Licht op de donkere materie met KiDS: de Kilo-Degree Survey

- **Het gangbare ΛCDM kosmologische model doet specifieke uitspraken over de mate van klonterigheid in de verdeling van de materie in het heelal.**
- **Met behulp van het gravitatielenseffect heeft het KiDS-project de verdeling van materie op kosmologische schaal in kaart gebracht.**
- **Volgens de eerste resultaten van KiDS lijkt de materieverdeling in het heelal minder klonteriger dan het ΛCDM-model voorspelt.**

Hoewel de kosmologie enorme stappen voorwaarts heeft gemaakt in de afgelopen decennia, blijven er grote open vragen. De belangrijkste is wellicht: waaruit bestaat het heelal? Op dit moment zijn we niet in staat hier een gedetailleerd antwoord op te geven. Donkere materie, waarvan de ware aard nog steeds onbekend is, bepaalt in hoge mate de groteschaalstructuur van het heelal. Het Kilo-Degree Survey-project doet onderzoek naar de verdeling van de materie in het heelal en komt tot resultaten die enigszins afwijken van wat het kosmologische standaardmodel voorspelt.

Door Koen Kuijken (Sterrewacht Leiden)

Om een sluitende beschrijving van een breed spectrum aan waarnemingen te maken, zetten kosmologen drie belangrijke 'jokers' in. Allereerst de *inflatietheorie*, die uitgaat van een ultrakorte periode van supersnelle uitdijing in het extreem jonge heelal. Inflatie verklaart waarom het heelal zo homogeen is op de allergrootste schaal en hoe kwantumfluctuaties verantwoordelijk zijn voor de kleine initiële fluctuaties waaruit een paar honderd miljoen jaar na de oerknal de eerste sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels ontstonden. Dan is er de raadselachtige *donkere energie*, die de huidige versnelling van de uitdijing van het heelal veroorzaakt, en *donkere materie*, die verantwoordelijk is voor de samenklontering van materie als gevolg van de aantrekkende werking van haar zwaartekracht. Samen vormen deze bestanddelen het *ΛCDM-model*: Λ (lambda) is de donkere energie, en CDM *cold dark matter*, een simpele vorm van donkere materie die enkel zwaartekracht voelt. Hoewel dit model zeer succesvol is, met name in het beschrijven van de fluctuaties in de kosmische achtergrondstraling (opgemeten met de Planck-missie van ESA), blijft het essentieel om het model op alle mogelijke manieren verder te testen en om te proberen meer uit te vinden over de drie mysterieuze ingrediënten (zie *Zenit* december 2020, blz. 12-15).

Lenswerking

Met dit doel is in 2006 het *Kilo-Degree Survey*-project (KiDS) opgezet. Met

Figuur 1. Computersimulatie van de verdeling van sterrenstelsels in het heelal. De sterrenstelsels zijn 'klonterig' verdeeld in clusters en superclusters, onderling verbonden door uitgestrekte filamenten en afgewisseld door relatief lege gebieden (voids). (Wikipedia/Andrew Pontzen, Fabio Governato)

een nieuwe breedbeeldcamera, gebouwd voor de speciaal hiervoor ontworpen VLT Survey Telescope (VST) op het Chileense Paranal-observatorium van de Europese Zuidelijke Sterrenwacht (ESO), maakt het KiDS-team een kaart van de verdeling van de donkere materie over meer dan 1000 vierkante graden van de hemel. Dit is mogelijk met de techniek van *zwakke gravitatielenzen*, het opmeten van de vervorming van verre sterrenstelsels aan de hemel als gevolg van de afbuiging van licht onder invloed van de zwaartekracht.

Zwakke lenswerking treedt op als een object wordt gezien door een inhomogeen optisch medium: alledaagse voorbeelden zijn een oud venster, een turbulente atmosfeer of het wateroppervlak van een zwembad. Het beeld (van de buitenwereld, een fonkelende ster of de bodem van het zwembad) wordt vervormd. Je kunt daarvan een foto maken en precies opmeten wat voor vervorming er optreedt. Met wat optica kun je dan reconstrueren hoe de lens lichtstralen afbuigt (en uitwerken hoe de dikte van het glas, de temperatuur van de atmosfeer of het oppervlak van het zwembadwater varieert). In de context van gravitatielenzen is het niet anders. Het optisch medium is in dit geval het zwaartekrachtveld in de kosmos tussen ons en de verre sterrenstelsels op de beelden van de hemel. Door nauwkeurig de vormen van de sterrenstelsels te meten kunnen we bepalen wat voor vervorming optreedt en hoe inhomogeen het zwaartekrachtveld is. Dan is het nog maar één stap om uit te werken hoe (on)gelijkmatig de materie die deze zwaartekracht veroorzaakt, is verdeeld.

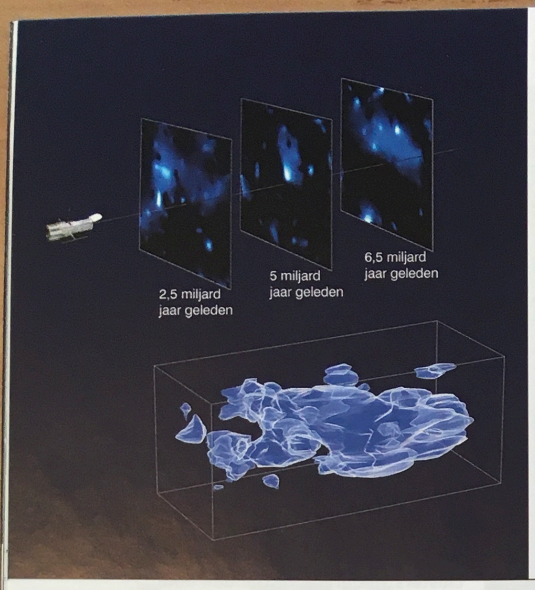
Omdat een beeld van een stuk van de hemel sterrenstelsels bevat op verschillende afstanden, is het mogelijk om ook een derde dimensie toe te voegen aan zo'n kaart van de verdeling van materie. Daarvoor maken we gebruik van *tomografie*. We verdelen de sterrenstelsels in groepen, al naargelang hun afstand tot ons (die we kunnen schatten aan de hand van de kleur van de stelsels, als gevolg van de roodverschuiving, veroorzaakt door de uitdijing van het heelal). De groep met de meest nabije stelsels bevindt zich achter een beperkt deel van het heelal en hun vervorming (veroorzaakt door de afbuiging van hun lichtstralen terwijl ze onderweg zijn naar ons) vertelt enkel iets over dit meest nabije heelal. De volgende groep stelsels ligt verder weg en hun lichtstralen worden beïnvloed door dezelfde materie als de eerste groep, maar ook door het deel van het heelal dat tussen beide groepen in ligt. Hetzelfde geldt voor de derde groep: die is gevoelig voor de materie tussen ons en groep 1, tussen groep 1 en 2 én tussen groepen 2 en 3; enzovoort. Tomografie is de techniek waarmee de werking van de opeenvolgende schillen van het heelal 'afgepeld' wordt, zodat een driedimensionale reconstructie van de verdeling van materie verkregen wordt (Figuur 2).

Die derde dimensie is extra betekenisvol in de kosmologie vanwege de eindige lichtsnelheid. Hoe verder weg een bron staat, hoe langer geleden het licht dat we opvangen is uitgezonden. De tomografische ontrafeling van de 3D-structuur geeft tegelijkertijd ook een beeld van de geschiedenis van die structuur. Dit is de crux van de kosmologische informatie die uit een tomografische gravitatielenskaart gehaald kan worden, want theorieën zoals ΛCDM voorspellen in detail hoe snel de groteschaalstructuur kan groeien over de leeftijd van het heelal (13,8 miljard jaar).

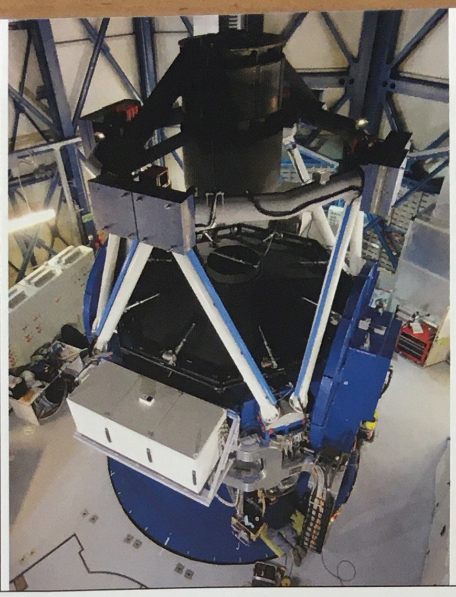
Golven

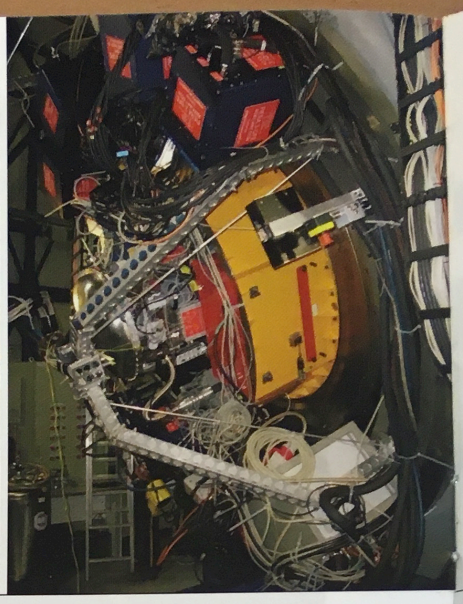
De groteschaalstructuur van het heelal kan worden vergeleken met de golven op een oceaan. Op elk moment zijn er golven met een breed spec-

Met de theorie kunnen we voorspellen hoe inhomogeen het heelal in het verleden geweest moet zijn en dat vergelijken met metingen.



Figuur 2. Door te kijken naar de vervorming van sterrenstelsels op verschillende afstanden, veroorzaakt door de zwaartekracht van de materie tussen ons en de stelsels in (boven), kan de verdeling van de materie in het heelal op grote schaal in kaart gebracht worden (beneden). (NASA, ESA/R. Massey (Caltech))





Figuur 3. Links de 2,6 meter VLT Survey-telescoop, waarmee de KiDS-kaart is gemaakt. Hoewel de vier 8 meter telescopen van de VLT een stuk gevoeliger zijn, hebben ze een kleiner beeldveld waardoor ze niet geschikt zijn voor het maken van een grote kaart. Rechts de OmegaCAM breedbeeldcamera aan de onderkant van de VST, waarmee de beelden op 300 miljoen gevoelige CCD-pixels geregistreerd worden. (ESO)

trum aan golflengtes (de afstand tot opeenvolgende koppen), van kleine golfjes van een centimeter tot oceaangolven met een golflengte van een kilometer of meer. Golven bewegen over het oppervlak en kunnen verschillende hoogtes (amplitudes) hebben. Op elke plek is de totale hoogte van het wateroppervlak de som van de hoogtes van alle golven daar. Als er geen wind of stroming is, verliezen de golven langzaam energie en wordt hun amplitude kleiner – het wateroppervlak wordt gladder. Maar als de golven worden aangejaagd stijgt de amplitude.

In de kosmos gaat het niet om de hoogte van een wateroppervlak, maar om de dichtheid van materie, zoals dat ook bij geluidsgolven in de lucht het geval is. Ook die wordt verstoord door golven, met een grote verscheidenheid aan golflengtes en amplitudes. En ook hier veranderen de amplitudes, met één belangrijk verschil: de amplitudes van de meeste golven stijgen met de tijd, waardoor de dichtheidsverdeling steeds rimpeliger – steeds meer geklonterd – wordt. Om bij de watergolvenanalogie te blijven: het is alsof een film van kolkend water dat tot bedaren komt, achterstevoren wordt afgespeeld (heel langzaam!). De reden voor die groei is de zwaartekracht, die ervoor zorgt dat gebieden met bovengemiddelde dichtheid materie uit hun omgeving aanzuigen, met als gevolg dat de pieken nog hoger worden en de dalen dieper. Hoe snel dit precies verloopt hangt af van zaken zoals de totale hoeveelheid materie (hoe meer materie, hoe sterker de zwaartekracht), hoe snel de materiedeeltjes bewegen (als die snelheden groot zijn heeft zwaartekracht er minder vat op) en hoe snel het heelal uitdijt (die uitdijing vergroot de afstand tussen deeltjes, wat de zwaartekracht verzwakt).

In de kosmische achtergrondstraling zijn de kiemen van die structuur in detail gemeten met de Planck-satelliet (*Zenit* december 2020, blz. 12-15). Met de theorie kunnen we voorspellen hoe inhomogeen het heelal in het verleden geweest moet zijn en dat vergelijken met metingen.

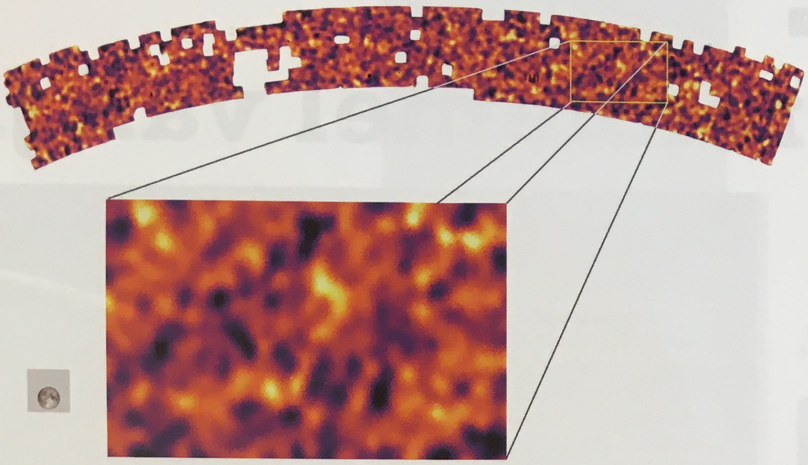
Ruwweg geldt dat de fluctuaties op de allergrootste schaal eerst ongeveer evenredig groeien met de uitdijing van het heelal en dat die groei versnelt wanneer de amplitude groot wordt. Dat betekent dat ook in de laatste 7 miljard jaar (de periode sinds het moment waarop het heelal ongeval half zou oud was als het nu is en die we het beste kunnen bestuderen met optische telescopen) de groteschaalstructuur is blijven groeien. Dit is precies de periode in de geschiedenis van het heelal die het KiDS-project wilde bestuderen.

KiDS

In principe is hiervoor een simpel soort data nodig. Het gaat erom de verdeling en vormen van sterrenstelsels in een groot volume van het heelal te bepalen. Dat betekent dat er scherpe afbeeldingen nodig zijn, over een breed deel van de hemel, om de vormen (en dus de vervormende werking van de gravitatielen-

OmegaCAM

OmegaCAM is de camera die de beelden van de VST registreert (Figuur 3). Gebouwd door een Nederlands-Duits-Italiaans team, onder wetenschappelijke leiding van Koen Kuijken, bestaat het instrument uit 36 CCD's – gevoeligere versies van de elektronica die ook in digitale camera's te vinden is – met een totaal van 368 miljoen pixels. Elke opname beslaat een stuk hemel zo groot als zes volle manen, met een fijne resolutie. Toen OmegaCAM in bedrijf werd genomen was het de grootste astronomische camera op het zuidelijk halfrond, maar sindsdien is hij voorbijgestreefd door de Dark Energy Camera (500 miljoen pixels) en de reusachtige 3,2 miljard pixel-camera op de Vera Rubin-telescoop die volgend jaar in gebruik wordt genomen.



Figuur 4. Een gedeelte van de KiDS-kaart van de verdeling van materie in het heelal. De kleinste vlekken in de kaart zijn zo'n 30 miljoen lichtjaar groot en bevatten talloze sterrenstelsels en donkere materie. Het contrast in deze kaart blijkt ongeveer 10% lager te zijn dan de verwachting op grond van het gangbare kosmologische model. Om een idee te krijgen van de grootte van de dichtheidsverschillen aan de hemel is de maan op dezelfde schaal afgebeeld.

zen) te kunnen bepalen. Ook moet er voldoende informatie over de kleur van de stelsels zijn, om hun afstand te kunnen schatten voor de tomografische analyse.

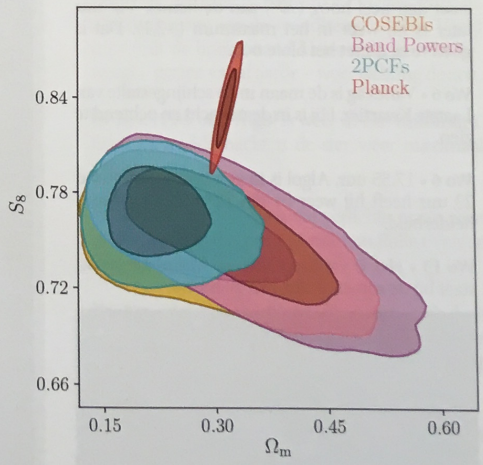
Om KiDS mogelijk te maken heeft ESO heeft meer dan 4000 uur waarneemtijd beschikbaar gesteld op de VST. Daarmee konden 1300 beelden van de hemel gemaakt worden, elk met een oppervlakte van 1×1 graad en in vier kleuren (ultraviolet tot ver-rood, golflengte 350 tot 900 nm). Met nog 2500 uur op de VISTA-telescoop, op een berg net naast Paranal en onderdeel van de ESO-sterrenwacht, werd hetzelfde gebied in vijf infrarode kleuren waargenomen om de tomografie nog verder te verbeteren. De waarnemingen begonnen eind 2011 en zijn in 2019 afgerond, als onderdeel van ESO's *public surveys* op deze twee telescopen. In totaal zijn meer dan 20 terabytes aan data vergaard. Afgelopen zomer werden voorlopige resultaten gepresenteerd, gebaseerd op meer dan tweederde van de data.

Of dit alles uiteindelijk tot een fundamenteel andere theorie leidt, is nog niet te zeggen.

Resultaten

De resultaten zijn intrigerend. Globaal bevestigen ze de voorspelling van ΛCDM, maar in detail verschillen de resultaten met de conclusies uit de analyse van de achtergrondstraling. Het lijkt er op dat de amplitude in de dichtheidsgolven ongeveer 10% lager is dan voorspeld, met een foutmarge van 3 à 4%. Hints voor deze meting waren al eerder gezien met andere, kleinere datasets, zowel van KiDS als van andere teams, maar de significantie van de meting is voor het eerst boven de grens van 3-sigma, een statistische maat voor de kans dat de afwijking op toeval berust. Hoe dit resultaat te interpreteren valt is nog niet duidelijk; een systematische fout in de data lijkt uitgesloten, net als een fout in de berekening van de ΛCDM-voorspelling. Mogelijk duiden de KiDS-resultaten op kleine barstjes in het model, en dan is het de vraag of die met een kleine aanpassing op te lossen zijn. Een optie zou een wat complexer gedrag van donkere materie dan de eenvoudige *cold dark matter* kunnen zijn. Of misschien gedraagt de donkere energie zich ingewikkelder dan de simpele kosmologische constante Λ. Ook de relatie met een andere discrepantie tussen het vroege en late heelal, gerelateerd aan de expansiesnelheid (de zogenoemde Hubble-constante), is niet duidelijk. Bepalingen van de Hubble-constante op basis van de kosmische achtergrondstraling vallen namelijk systematisch lager uit dan de bepalingen op basis van de roodverschuiving in de spectra van sterrenstelsels.

Of dit alles uiteindelijk tot een fundamenteel andere theorie leidt, bijvoorbeeld het vervangen van Einsteins algemene relativiteitstheorie door een nieuwe, is nog niet te zeggen. Voorlopig blijft de focus op de data; er zijn nog meer KiDS-data om te analyseren en in de komende paar jaar zullen ook andere projecten, op andere telescopen en met andere analysetechnieken, hun metingen presenteren. Iets verder in de toekomst zullen het Vera Rubin Observatory in Chili en de Euclid-satelliet van de ESA de kwaliteit en kwantiteit van dit soort metingen enorm verbeteren. Binnenkort zullen we veel meer weten! ●



Figuur 5. De resultaten van KiDS op basis van gravitatielenzen in het late heelal vergeleken met die van de Planck-missie aan de kosmische achtergrondstraling uit het vroege heelal. De parameters Ω_m en S_8 beschrijven de gemiddelde dichtheid van – voornamelijk donkere – materie in het huidige heelal, en de amplitude van de dichtheidsvariaties in de groteschaalstructuur. De Planck-metingen geven vrij precieze mogelijke waarden (dunne rode ellips), die nauwelijks overlappen met de conclusies van KiDS. De drie verschillende kleuren geven verschillende manieren aan om de data te analyseren, en laten zien dat dat voor de waarde van S_8 niet uitmaakt.