreken dat de totale hoeveelheid zichtbaar licht meetelt, of dat alleen licht bij een bepaalde golflengte gemeten wordt.

Welke maat je ook kiest, de intensiteit van het betreffende licht neemt af met het kwadraat van de afstand. Stel de ster produceert  $W$  watt aan lichtenergie in het gekozen golflengtegebied. Na 3,26 jaar bereikt dat licht een afstand van 1 parsec. Als je een bol trekt om de ster met een straal van 1 parsec, dan heeft deze bol een oppervlak<sup>1</sup>

$$O[1] = 4\pi \text{ pc}^2.$$

De intensiteit van het licht op deze standaard afstand is dan

$$I_1 = \frac{W}{O[1]} = \frac{W}{4\pi} \text{ watt/pc}^2.$$

Beschouw nu datzelfde licht op een later tijdstip, wanneer het een afstand van  $d$  parsec van de ster heeft bereikt. Dezelfde hoeveelheid licht is nu verdeeld over een bol met oppervlak

$$O[d] = 4\pi d^2 \text{ pc}^2.$$

De intensiteit van het licht is dan afgenomen tot

$$I_d = \frac{W}{O[d]} = \frac{W}{4\pi d^2} \text{ watt/pc}^2.$$

De verhouding van de intensiteiten is dus

$$\frac{I_1}{I_d} = d^2.$$

Als je nu van een bepaald type ster weet wat de absolute helderheid is, en dus de intensiteit  $I_1$  op een afstand van 1 parsec, dan kun je uit de gemeten intensiteit  $I_d$  de afstand bepalen:

$$d = \sqrt{\frac{I_1}{I_d}}.$$

<sup>1</sup> N.B.:  $1 \text{ pc}^2 = 0,952 \times 10^{33} \text{ m}^2$ .

In de praktijk wordt de helderheid van sterren vaak uitgedrukt in de *magnitude*  $m$ , die bepaald wordt in termen van de logaritme van de lichtintensiteit, volgens de formule:

$$m_1 - m_d = \frac{5}{2}(\log I_1 - \log I_d) = 5 \log d,$$

met  $d$  uitgedrukt in parsec; omgekeerd is dan

$$d = 10^{(m_1 - m_d)/5}.$$

Tenslotte moet er ook rekening worden gehouden met de roodverschuiving: als de ster op zo'n grote afstand staat dat de roodverschuiving van belang is, dan verandert zijn kleur. Wil je de helderheid in een bepaald kleurgebied bepalen, dan moet je natuurlijk voor dit effect corrigeren. Het effect is zelf weer afhankelijk van de afstand, dus de relatie tussen gemeten helderheid en afstand wordt dan wat ingewikkelder dan hier besproken.

## B. De kritische energiedichtheid

De kritische energiedichtheid  $\varepsilon_c$  in het heelal is de gemiddelde energie per volume die nodig is om te zorgen dat het heelal over grote afstanden gemeten vlak is en vlak blijft, ook terwijl het uitdijt. De kritische energiedichtheid berekent men dan ook standaard m.b.v. de algemene relativiteitstheorie. Er is echter een argument op basis van Newton's zwaartekrachtwet dat hetzelfde resultaat oplevert, als volgt. Stel het heelal is homogeen gevuld met één soort deeltjes, met massa  $m$ ; en stel er zijn  $n$  deeltjes per eenheid volume. In een bolvormig gebied met straal  $R$  zijn er dan

$$N = \frac{4\pi}{3}R^3 n$$

deeltjes, met een totale massa

$$M = Nm = \frac{4\pi}{3}R^3 nm.$$

Een deeltje op de rand van dit gebied heeft een potentiële energie t.o.v. een waarnemer in het middelpunt

$$V = -\frac{GmM}{R} = -\frac{4\pi G}{3}R^2 nm^2.$$

Het deeltje op afstand  $R$  heeft ook een bewegingsenergie t.o.v. de centrale waarnemer ten gevolge van de uitdijing; de snelheid wordt dan bepaald door de Hubble constante:

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mH_0^2R^2.$$

De som van bewegingsenergie en potentiële energie van het deeltje is dus:

$$E = T + V = \frac{1}{2} m R^2 \left( H_0^2 - \frac{8\pi G}{3} \rho \right).$$

Als de potentiële energie en de bewegingsenergie elkaar in evenwicht houden, moet de dichtheid van de deeltjes een specifieke waarde  $n_c$  hebben:

$$E = 0 \Rightarrow n_c m = \frac{3H_0^2}{8\pi G}.$$

De enige energie die de deeltjes dan nog netto bezitten is hun rustenergie  $mc^2$ ; dus de totale energiedichtheid van de deeltjes is

$$\varepsilon_c = n_c mc^2 = \frac{3c^2 H_0^2}{8\pi G}.$$

Wat betekent de voorwaarde dat de bewegingsenergie en de potentiële energie elkaar in evenwicht houden? De uitdijing van het heelal kun je in het newtoniaanse beeld opvatten als een kracht die de deeltjes uit elkaar trekt; bij de kritische dichtheid is deze kracht precies in evenwicht met de zwaartekracht t.g.v. de andere deeltjes in het betreffende volume. De afwezigheid van een netto kracht op de deeltjes is equivalent met de afwezigheid van kromming van de ruimte in het beeld van de algemene relativiteitstheorie.

Een heelal dat uit verscheidene soorten deeltjes met verschillende massa's bestaat, moet dezelfde totale energiedichtheid hebben om dit evenwicht te handhaven. Daarom is de hierboven gevonden uitdrukking voor de kritische energiedichtheid  $\varepsilon_c$  ook dan nog steeds van toepassing; zelfs het in rekening brengen van de vacuumenergie verandert dit niet.

### *Verantwoording van illustraties*

Omslag NGC3198; J. Vickery en J. Matthes/Adam Block/NOAO/AURA/NSF

Fig. 1 K.G. Begeman, *proefschrift* (Un. Groningen, 1987)

*Astron. Astrophys.* **223** (1989), 47

Fig. 2 A. Fruchter (STScI) *et al.*, *WFPC2, HST en NASA*

Fig. 5 W.L. Freedman *et al.*, *Astrophysical Journal* **553** (2001), 47

Fig. 6 NASA/WMAP team, *Five-Year WMAP Observations*

G. Hinshaw *et al.*, *Astrophysical Journal* (2009), to be published

Fig. 7 Perlmutter *et al.*, *Astrophysical Journal* **517** (1999), 565

### *Een kleine selectie uit de literatuur*

G. Schilling, *Big Bang voor in je binnenzak* (Fontaine; 2007)

Brian Greene, *De ontrafeling van de kosmos* (Spectrum; 2005)

[oorspr. titel: *The fabric of the cosmos* (A.A. Knopf, New York; 2004)]

S. Weinberg, *De eerste drie minuten* (Natuur en Techniek; 1983)

[oorspr. titel: *The first three minutes* (André Deutsch Ltd; 1977)]

S. Hawking en L. Mlodinov, *Een korte geschiedenis van de tijd* (Prometheus; 2005)

[oorspr. titel: *A brief history of time* (Bantam Press; 1988)]