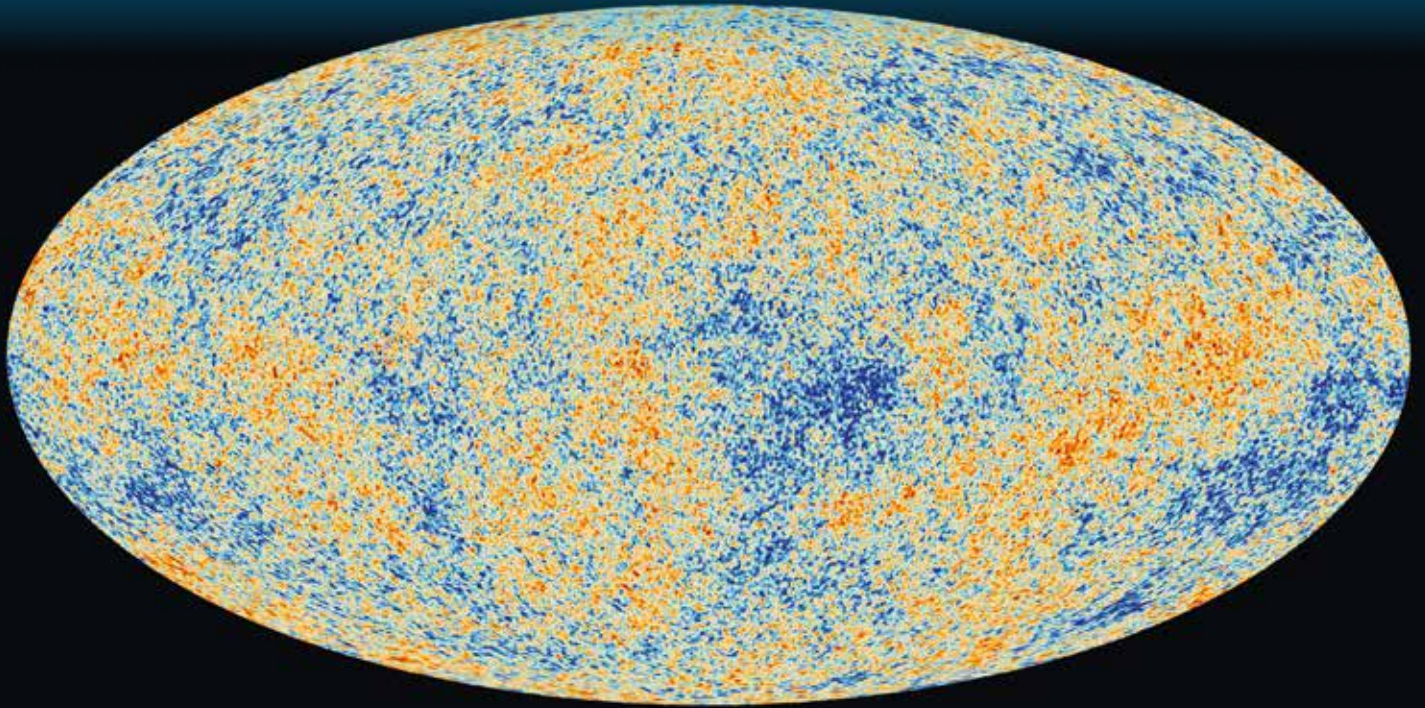


De versnellende uitdijing van het heelal

De puzzel van de donkere energie



De kosmische achtergrondstraling, gemeten door de Planck-satelliet. De kleur geeft minieme temperatuurverschillen van die straling aan. Door de typische grootte van de rode en blauwe 'vlekjes' te meten is het mogelijk de geometrie van het heelal te bepalen en te concluderen dat de uitdijing van het heelal versnelt. (Foto: ESA)

Koen Kuijken

Prof. dr. Koen Kuijken is hoogleraar sterrenkunde aan de Universiteit Leiden. Hij is o.a. geïnteresseerd in donkere materie in sterrenstelsels en het heelal, gravitatielenzen, en de dynamica van sterrenstelsels.

In het vorige nummer van *Zenit* keken Vincent Icke en John Heise naar de oerknal en wat we daarover te weten komen door de gloed van de oerknal te bestuderen: de achtergrondstraling zoals in kaart gebracht met de Planck-satelliet. Maar sinds 1998 weten we dat het heelal niet alleen uitdijt, maar dat deze uitdijing steeds sneller gaat. Ook daarvoor leveren de Planck-waarnemingen ons extra bewijs.

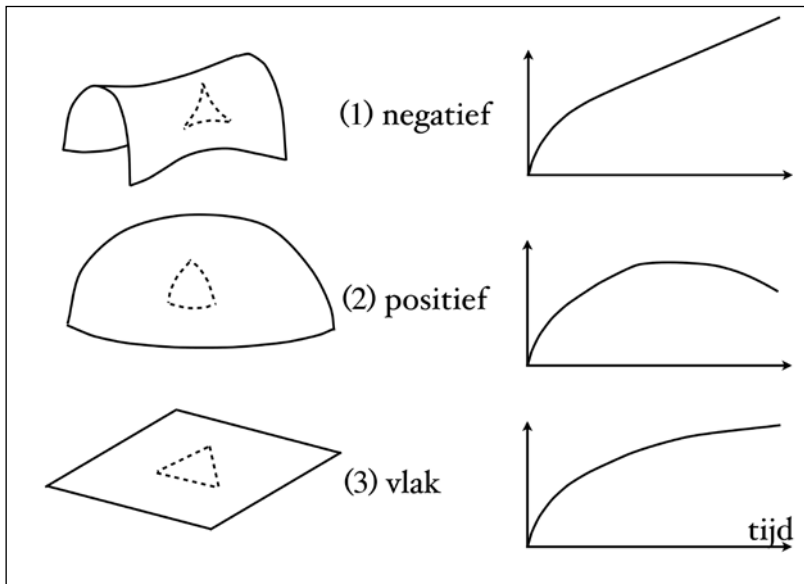
Ons heelal is, voor zover we weten, onbegrensd: het heeft geen 'rand', net zoals het oppervlak van onze aarde geen rand heeft. Over die reusachtige schaal heerst de zwaartekracht. Hoewel de zwaartekracht intrinsiek een zeer zwakke kracht is – de elektrostatische aantrekking tussen een proton en een elektron is zo'n 10^{40} maal groter dan de gravitationele – wint de zwaartekracht op grote schaal altijd, omdat het effect ervan cumulatief is. Zwaartekracht veroorzaakt altijd een aantrekking, terwijl geladen deeltjes elkaar elektrostatisch kunnen aantrekken of afstoten naar gelang het teken van hun elektrische lading.

Evolutie

Die gravitatie op grote schaal leidt onherroepelijk tot een heelal dat evolueert. Een statisch heelal kan zich niet in stand houden tegen de zwaartekracht, maar zal steeds

meer samengetrokken worden. De sterkte van die samentrekking hangt af van de dichtheid van de materie in het heelal: hoe hoger de dichtheid, hoe sterker de gravitatie en hoe sneller een aanvankelijk statisch heelal ineen zal klappen. Deze conclusie volgt al uit simpele berekeningen met de wetten van Newton, maar ook de veel complexere algemene relativiteitstheorie van Einstein, die de zwaartekracht formuleert als een eigenschap van de ruimte-tijd, maakt dezelfde voorspelling. De dominantie van de zwaartekracht op de grootste schaal leidt dus logisch tot de conclusie dat het heelal moet evolueren.

Vooruitgang in de wetenschap is vaak het gevolg van een toevallige samenloop van omstandigheden. Eén van de mooiste voorbeelden hiervan vond plaats in de kosmologie, in de jaren twintig en dertig van de vorige eeuw. Terwijl Einstein zijn nieuwe relativiteitstheorie aan het



De verschillende mogelijke Lemaitre-modellen. Links de kromming van de ruimte (hier getekend in een tweedimensionale analogie), rechts de evolutie van de grootte van het heelal.

ontwikkelen was, waren in de VS astronomen voor het eerst in staat om spectra te meten van de 'nevels', vlekjes aan de hemel waarvan met de nieuwste telescopen net duidelijk was geworden dat dit verre sterrenstelsels waren, 'island universes' zoals de Melkweg waarin wij wonen. Aan de hand van spectra kon het zogeheten dopplereffect worden gemeten: golven die worden uitgezonden door een bewegende bron hebben een andere frequentie bij de waarnemer dan bij de bron. Licht is een elektromagnetische golf en het licht van een bewegende bron krijgt dus een iets langere of kortere golflengte naargelang de bron van ons af of naar ons toe beweegt. In het dagelijkse leven is dit effect bijzonder klein, maar iedereen die wel eens een ambulance of een raceauto heeft horen langsrijden, heeft het dopplereffect op een ander soort golven (geluidsgolven) waargenomen. Het resultaat van dit werk kennen we nu als de wet van Hubble^{#1}: hoe verder een nevel van ons afstaat, hoe sneller hij van ons af beweegt. Een dynamisch, evoluerend heelal!

Drie mogelijkheden

Een Belgische en een Nederlandse astronoom, Lemaitre en De Sitter, waren bij de eersten die zich realiseerden dat de wet van Hubble en de

theorie van Einstein met elkaar in verband stonden. In plaats van een statisch heelal (onmogelijk als gevolg van de dominantie van de gravitatie op kosmologische schaal) toonden de waarnemingen juist aan dat het heelal uitdijde. (Einstein had ondertussen een poging gedaan om zijn theorie aan te passen door een 'kosmologische constante' toe te voegen, zodat een statisch heelal toch mogelijk zou zijn, maar gaf dit snel op als gevolg van de waarnemingen.) Lemaitre slaagde erin om met de theorie van Einstein berekeningen te maken die de verdere evolutie, en de eerdere geschiedenis, van het heelal beschrijven. Deze modellen tonen het effect van de zwaartekracht op de uitdijning van het heelal, en bevatten ook de kromming van de ruimte als gevolg van de zwaartekracht die de kern is van de algemene relativiteitstheorie. Het werd duidelijk dat er drie mogelijkheden waren:

- (1) Als de zwaartekracht te zwak is om de uitdijning te stoppen, blijft het heelal eeuwig groeien. Alles blijft verder van elkaar af bewegen, het heelal wordt steeds ijeler, wat de zwaartekracht verder verzwakt. Uiteindelijk verliest de zwaartekracht het van de Hubble-expansie. Een heelal zoals dit heeft een *negatieve* kromming en is oneindig groot. In zekere zin is de Hubble-expansie sneller dan de 'ontsnappingsnelheid.'
- (2) Een heelal van hogere dichtheid ondervindt een sterkere zwaartekracht, die de uitdijning sterker afremt. Het is zelfs mogelijk dat

de zwaartekracht de uitdijning helemaal tot stilstand brengt, waarna het heelal ineens begint te storten (waardoor in de toekomst astronomen een negatief dopplereffect zouden waarnemen). Hoe sterker de zwaartekracht, hoe eerder dat moment van stagnatie komt. Een heelal met een sterke zwaartekracht (hoge dichtheid) heeft een *positieve* kromming, wat neerkomt op de geometrie van het (driedimensionale) oppervlak van een (vierdimensionale) hypersfeer. Zo'n heelal heeft een eindig volume, waarin het in principe mogelijk is om in een bepaalde richting te reizen en uiteindelijk toch weer, zonder om te draaien, op het startpunt uit te komen.

- (3) De derde mogelijkheid is een wiskundig grensgeval tussen gevallen (1) en (2): als de zwaartekracht net sterk genoeg is om de uitdijning af te remmen, maar het stagnatiemoment oneindig ver in de toekomst ligt, zal de expansie eeuwig voortduren, maar steeds langzamer worden. Dit *kritisch* heelal heeft geen kromming en is oneindig. Om de huidige expansie net tot staan te brengen is een gemiddelde massadichtheid van ongeveer 5 protonen per kubieke meter nodig. Deze dichtheid is veel lager dan wat we waarschijnlijk ooit op aarde als vacuüm zullen kunnen maken, maar is toch voldoende om de evolutie van het heelal te bepalen: het heelal telt enorm veel kubieke meters!

Het was dus duidelijk geworden dat de toekomst van het heelal volgens de algemene relativiteitstheorie afhangt van de mate waarin de zwaartekracht, veroorzaakt door alles wat zich in het heelal bevindt, de Hubble-expansie kan afremmen. We weten hoe sterk een kilo materie aan een andere kilo materie trekt, we weten hoe snel het heelal momenteel uitdijt (afstanden worden ongeveer 1,000.000.000.700 maal groter per jaar), de hamvraag is dus of de ruimte voldoende materie bevat voor scenario (1), (2) of (3): met andere woorden, wat is de dichtheid van het heelal?

De dichtheid van het heelal meten blijkt verrassend moeilijk. Sterrenstelsels vormen een complexe grootschaalstructuur, met grote concentraties tussen leemtes van meer dan 100 miljoen lichtjaar diameter. Om een representatief deel van het heelal te kunnen wegen is het dus nodig

#1 Hoewel Hubble's rol van groot belang was hadden anderen al voortekenen van zijn resultaat waargenomen.

om de massa van verre sterrenstelsels te kunnen bepalen. Daaruit kwam een onverwacht resultaat: elke redelijke aanname over hoeveel sterren er nodig zijn om de helderheid van de sterrenstelsels te veroorzaken, gaf een antwoord dat veel lager lag dan schattingen gebaseerd op de bewegingen van het gas en de sterren in die sterrenstelsels. Als je een sterrenstelsel zou bouwen met de sterren die je ziet, en ze ook de gemeten interne bewegingssnelheid zou geven, zou zo'n sterrenstelsel snel uiteen vliegen! Conclusie: sterrenstelsels bevatten niet alleen de sterren en gas die we kunnen waarnemen, maar ook veel onzichtbare, 'donkere' materie. Hoeveel precies was moeilijk vast te stellen, omdat de meeste donkere materie in de buitendelen leek te zitten waar metingen moeilijk zijn: de beste schattingen kwamen uit op een factor 6 tot 10 meer donkere dan zichtbare materie. Tot in de jaren negentig van de vorige eeuw bleef het onduidelijk of de gemiddelde dichtheid van het heelal boven of onder de kritische waarde van ca. 5 protonen/m³ lag.

Een onverwacht antwoord

De doorbraak kwam door de combinatie van twee andere soorten metingen. Enerzijds werden er waarnemingscampagnes opgezet om rechtstreeks te proberen te meten hoe snel de uitdijning van het heelal aan het afremmen is. Door zulke metingen te vergelijken met de modellen van Lemaitre is meteen af te lezen in welk van de mogelijke scenario's we ons bevinden. De meest nauwkeurige resultaten werden verkregen met supernova's: enorm heldere ontploffende sterren die tot ver in het heelal kunnen worden waargeno-

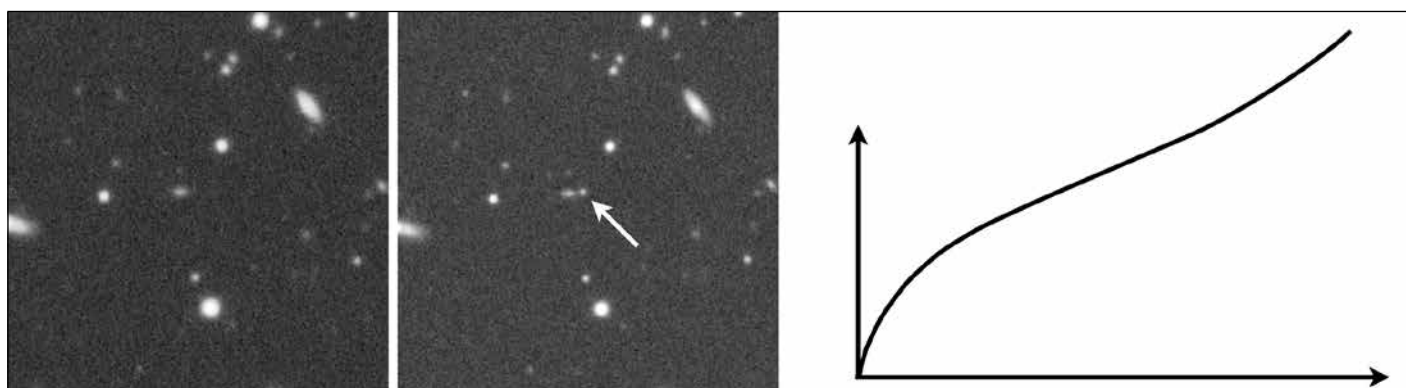
men, zo ver dat het licht dat we ontvangen tot tien miljard jaar onderweg is geweest. Met zulke verre supernova's is het mogelijk om de geschiedenis van de uitdijning van het heelal rechtstreeks te bepalen. De andere belangrijke metingen kwamen van de kosmische achtergrondstraling, van licht dat al meer dan 13 miljard jaar geleden is uitgezonden, en de condities weergeeft van het heelal in een veel jongere, hetere staat dan de huidige. De kleine fluctuaties in de achtergrondstraling bevatten belangrijke informatie over de uitdijninggeschiedenis van het heelal, en ook over de kromming van de ruimte waardoor dat licht tot ons is gekomen. Opmerkelijk genoeg is deze achtergrondstraling al in 1948 door Gamov voorspeld als onvermijdelijke consequentie van de hete oerknal. De voorspelling dat de straling niet helemaal isotroop zou zijn, maar kleine oneffenheden zou bevatten, kwam in de jaren zestig, van Amerikaanse (Peebles) en Sovjet (Sunyaev en Zel'dovich) theoretici. In 1963 werd de straling per toeval ontdekt als onverklaarbare radoruis. Pas in de jaren negentig zijn de fluctuaties (enkele duizendsten van een procent) voor het eerst gemeten met de COBE-satelliet; vanaf 2001 kwam een reeks veel scherpere en gevoeliger kaarten van de WMAP-satelliet, onlangs gevolgd door nog betere kaarten gemaakt door de Planck-satelliet. De supernovaresultaten over de uitdijninggeschiedenis werden in 1998 door twee onafhankelijke teams gepresenteerd. Beide teams waren het eens over de conclusie: geen van de scenario's (1), (2) of (3) van Lemaitre beschrijft de werkelijkheid! De supernova's lieten namelijk zien dat de uitdijning van het heelal niet wordt

afgeremd door de zwaartekracht, maar juist *versnelt!* Mogelijke verklaringen waarom dit resultaat misschien fout zou kunnen zijn werden uitgepluisd: de meest voor de hand liggende mogelijkheid was dat supernova's in het verre verleden misschien toch iets anders waren dan nu, waardoor ze wat minder helder zouden zijn geweest.

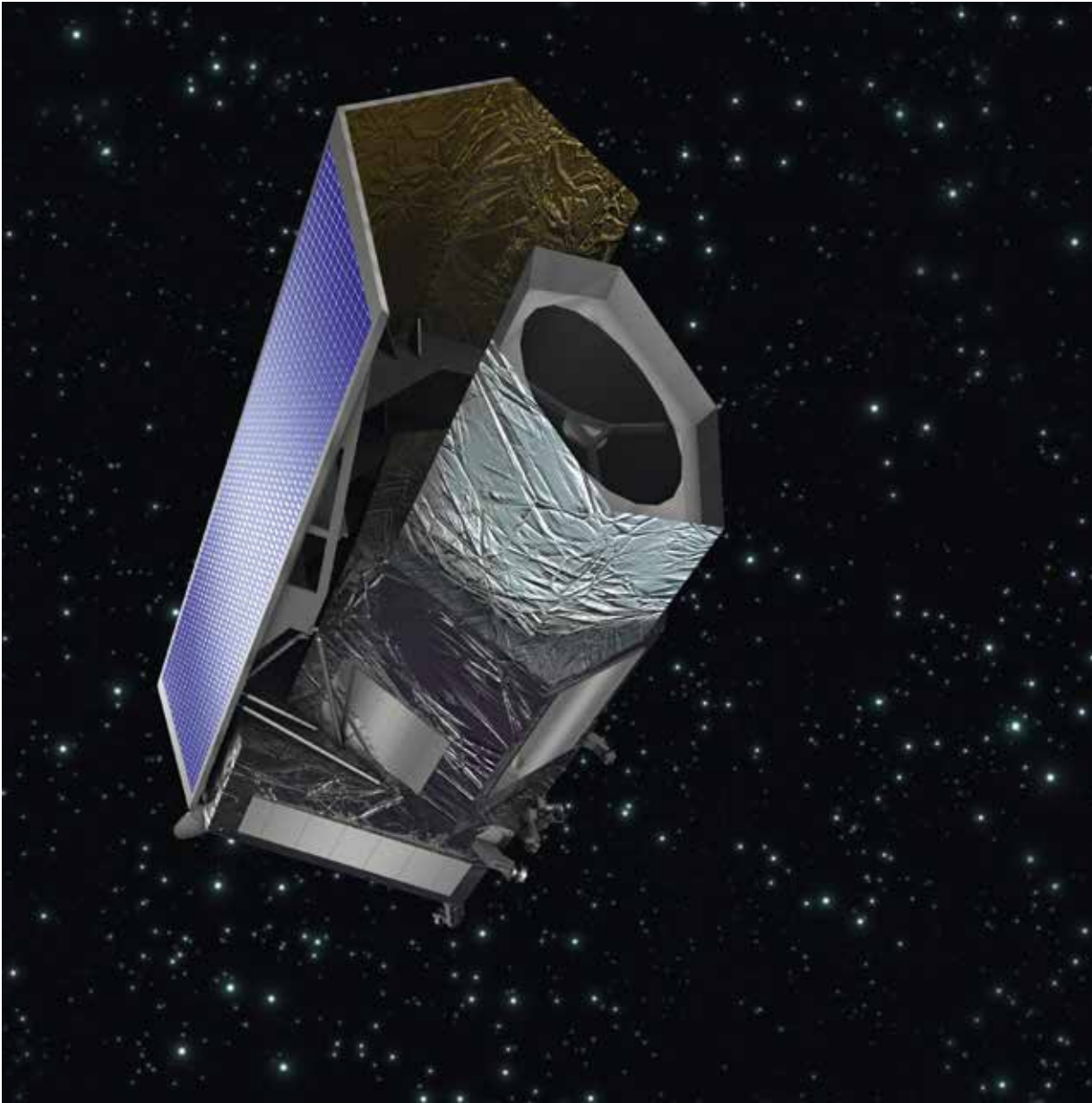
Maar een paar jaar later, in 2001, kwam de onafhankelijke bevestiging van de versnellende uitdijning door de metingen van de kosmische achtergrondstraling. De eerste resultaten van NASA's WMAP-satelliet, die de hele achtergrondstraling in kaart bracht, lieten zien dat Lemaitre's modellen definitief niet pasten: hoewel de fysica van de eerste paar minuten na het ontstaan van het heelal volledig overeenkomen met berekeningen aan de hete oerknal, is de latere evolutie fundamenteel anders. Het heelal wordt te snel te groot. Metingen met de Europese Planck-satelliet hebben dit resultaat volledig bevestigd. De conclusie is dan ook onontkoombaar: iets veroorzaakt een versnellende uitdijning van het heelal.

Donkere fysica

De huidige staat van de kosmologie is dus paradoxaal: de nieuwe metingen bepalen heel nauwkeurig hoeveel we niet weten over het heelal! Slechts 4% van de totale dichtheid van het heelal bestaat uit deeltjes die we kennen uit de deeltjesfysica (protonen, elektronen, neutrino's, etc.). De rest bestaat voor ongeveer 1/3 uit donkere materie (die wel samenklontert onder invloed van de zwaartekracht en daarmee zelfs essentieel is voor het ontstaan van sterrenstelsels), en 2/3 uit 'donkere energie', de mysterieuze oorzaak van de versnellende uitdijning.



Links en midden: een stukje van de hemel voor en nadat er een supernova plaatsvond in een verafgelegen melkwegstelsel. Supernovae zijn ontploffende sterren die enkele weken lang bijna zo helder zijn als het sterrenstelsel waarin ze zich bevinden. Door de helderheid van zulke supernova's te meten is de versnellende uitdijning van het heelal (rechts) ontdekt. Dit werd in 2011 bekroond met de Nobelprijs voor de natuurkunde. (Foto's: Brian Schmidt)



De Euclid-satelliet, een optisch/infraroodtelescoop die vanaf 2020 de grote-schaalverdeling van verre sterrenstelsels in drie dimensies in kaart gaat brengen. Analyse van de resultaten zal verdere informatie over de aard van donkere materie en donkere energie opleveren. (Illustratie: ESA/C. Carreau)

Hoe nu verder? Alle deeltjesfysica die op aarde beoefend kan worden in deeltjesversnellers zoals de Large Hadron Collider in CERN bevestigen het 'standaard model': dat beschrijft dus slechts 4% van het heelal. Er zijn verschillende (zelfs veel) manieren om die theorie uit te breiden met meer deeltjes, waaronder ook stabiele, inerte donkere materie, maar ondanks een reeks experimenten die daar speciaal voor ontworpen zijn, is er nog geen direct bewijs geleverd voor het bestaan daarvan. Tot nu toe heeft niemand een reactie met een donkere-materiedeeltje gevonden. Waar voor donkere materie misschien oplossingen kunnen worden gevonden in de deeltjesfysica, is de

situatie met donkere energie veel ingewikkelder. Het is wel degelijk mogelijk om zoiets als donkere energie toe te voegen aan de natuurkundewetten, maar als je dat doet kom je bijna onvermijdelijk uit op meer dan 10^{100} maal zoveel donkere energie dan wordt waargenomen. Met andere woorden, de theoretische verwachting is dat óf donkere energie niet bestaat, óf dat die het heelal volledig overheerst. Een overtuigende verklaring voor die discrepantie van zo'n reusachtige factor is er op dit moment totaal niet, maar de waarnemingen zijn overtuigend en wijzen op een groot hiaat in ons begrip van de fundamentele natuurkunde.

Euclid

In 2011 heeft de Europese ruimteorganisatie ESA de Euclid-satelliet goedgekeurd. Hoofddoel van deze missie is om in kaart te brengen hoe de verdeling van massa in het heelal over de laatste 10 miljard jaar is geëvolueerd. Dat is het tijdperk waarin de versnellende uitdijning is begonnen, en door dat in detail te bestuderen hopen we meer te leren over hoe de donkere energie zich gedraagt. Als die bijvoorbeeld een eigenschap is van de wetten van de zwaartekracht over de allergrootste afstanden, zou dat zichtbaar moeten zijn als we kijken hoe snel de uitdijning van het heelal versnelt of vertraagt, en hoe snel massa samenklontert in de filamenten en clusters die we waarnemen.

Deze metingen maken gebruik van het gravitatielenseffect, de buiging van lichtstralen door zwaartekracht die een systematische vervorming veroorzaakt van de beelden van de verste sterrenstelsels: dit effect

wordt nu vooral met telescopen op aarde bestudeerd, maar Euclid zal vanuit de ruimte, boven de vertroebelende atmosfeer, een spectaculair scherpe hemelkaart maken waarop dit effect nauwkeurig kan worden

gemeten. Ook in Nederland zijn astronomen druk bezig met de voorbereidingen: als alles goed gaat zullen we vanaf 2020 de eerste kaarten kunnen bewonderen.

Of toch geen donkere energie?

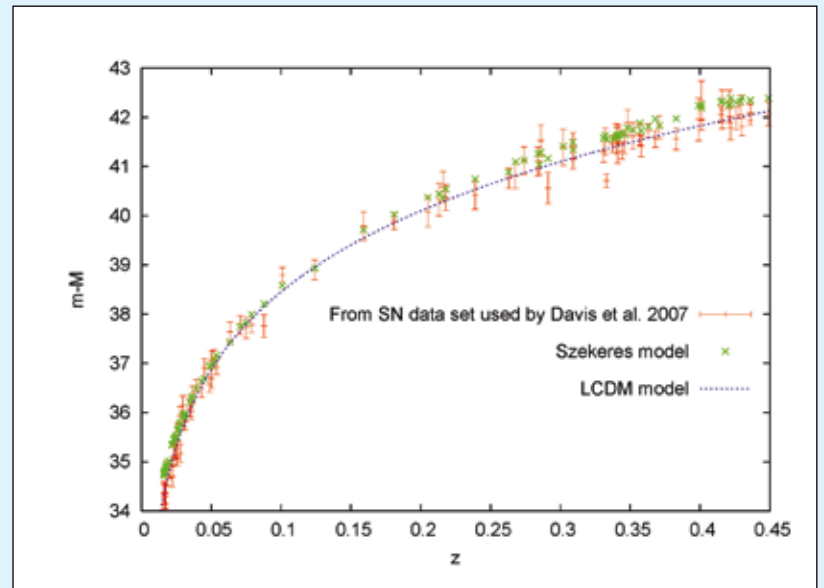
Donkere energie is alleen nodig als je alle waarnemingen interpreteert in een heelalmodel met gelijkmatig verdeelde materie, een zogeheten homogeen heelal. In zo'n model neemt de uitdijingsnelheid langzaam af door de zwaartekracht van materie. Hoe meer materie, des te harder remt de uitdijing. Om binnen dat model een versneld expanderend heelal te verklaren, heb je iets nodig dat duwt en dat is donkere energie. Maar wat blijkt: de helderheid van verre supernova's zijn ook te verklaren zonder donkere energie, maar dan wel met een inhomogeen heelalmodel. Hoe zit dat precies?

In de astronomische gemeenschap is er een groeiende en hardnekkige kern, 'een klein dorpje in Gallië', waar men zich verzet tegen de overmacht van de *communis opinio* en de partijdiscipline van de grote denktanks rond de Planck- en WMAP-satelliet. Men werkt daar zonder *toverdrank* in de vorm van donkere energie, maar met een eenvoudiger toverwoord: 'inhomogeen heelal'.

Het heelal is weliswaar homogeen begonnen maar is dat al lang niet meer. Op grote schaal zijn er juist grote inhomogeniteiten, zoals clusters, superclusters en holtes. Op een schaal van 500 miljoen lichtjaar (groter dan superclusternivo) wonen wij in een gebied met extra grote dichtheden, die een extra vertraging van de expansie geven, terwijl onze wijdere omgeving een lagere dichtheid heeft en minder snel vertraagd. Vanuit ons gezichtspunt zien we dat *als een versnelde expansie*. Vergelijk het volgende voorbeeld: twee auto's op twee rijbanen naast elkaar, remmen verschillend hard voor een stoplicht. Degene die het hardst remt ziet de ander t.o.v. hemzelf versneld vooruit bewegen, terwijl beide vertragen. In het heelal heb je dan geen donkere energie nodig om versnelling te krijgen, alleen

een goed model voor een inhomogeen heelal.

Een inhomogeen heelalmodel maken is nog niet zo eenvoudig. Theoretisch kun je eenvoudig laten zien dat uitschieters in de dichtheid het effect hebben van een extra constante, die sterk lijkt op de beschrijving van donkere energie via de kosmologische constante. Dat belooft dus een oplossing zonder donkere energie! Men gebruikt nu inhomogene modellen die een exacte oplossing zijn van de Einstein-veldvergelijkingen, maar zonder de eis van een gelijkmatige verdeling. Dat zijn bijvoorbeeld de zogeheten Szekeres-Zwitserse-kaas-modellen. Hiermee kan je al laten zien dat de helderheden van verre supernova's verklaard kunnen worden zonder de aanname van donkere energie! Daarvoor moet het universum wel een gatenkaas zijn waarvan de grootte van de gaten op de grens liggen van wat mogelijk lijkt.



De helderheid (magnitude) van verre supernova's met roodverschuiving z toont in het ΛCDM-model (stippellijn) aan dat donkere energie nodig is, maar ook begrepen kan worden (kruisjes) zonder donkere energie in een inhomogeen Szekeres-model. (Illustratie: M. Ishak e.a., arXiv 0708.2943)

Een kenmerkende signatuur voor inhomogene modellen is hun richtingsafhankelijkheid. Zij voorspellen een schijnbare versnelling die verschillend is in verschillende richtingen. Pas je dat toe op supernova's, dan klopt dat met de waarnemingen, maar net niet significant. Er zijn meer supernova's nodig. Deze voorspelling kan men misschien al over een paar jaar verifiëren. Inmiddels wordt er hard gewerkt om alle kosmologische gegevens in één inhomogeen heelalmodel te stoppen en te verklaren, inclusief de kosmische achtergrondstraling en de structuurvorming in het heelal. Als dat lukt valt er een groot probleem weg en krijgen theoretisch natuurkundigen gelijk die zeggen dat donkere energie eigenlijk helemaal niet kán bestaan.

John Heise