

DONKERE MATERIE IN HET HEELAL EN ZWAARTEKRACHTLENZEN

Figuur 1. De Europese Zuidelijke Sterrenwacht ESO in Chili, met de vier grote koepels van de Very Large Telescope (VLT). Daarnaast op hetzelfde platform de VLT Survey Telescope (VST), en op de nabije bergtop de VISTA telescoop. De VST en VISTA bevatten reusachtige breedbeeldcamera's om scherpe beelden van de hemel in het optisch respectievelijk nabij-infrarood licht te maken en worden gebruikt voor het KiDS project. Foto: J.L. Dauvergne & G. Hüdepohl (atacamaphoto.com)/ESO.

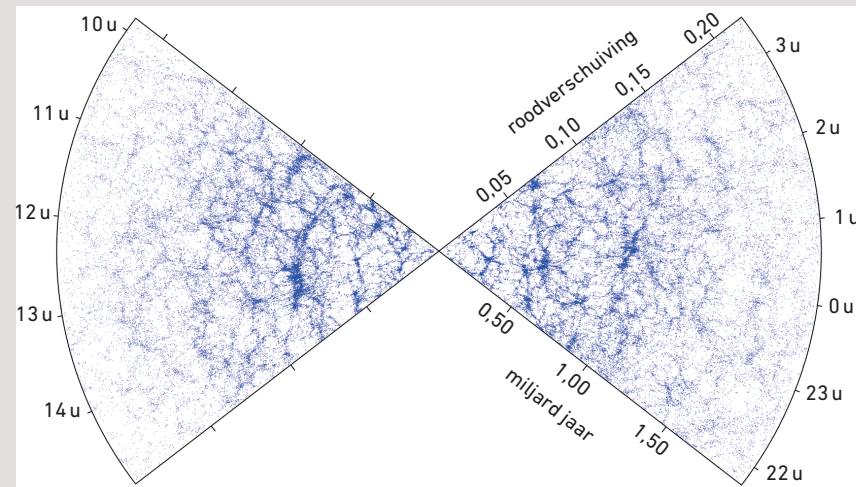
Het bestaan van donkere materie – het feit dat sterrenstelsels elkaar harder lijken aan te trekken dan op grond van hun zichtbare massa verwacht wordt – is één van de grootste raadsels in de moderne kosmologie. Door gebruik te maken van zwaartekrachtlenzen brengen astronomen de verdeling van donkere materie in kaart.

Het heelal dijt uit, dat weten we al sinds de waarnemingen van Hubble en collega's in de jaren twintig van de vorige eeuw. Het is nog steeds niet duidelijk hoe of waarom die uitdijning is begonnen (de 'oerknal') maar natuurkundigen zijn het er over eens dat er maar één manier is om hem te stoppen: door de zwaartekracht van het heelal zelf. Die aantrekkingskracht heeft namelijk een afremmende werking op de uitdijning, dus hoe meer massa het heelal bevat, hoe harder de uitdijning wordt afgeremd. Als de gemiddelde dichtheid hoog genoeg is, boven de zogenoemde kritische dichtheid, zal de uitdijning zelfs tot stilstand komen. Daarna keert de evolutie om en krimpt het heelal steeds sneller om uiteindelijk weer ineen te storten. (De kritische dichtheid is ongeveer die van vijf protonen per kubieke meter – een extreem hoog vacuüm, maar het volume van het waarneembare heelal is zo groot dat de totale massa voldoende gravitatie zou genereren om de uitdijning te stoppen.) Een goede analogie voor deze mogelijke evolutiescenario's voor het heelal is een projectiel dat verticaal omhoog wordt geschoten vanaf het oppervlak van een planeet. Afhankelijk van de lanceringsnelheid en de sterkte van het zwaartekrachtveld van de planeet, zal het projectiel ontsnappen of tot stilstand komen en terugvallen. Het resultaat wordt bepaald door de balans tussen de lanceringssnelheid (de uitdijning van het heelal) en de zwaartekracht van de planeet (massadichtheid van het heelal).

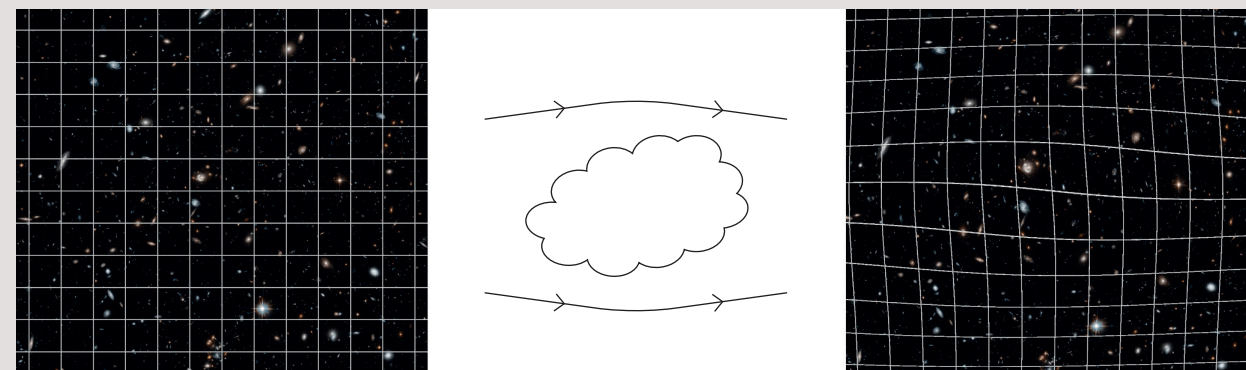
De uitdijningsgeschiedenis meten
Astronomen hebben de vertraging van de uitdijning decennialang geprobeerd te meten, om te bepalen wat de toekomstige evolutie van het heelal zou zijn. Door ver weg gelegen bronnen te bestuderen, kregen ze een kijk op het verleden van het heelal – het licht van verre bronnen is lang onderweg en komt dus uit het verleden – en op de manier waarop de uitdijning is geëvolueerd. De vertraging van de uitdijning is een maat voor de totale massa van het heelal, waarmee voorspeld kan worden of de uitdijning stopt of niet. Metingen aan de uitdijningsgeschiedenis zijn dus ook een manier om te bepalen hoeveel materie er in het heelal is. Dat is een interessante vraag op zichzelf, met name vanwege de indicaties dat er, naast de zichtbare sterren en gaswolken, ook veel onzichtbare donkere materie aanwezig is. Een van de aanwijzingen hiervoor zijn de snelheden waarmee sterrenstelsels om hun as draaien en door het heelal bewegen: die snelheden zijn zo hoog dat ze niet kunnen ontstaan door de werking van de zwaartekracht van de zichtbare massa. Een extra bron van zwaartekracht is nodig om de waarnemingen te verklaren [1]. Een kosmologische bepaling van de gemiddelde massadichtheid van het heelal is dan ook een sterke test van dit idee: als er inderdaad donkere materie aanwezig is, dan zal die ook in zulke metingen moeten opduiken. De conclusie van twee grote campagnes om dit soort data te vergaren, gebaseerd op metingen aan supernovae door twee teams van onderzoekers, kwam eind jaren



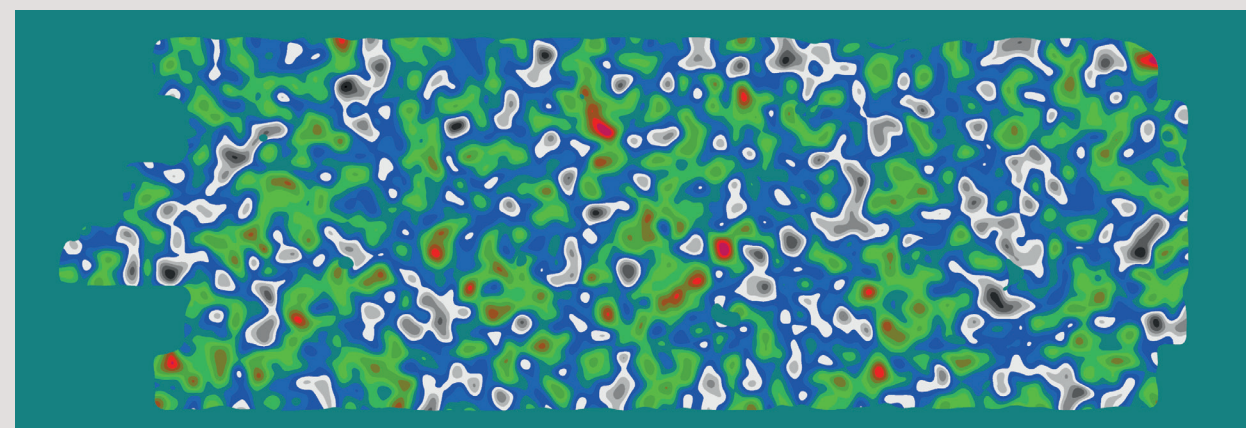
Koen Kuijken is astronoom aan Sterrewacht Leiden. Zijn onderzoek richt zich op de verdeling van de donkere materie in sterrenstelsels en het heelal. In 2006 richtte hij hiervoor het Kilo-Degree Survey project op de Europese Zuidelijke Sterrenwacht op.



Figuur 2. De verdeling van sterrenstelsels op lange-afstandsschaal, het gevolg van de instabiliteit die optreedt tijdens de uitdijing van het heelal waarbij kleine verschillen in dichtheid versterkt worden door (de werking van) de zwaartekracht. [4] De uuraanduidingen zijn de 'rechte klimming', de hemelcoördinaat die overeenkomt met de geografische lengte op aarde. 1 uur = 15 graden. De hemel draait een hoek van (bijna) 1 uur in 1 uur tijd. Er zijn twee sectoren omdat er naar twee tegenoverliggende stukken hemel is gekeken. Ons sterrenstelsel staat in het midden van die kaart en de sectoren zijn begrensd door de richtingen waarin er sterrenstelsels gemeten zijn.



Figuur 3. Schematische illustratie van het zwaartekrachtseffect. Links een beeld van een willekeurig stukje van de hemel, gevuld met verre sterrenstelsels. Als tussen ons en dit beeld een grote massaconcentratie ligt, zoals een onzichtbare wolk van donkere materie, dan zal die de lichtstralen afbuigen en een vervormd beeld (rechts) opleveren. Met speciale beeldverwerkingstechnieken kan die vervorming herkend en opgemeten worden, waardoor de aanwezigheid van de wolk donkere materie gedetecteerd wordt.



Figuur 4. Een kaart van de verdeling van donkere materie, gemeten met het KiDS project door middel van zwaartekrachtlenzen. De samenklontering van materie is duidelijk zichtbaar. Dit gebied is ongeveer een miljard lichtjaar breed en toont een projectie van de gemiddelde massaverdeling in het heelal over de laatste acht miljard jaar. De rode en groene kleuren duiden gebieden aan met hoge dichtheid. In de blauw- en grijsgekleurde gebieden is er juist minder massa aanwezig dan gemiddeld. [5]

negentig en was een complete verrassing. In plaats van een vertraging, lieten de metingen een duidelijke *versnelling* van de uitdijing zien! [2] Sindsdien is dit effect ook bevestigd aan de hand van verschillende andere metingen en is het duidelijk dat het niet om een eigenaardige eigenschap van supernovae gaat. Deze ontdekking heeft Perlmutter, Schmidt en Riess in 2011 de Nobelprijs opgeleverd. De ontdekking was niet te rijmen met de modellen: er moest een nieuw ingrediënt worden toegevoegd dat een versnellende uitdijing kon veroorzaken. Dit ingrediënt heeft de naam donkere energie gekregen, maar de aard hiervan is op dit moment een van de grootste raadsels in de natuurkunde. In de beste modellen voor de uitdijingsgeschiedenis bestaat het heelal momenteel voor ongeveer 5% uit 'normale' materie, aangevuld met 25% donkere materie en 70% donkere energie.

Groteschaalstructuur

Een alternatieve manier om de 'donkere' ingrediënten van het heelal te bestuderen is om te meten hoe materie in het uitdijend heelal zich gedraagt. Er treedt namelijk een instabiliteit op: gebieden die iets meer massa bevatten dan gemiddeld, trekken nog meer massa aan uit hun omgeving, waardoor fluctuaties in de dichtheid worden versterkt. Kleine fluctuaties in het vroege heelal leiden zo uiteindelijk tot grote massaconcentraties, zoals sterrenstelsels, die zich weer verzamelen in groepen en clusters. Donkere materie is het dominante ingrediënt van deze structuren. Tussen deze klonters van massa bevinden zich grote, ijle gebieden – voids genaamd – waar de dichtheid juist lager is dan gemiddeld. Deze 'groteschaalstructuur' wordt sterk beïnvloed door de donkere materie en de donkere energie. De materie versterkt de instabiliteit: hoe meer massa, hoe sterker de zwaartekracht en dus hoe sneller de samenklontering. De donkere energie daarentegen werkt als een soort rem, door de uitdijing voort te stuw en de massadichtheid te verlagen, waardoor de zwaartekracht afzwakt. Door te meten hoe de groteschaalstructuur is gegroeid, proberen kosmologen de effecten van de twee donkere componenten te onderscheiden. Daarbij worden reusachtige supercomputersimulaties

ingezet, waarin de evolutie van een heelal met een gegeven 'recept' van donkere materie, donkere energie en begincondities wordt doorerekend [3]. Door deze gesimuleerde heelallen te vergelijken met de waarnemingen kan de theorie getest worden en de juiste parameterwaarden van het heelal worden achterhaald. Klopt de groteschaalstructuur van het heelal met wat we verwachten voor 30% materie en 70% donkere energie, zoals de uitdijingsgeschiedenis suggereert? Kwalitatief lijkt het antwoord 'ja' te zijn. De verdeling van sterrenstelsels is gaandeweg in kaart gebracht met moderne instrumenten die in een paar jaar tijd miljoenen stelsels kunnen waarnemen. Deze driedimensionele kaarten lijken verbluffend goed op die voorspellingen, met inderdaad grote lege voids waartussen slierten van sterrenstelsels te zien zijn (figuur 2). Hoewel sterrenstelsels, die ontstaan als gevolg van de samenklontering van donkere materie, in grote lijnen de verdeling van donkere materie volgen, is er voor een precieze kwalitatieve vergelijking met de simulaties meer nodig: ook de verdeling van donkere materie moet in kaart gebracht worden, want die domineert immers de massa in het heelal. Het probleem is dat de donkere materie geen straling afgeeft of absorbeert en dus onzichtbaar is.

Zwaartekrachtlenzen geven een kijk op de donkere materie

De beste manier die tot nu toe is ontwikkeld om de totale massaverdeling in kaart te brengen, is het gebruik van de techniek van de *zwaartekrachtlenzen*, de afbuiging van lichtstralen door zwaartekrachtvelden (figuur 3). Het gaat om een subtiel effect, kleine vervormingen van de hemel als gevolg van afbuigingen van enkele honderdsten van een graad; maar sinds de jaren negentig van de vorige eeuw zijn er geavanceerde technieken ontwikkeld om dit soort lenswerking in hemelbeelden te herkennen en nauwkeurig te meten. Tegelijkertijd hebben geavanceerde breedbeeldcamera's op grote telescopen het mogelijk gemaakt om flinke delen van de hemel scherp in beeld te brengen, waardoor de zwaartekrachtlenswerking een krachtig nieuw onderzoeksgereedschap van de kosmologie geworden is. Een gedetailleerdere beschrijving van dit

SIGMA-8

De inhomogeniteit van de massaverdeling in het heelal is zichtbaar op alle schalen, van planetenstelsels tot de allergrootste schalen. In de kosmologie wordt standaard de amplitude van dichtheidsfluctuaties met de 'sigma-8' parameter aangegeven. Dit is de standaarddeviatie van de dichtheid in willekeurig geplaatste bollen met een straal van acht megaparsec (25 miljoen lichtjaar), gedeeld door de gemiddelde dichtheid van het heelal. Deze schaal van acht megaparsec is in de jaren tachtig van de vorige eeuw gekozen omdat toen bleek dat voor de verdeling van sterrenstelsels deze keuze leidde tot een handige waarde die dicht bij 1 lag.

fenomeen is te vinden in het artikel van Henk Hoekstra in dit nummer. Door de sterkte van de beeldvorming door verafgelegen en nabijere sterrenstelsels met elkaar te vergelijken, is het zelfs mogelijk om de evolutie van de groei van de groteschaalstructuur te meten. Hoe verder de stelsels van ons afstaan, hoe langer hun lichtstralen naar ons onderweg zijn geweest en dus hoe meer de afbuiging die ze ondervinden bepaald werd door de vroegere geschiedenis van de groteschaalstructuur. Licht dat van nabijere stelsels komt, daarentegen, is minder lang onderweg en is dus enkel beïnvloed door de recentere massaverdeling. Uit een soort tomografische analyse kan men dan bepalen hoe de groteschaalstructuur is geëvolueerd [5]. Die metingen kunnen dan weer vergeleken worden met de supercomputersimulaties. Het gaat bij kosmologische zwaartekrachtlenzen om typische afstanden tot zo'n acht miljard lichtjaar, dus dat betekent dat ongeveer de helft van de geschiedenis van het heelal toegankelijk is met dit soort waarnemingen.

Er zijn momenteel drie grote projecten gaande om de groteschaalstructuur te meten met behulp van zwaartekrachtlenzen: de Dark Energy Survey (DES) op de Amerikaanse Blanco-telescoop in Chili, de HyperSuprimeCam Survey (HSC) op de Subaru-telescoop in Hawaï, en de Kilo-Degree Survey (KiDS) op de VLT Survey Telescope van de Europese Zuidelijke Sterrenwacht ESO, eveneens in Chili (figuur 1). (Dit laatste project, onder leiding van de auteur, maakt gebruik van een grote 300-megapixel CCD-camera die gebouwd is met financiering van de Nederlandse Onderzoeksschool Voor Astronomie NOVA.)

Hoewel de waarnemingen nog niet voltooid zijn, hebben de drie teams al voorlopige resultaten uitgebracht, gebaseerd op een analyse van hun eerste data (figuur 4). Op grote lijnen bevestigen die de voorspellingen: de samenklontering van de materie komt overeen met de verwachtingen. Als maat voor de sterkte van de dichtheidsverschillen in het heelal gebruiken kosmologen de zogenoemde sigma-8

parameter, die dichtheidfluctuaties karakteriseert op een schaal van 8 megaparsec, ongeveer 25 miljoen lichtjaar (zie kader). De gemeten sigma-8-waardes (0,77 - 0,78) komen binnen 10% overeen met de voorspellingen aan de hand van de Planckwaarde (0,84), met een statistische 1-sigma meetonzekerheid van ongeveer 5%. Dit is opmerkelijk: de theorie slaagt er in om met een nauwkeurigheid van enkele procenten te voorspellen hoe de minieme beginfluctuaties uit het begin van het heelal, 13,4 miljard jaar geleden, zo'n factor duizend groeiden tot de huidige complexe groteschaalstructuur. Hetzelfde recept, dat nodig is om de uitdijingsge-

“De ontdekking was niet te rijmen met de modellen”

schiedenis te verklaren, geeft dus ook de correcte interne structuur van het heelal!

De kleine discrepantie tussen de voorspelde en gemeten sigma-8-waardes is op het randje van wat als statistisch significant kan worden beschouwd. De volgende resultaten van DES, KiDS en HSC zullen nauwkeuriger zijn en worden binnen een jaar verwacht: dan zal misschien duidelijk worden of de voorspellingen kloppen of dat er naar een verklaring van het verschil gezocht moet worden.

Open vraagstukken

Als er een verschil blijkt te zijn tussen de voorspelde en gemeten sigma-8, wat betekent dat dan? Kosmologen staan al klaar met een reeks mogelijke verklaringen. Als er geen subtiele fout in de (complexe) metingen gesloten is, moet de oplossing gezocht worden in de theoretische voorspellingen. Het is mogelijk dat de simulaties te simplistisch omgaan met de effecten die ster-

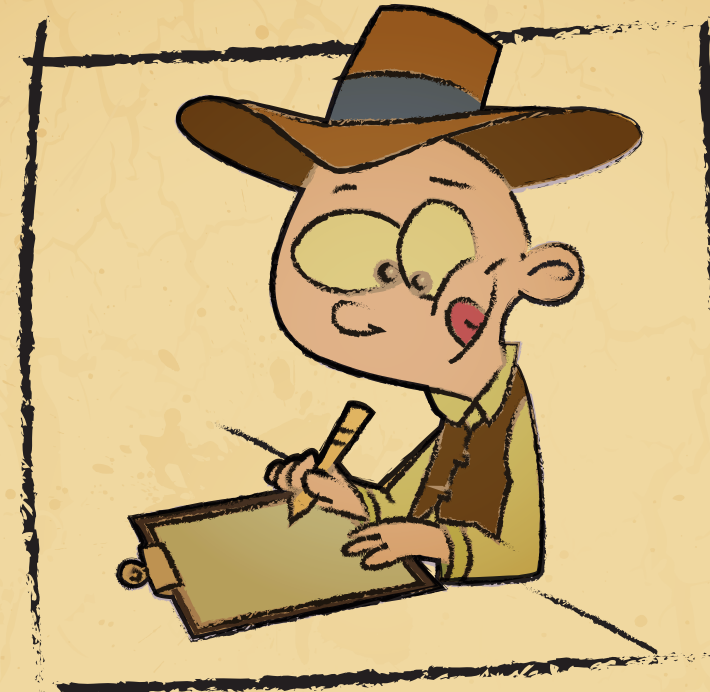
renstelsels op de groteschaalstructuur hebben. Massieve zwarte gaten blazen grote straalstromen uit en het zou kunnen dat het effect daarvan onderschat is. Het is ook mogelijk dat de donkere materie zich toch anders gedraagt dan de simpele 'koude donkere materie' die meestal wordt aangenomen: als er ingewikkelde stromingen in de begincondities zitten, zal dat de groei van de groteschaalstructuur ook beïnvloeden. Nog exotischere oplossingen kunnen liggen in de aard van de donkere energie, die ook een eigen dynamica zou kunnen hebben en bijvoorbeeld plots zou kunnen opkomen of verzwakken. Of misschien verraden de metingen zelfs de theorie van de zwaartekracht zelf: alle berekeningen zijn gebaseerd op Einsteins algemene relativiteitstheorie die zowel de afbuiging van lichtstralen als de samenklontering van materie voorspelt. Als die theorie verkeerd is dan kloppen de voorspellingen niet. Fundamentele aanpassingen aan de theorie zijn echter moeilijk voor te stellen: Einsteins theorie heeft veel verschillende testen doorstaan en het is niet eenvoudig om ergens een aanpassing door te voeren die niet elders fatale consequenties heeft.

Voorlopig is dit allemaal speculatie. Op dit moment blijft de aandacht gericht op de nieuwe metingen, die niet alleen talrijker maar ook steeds beter worden. Een volgend hoogtepunt zal de ESA-ruimtemissie Euclid worden, die van buiten de beeldverstorende atmosfeer, uiterst scherpe beelden zal terugsturen van bijna de hele hemel om het zwaartekrachtlenzenfenomeen met ongekende nauwkeurigheid in kaart te brengen. Euclid zal naar verwachting in 2022 gelanceerd worden, met de eerste resultaten enkele jaren daarna. Ondertussen ijveren we voort vanaf de aardse sterrenwachten om de donkere kant van het heelal verder te bestuderen.

REFERENTIES

- 1 Van Albada, T.S., Bahcall, J.N., Begeman, K., Sancisi, R., 1985, *AJ* 295, 305.
- 2 Riess, A.G., et al. 1998, *AJ* 116, 1009; Perlmutter et al. 1999, *AJ* 517, 565.
- 3 Springel, V., Frenk, C.S., White, S.D.M. 2006, *Nature*, 440, 1137.
- 4 Colless, M. et al. 2001, *MNRAS* 329, 1039.
- 5 Hildebrandt, H. et al 2017, *MNRAS* 465, 1454.

GEZOCHT SCHRIJFTALENT



BEN JE NATUURKUNDIGE EN ZIT JE MINIMAAL IN HET TWEEDE JAAR VAN JE PROMOTIE OF BEN JE GEPROMOVEERD NA 1 JANUARI 2016? DOE DAN MEE MET DE NTVN-PRIJSVRAAG EN SCHRIJF EEN ARTIKEL OVER JE PROMOTIEONDERZOEK VOOR HET NEDERLANDS TIJDSCHRIFT VOOR NATUURKUNDE. VOOR NUMMERS 1, 2 EN 3 IS EEN GELDBEDRAG BESCHIKBAAR VAN 1000, 750 OF 500 EURO!

STUUR JE INZENDING VÓÓR 1 DECEMBER 2018 NAAR NTVN@NTVN.NL.

MEER INFO: WWW.NTVN.NL/PRIJSVRAAG

€ 1000,- BELONING