

Euclid en de donkere kant van het heelal

Figuur 1. Opname van IC 342, een spiraalstelsel dat in het vlak van de Melkweg ligt. Dankzij de waarnemingen in het nabij-infrarood kan Euclid dit sterrenstelsel in alle detail in kaart brengen. Afbeelding: ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, image processing by J.-C. Cuillandre (CEA Paris-Saclay), G. Anselmi; CC BY-SA 3.0 IGO.

In de afgelopen eeuw zijn we veel te weten gekomen over het heelal. We weten nu dat de zon een van de vele miljarden sterren is in de Melkweg, een sterrenstelsel dat zich over meer dan honderd lichtjaren uitstrekt. We weten hoe zwaar sterren zijn, hoe ze langzaam enorme hoeveelheden waterstof fuseren tot helium en hoe ze de energie die hierbij onder andere vrijkomt als licht wegstralen. We weten hoe sterren aan het eind van hun leven allerlei verschillende atomen maken en daarmee de ruimte om hen heen vervuilen. Dankzij dit kosmisch afval bestaan wij. Sterren zijn de bouwstenen van sterrenstelsels, maar als we krachtige telescopen op de hemel richten, zien we enorme aantallen sterrenstelsels, elk met miljarden sterren, die enorme structuren vormen in een uitdijend heelal. Dit alles begon ongeveer 13,6 miljard jaar geleden met de oerknal. Dit weten we niet alleen, maar we kunnen het dankzij moderne natuurkundige theorieën ook begrijpen.

Het bestaan van donkere energie en materie

Ons begrip begint echter te wankelen als we kijken naar de snelheden van sterren in onze Melkweg. Deze bewegen onder invloed van de zwaartekracht van het hele stelsel in een cirkelbaan om het centrum heen. De beweging van sterren kunnen we zo gebruiken als een sensor voor de zwaartekracht. We kunnen de zwaartekracht die alle sterren op elkaar uitoefenen ook berekenen. Als we de twee verschillende resultaten vergelijken, blijkt dat er een probleem is: de sterren bewegen sneller dan we op basis van de zichtbare materie zouden verwachten. We weten inmiddels meer dan vijftig jaar dat dit het geval is voor (bijna) alle sterrenstelsels. Is Einsteins algemene relativiteitstheorie – die de zwaartekracht beschrijft – aan vervanging toe? Of missen we iets? Inmiddels suggereert een grote verscheidenheid aan waarnemingen dat er extra – onzichtbare – materie aanwezig is. En niet een klein beetje ook: in termen van massa is er vijf keer zo veel ‘donkere materie’ als ‘gewone’ atomaire materie. De problemen zijn niet alleen beperkt tot de waarnemingen van sterrenstelsels. Zo is de nagloed van de oerknal zeer gedetailleerd in kaart gebracht door de Plancksatelliet en die metingen laten zien dat in het prille heelal – 380.000 jaar na de oerknal – de verschillen in de dichtheid van atomen miniem waren. Zo klein, dat er geen sterrenstelsels zouden moe-

ten kunnen vormen. Dat is evident onjuist. Sterker nog, dankzij steeds betere waarnemingen, het recentst met de James Webb-ruimtetelescoop (JWST), zien we de eerste sterrenstelsels al een paar honderd miljoen jaar na de oerknal verschijnen. Ook in het vroege heelal is er al een onzichtbare bron van extra zwaartekracht. Het indirecte bewijs voor het bestaan van donkere materie heeft zich in de afgelopen halve eeuw opgestapeld. Dit komt doordat we steeds betere astronomische waarnemingen kunnen doen. Daarentegen hebben experimenten om donkere materie te detecteren nog geen resultaten geboekt. Zonder direct experimenteel bewijs en een goede theorie blijft begrip van donkere materie een groot mysterie voor de hedendaagse natuur- en sterrenkunde. Echter, het is niet eens het grootste probleem. Het kan namelijk nog gekker... De algemene relativiteitstheorie voorspelt dat de uitdijning van een heelal dat gevuld is met materie (en energie) moet vertragen. Dankzij nieuwe krachtige telescopen konden astronomen in de jaren negentig van de vorige eeuw afstanden bepalen tot verre supernovae. Dit zijn exploderende witte dwergen die net zo helder worden als een compleet sterrenstelsel! Deze supernovae bleken echter verder weg te staan dan verwacht: het heelal was meer gegroeid dan verwacht. Door verschillende metingen te vergelijken werd duidelijk dat de uitdijning versnelt. Om dit te kunnen

verklaren is een nieuw ingrediënt nodig, nog vreemder dan donkere materie. We noemen het ‘donkere energie’, omdat het echt iets anders is. Maar wat het precies is, dat weten we niet. Een mogelijkheid is om het te associëren met de energiedichtheid van het vacuüm, maar dat leidt weer tot andere problemen. Tot op heden ontbreekt een goede verklaring. De huidige situatie is uitzonderlijk: de natuurkundige theorieën, die alle experimenten op aarde prima doorstaan, zullen moeten worden vervangen door een beter idee. Wetenschappers hebben verschillende alternatieven bedacht, maar hoe kunnen we beoordelen welke daarvan de juiste is? Hoewel (toekomstige) aardse experimenten een belangrijke rol zullen spelen, is het momenteel niet duidelijk hoe die de verschillende ideeën over donkere energie zouden kunnen testen, omdat waarneembare effecten vooralsnog te klein zijn om te detecteren. Betere waarnemingen van het heelal liggen daarom voor de hand, want daar is de invloed van donkere energie meetbaar. Maar op welke metingen moeten we ons richten? Hoe groter het heelal, hoe meer donkere energie er is terwijl de donkere materie over een groter volume wordt verspreid. De verhouding tussen de verschillende ingrediënten verandert dus. In het prille heelal was donkere energie verwaarloosbaar, maar sinds ongeveer vier miljard jaar is het de dominante component – inmiddels

neemt het 70% van de energiedichtheid van het heelal in – en versnelt de uitdijning. Deze veranderingen beïnvloeden de snelheid waarmee structuren kunnen vormen onder de invloed van de zwaartekracht. Het wordt steeds lastiger om grotere klompen sterrenstelsels bij elkaar te brengen als het heelal steeds sneller expandeert. Dit betekent dat de verdeling van materie, en hoe deze evolueert met de tijd, afhangt van de hoeveelheid donkere materie en donkere energie. Verschillende theorieën voorspellen een andere verdeling van donkere materie en sterrenstelsels. Deze voorspellingen kunnen we in principe vergelijken met onze waarnemingen.

We kunnen de groei van structuren in het heelal prima nabootsen in supercomputers. Met name de verdeling van donkere materie is goed te voorspellen. Maar hoe kunnen we dit vergelijken met onze waarnemingen? Donkere materie is immers onzichtbaar. Gelukkig schiet Einstein ons te hulp. De algemene relativiteitstheorie beschrijft namelijk dat materie de ruimtetijd doet krommen. Als we naar de grootste samenklontering van materie kijken, clusters van sterrenstelsels, dan zien we dat de afbeeldingen van verre sterrenstelsels vervormd zijn (zie figuur 2). Dit fenomeen wordt de zwaartekracht-lenswerking genoemd. De wiskunde is hetzelfde als voor optica, maar in dit geval zorgt de zwaartekracht voor de variatie in brekingsindex. In sommige gevallen kunnen we zelfs meerdere afbeeldingen van hetzelfde object waarnemen, maar dergelijke sterrenstelsels zijn zeldzaam. Samenklontering van donkere materie zorgen echter voor een subtieler effect dat we kunnen gebruiken om meer te leren over de duistere kant van het heelal.

Als we naar een willekeurig deel van de hemel kijken dan vervormen samenklontering van donkere materie nog steeds de afbeeldingen van verre sterrenstelsels. Het is echter nauwelijks zichtbaar, omdat sterrenstelsels in allerlei vormen en groottes voorkomen. Maar als we de vormen



Figuur 2. Een zeer diepe opname met de James Webb-ruimtetelescoop (JWST) van SMACS 0723, een cluster van sterrenstelsels. De vele rode objecten zijn andere sterrenstelsels die op grotere afstand staan. Hun afbeeldingen zijn vervormd door de donkere materie in het cluster. De JWST levert superscherpe foto's, maar het beeldveld is beperkt. Deze opname is zo groot als een zandkorrel op een armlengte afstand. Credit: NASA, ESA, CSA, STScI.

van grote aantallen sterrenstelsels middelen, dan kunnen we patronen in hun oriëntatie ontdekken: deze onthullen de verdeling van donkere materie. Deze zwakke lenswerking is niet zo spectaculair, maar is wel een van de beste manieren om modellen voor donkere energie te onderzoeken. We kunnen de nauwkeurigheid verder vergroten door de metingen te combineren met de posities van sterrenstelsels. Hiervan kunnen we de afstanden namelijk goed bepalen, hetgeen niet mogelijk is voor de verdeling van donkere materie langs de gezichtslijn. Op deze manier kunnen we veel beter bepalen hoe de verdeling van materie evolueert in een uitdijend heelal. Precies wat we nodig hebben om modellen voor donkere energie te vergelijken. Scherpe foto's vanuit de ruimte zijn

ideaal om de vormen van sterrenstelsels te meten. Vanaf de grond is dit veel lastiger, omdat turbulentie in de atmosfeer de afbeeldingen versmeert. Helaas is de JWST niet geschikt voor het onderzoek naar donkere energie, omdat het beeldveld te klein is: het is vergelijkbaar met de grootte van een zandkorrel op een afstand van ongeveer vijftig centimeter. Om flinke vooruitgang te boeken willen we ongeveer een derde van de hemel waarnemen, oftewel zes miljoen zandkorrels. Hiervoor hebben we een ruimtetelescoop nodig met een veel groter beeldveld: precies wat Euclid biedt!

Europese ruimtetelescoop Euclid

Euclid is een nieuwe ruimtetelescoop die in samenwerking met de



Figuur 3. Vergelijking van het beeldveld van Euclid met de grootte van de volle maan aan de hemel. Een enkele opname is meer dan honderd keer groter dan een opname met de Hubble-ruimtetelescoop terwijl de scherpte nauwelijks slechter is. Afbeelding: ESA/ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, S. Brunier. CC BY-SA 3.0 IGO.

European Space Agency (ESA) is ontwikkeld door een (grotendeels) Europees consortium van wetenschappers. Het voornaamste doel van deze missie is om meer te leren over de eigenschappen van donkere energie door de verdeling van sterrenstelsels en donkere materie in kaart te brengen. Om dit te bereiken is Euclid uitgerust met twee grote camera's. Een camera maakt scherpe foto's in het zichtbare deel van het spectrum, zodat we de vormen van verre sterrenstelsels nauwkeurig kunnen bepalen. Om alle metingen te doen voor de 1,5 miljard sterrenstelsels is het beeldveld bijna driehonderd keer groter dan dat van de JWST, zie figuur 3. Tegelijkertijd wordt het nabij-infrarode licht uiteengehaald in spectra zodat we de afstand tot ongeveer 25 miljoen sterrenstelsels

precies kunnen meten. Deze nabij-infraroodcamera neemt ook nog foto's door drie filters, die samen met diepe waarnemingen met telescopen vanaf de grond informatie geven over de afstanden tot de sterrenstelsels waarvan de vormen worden gemeten. Deze zijn namelijk niet helder genoeg om spectra te meten. Het resultaat is een enorme hoeveelheid data die unieke informatie zal leveren over de donkere kant van het heelal. De ontwikkeling van Euclid begon ongeveer vijftien jaar geleden, toen ESA op zoek was naar nieuwe ideeën voor ruimteonderzoek. In 2011 werd het project geselecteerd voor een traject dat tot lancering zou moeten leiden. Op 1 juli 2023 was het dan zo ver: Euclid werd vanuit Cape Canaveral door SpaceX met een Falcon 9 gelanceerd naar een baan op een afstand

van ongeveer 1,5 miljoen kilometer van de aarde. Dit is een speciale plek, waar de extra zwaartekracht van de aarde ervoor zorgt dat Euclid in een jaar om de zon draait, terwijl de temperatuurverschillen minimaal zijn. Dit is een bewuste keuze, omdat we willen voorkomen dat focusvariaties van de telescoop de metingen van de vormen beïnvloeden. Dankzij een zorgvuldige planning van de waarnemingen staat het zonneschild altijd onder een vergelijkbare hoek naar de zon gericht, waardoor veranderingen in de temperatuur minimaal zijn. Helaas bleek kort na lancering dat er ongewenst strooilicht op de camera viel. Verder onderzoek liet zien dat dit gereflecteerd zonlicht was: via een uitsteeksel van een stuwraket reflecteerde het zonlicht op de achterkant van het zonneschild en kon zo bij de instrumenten en dus de camera komen. Gelukkig bleek het mogelijk om de satelliet een paar graden te draaien, waardoor de stuwraket in de schaduw van het zonneschild terecht kwam en zo het strooilicht gereduceerd werd.

De foto's die Euclid maakt zijn alleen scherp als de telescoop helemaal stil hangt in de ruimte. Stralingsdruk door zonlicht zorgt ervoor dat we continu moeten bijsturen met behulp van stuwraketten. Bij het testen van de telescoop bleek dat hoogenergetische kosmische straling de metingen voor de stabilisatie verstoortte, waardoor de telescoop te veel bewoog tijdens een opname. Gelukkig kon ook dit probleem dankzij een software-update opgelost worden. Het resultaat is een krachtige nieuwe telescoop die de komende zes jaar een groot deel van de hemel op hoge resolutie kan gaan waarnemen. Om een idee te geven van de mogelijkheden die Euclid biedt, hebben we tijdens de opstartfase ongeveer 24 uur gereserveerd voor waarnemingen van fotogenieke objecten. Een aantal van deze *early release observations* zijn in november al vrijgegeven, zoals een enkele opname van het Perseuscluster (zie figuur 4) van sterrenstelsels. De grote, beige sterrenstelsels behoren bij deze grote samenklontering,



Figuur 4. Euclid-opname van het Perseuscluster van sterrenstelsels. De grote heldere sterrenstelsels behoren bij deze massale samenklontering, maar in deze foto zijn ook nog eens vijftigduizend verre sterrenstelsels zichtbaar. Als we inzoomen zien we hoeveel detail zichtbaar is dankzij de scherpste van de opnames. Dankzij het grote beeldveld van Euclid kunnen dergelijke grote structuren aan de hemel voor het eerst in groot detail worden onderzocht. Afbeeldingen: ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, image processing by J.-C. Cuillandre (CEA Paris-Saclay), G. Anselmi. CC BY-SA 3.0 IGO.

maar we kunnen in dit plaatje nog eens ongeveer vijftigduizend verre sterrenstelsels onderscheiden. Als we inzoomen zien we dat veel details in deze objecten duidelijk zichtbaar zijn, precies wat nodig is om de vormen van grote aantallen sterrenstelsels te kunnen meten. In totaal zal Euclid ongeveer zestigduizend van dergelijke foto's maken. We verwachten ook nog veel te leren over de verdeling van sterren in nabije sterrenstelsels, zoals IC 342 (zie figuur 1) en honderden vergelijkbare objecten. Deze voorbeelden zijn slechts een voorproefje van alle wetenschap die Euclid mogelijk zal maken. Dankzij

de diepe, scherpe waarnemingen in het nabij-infrarood verwachten we vele nieuwe objecten in het verre heelal te ontdekken, die vervolgens in meer detail met andere telescopen, zoals de JWST, onderzocht kunnen worden.

Inmiddels zijn alle instrumenten getest en gekalibreerd. Eindelijk is het moment aangebroken om te beginnen met de waarnemingen waarvoor Euclid is ontworpen. Op 15 februari zijn de eerste waarnemingen gedaan voor het onderzoek naar donkere energie. In de komende 2200 dagen zal Euclid een steeds groter deel van het heelal in kaart brengen. De eerste

opnames hebben al laten zien dat dit een schat aan nieuwe informatie zal opleveren. Euclid zal ons nog vele jaren bezighouden. Wie weet wat we nog allemaal gaan ontdekken?

Henk Hoekstra is hoogleraar observationele kosmologie bij de Sterrewacht Leiden. Daar houdt hij zich bezig met het in kaart brengen van de verdeling van donkere materie door middel van de zwakke zwaartekrachtslenwerking. Hij leidt de ontwikkeling van deze techniek voor Euclid, een nieuwe Europese ruimtetelescoop die een belangrijke stap voorwaarts is in het onderzoek naar de donkere kant van het heelal.
hoekstra@strw.leidenuniv.nl