

'Echt spul' of vreemde zwaartekracht?

Er heerst al jarenlang een tweestrijd onder astronomen en natuurkundigen. Is de mysterieuze donkere materie die diep in het heelal wordt waargenomen nu écht, of zien we de gevolgen van subtiele afwijkingen van de ons bekende zwaartekrachtswetten? In 2016 kwam de Nederlandse natuurkundige Erik Verlinde met een theorie van de tweede soort: emergente zwaartekracht. Nieuw onderzoek, deze week gepubliceerd in het tijdschrift *Astronomy & Astrophysics*, verlegt de grens van donkerematerie-waarnemingen tot in de onbekende buitenregionen van sterrenstelsels, en legt daarmee verschillende donkerematerie-modellen en alternatieve zwaartekrachttheorieën langs de meetlat.

Metingen van de zwaartekracht van 259.000 geïsoleerde sterrenstelsels tonen een bijzonder nauw verband aan tussen de bijdrage van donkere materie en die van gewone materie, zoals voorspeld in de emergente-zwaartekrachttheorie van Verlinde en een alternatieve theorie met de naam Modified Newtonian Dynamics. De resultaten lijken echter ook overeen te komen met een computersimulatie van het heelal, die uitgaat van donkere materie als 'echt spul'.



Afbeelding 1. Verschillende soorten sterrenstelsels. In het midden het elliptische sterrenstelsel NGC5982, rechts daarvan het spiraalvormige sterrenstelsel NGC5985. Deze twee soorten sterrenstelsels blijken zich heel verschillend te gedragen als het gaat om de extra zwaartekracht – en dus mogelijk de donkere materie – in de buitengebieden van de stelsels. Foto: Bart Delsaert (www.delsaert.com).

Het nieuwe onderzoek werd uitgevoerd door een internationale groep sterrenkundigen, onder leiding van Margot Brouwer (RUG en UvA). Verdere belangrijke rollen waren weggelegd voor Kyle Oman (RUG en Durham University) en voor Edwin Valentijn (RUG). Brouwer voerde in 2016 al een [eerste test van de ideeën van Verlinde](#) uit; dit keer sloot Verlinde zelf zich ook bij het onderzoeksteam aan.

Materie of zwaartekracht?

Donkere materie is nog nooit direct waargenomen – vandaar ook de naam. Wat astronomen aan de hemel zien zijn de *gevolgen* van mogelijk aanwezige materie: het afbuigen van sterlicht, het sneller dan verwacht bewegen van sterren, en zelfs effecten die de beweging van hele sterrenstelsels beïnvloeden. Dat al die effecten komen door extra zwaartekracht staat buiten kijf, maar de vraag is: zien we nu de gevolgen van daadwerkelijk aanwezige onzichtbare materie, of zijn het de wetten van de zwaartekracht zélf die we nog niet goed

begrijpen?

Om die vraag te kunnen beantwoorden gebruikt het nieuwe onderzoek eenzelfde methode als bij de eerste test in 2016. Brouwer en collega's maken gebruik van een al tien jaar lopend programma van digitale fotografische metingen met ESO's VLT Survey Telescope in Chili: de KiloDegree Survey (KiDS). Daarin wordt gemeten hoe sterlicht van ver weg gelegen sterrenstelsels onderweg door de zwaartekracht wordt afgebogen voordat het onze telescopen bereikt. Waar de metingen van zulke 'lenseffecten' in 2016 nog een gebied van zo'n 180 vierkante graden aan de hemel bestreken, is de reikwijdte inmiddels uitgebreid tot 1000 vierkante graden, waarmee nu rondom een miljoen verschillende sterrenstelsels de zwaartekrachtverdeling gemeten kan worden.

Vergelijkend warenonderzoek

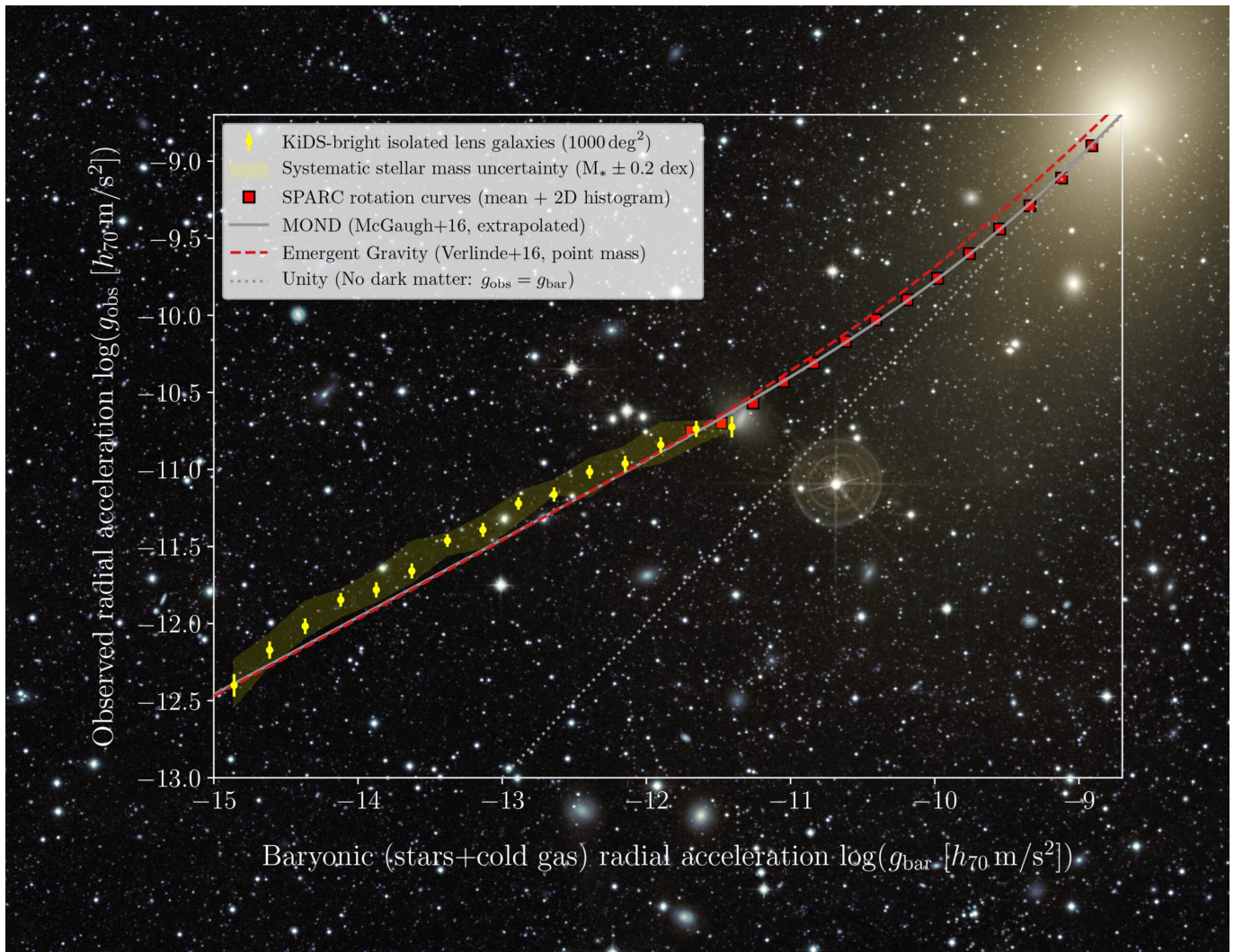
Brouwer en collega's selecteerden meer dan 259.000 geïsoleerde sterrenstelsels, waarvan ze de zogeheten 'Radial Acceleration Relation' (RAR) konden meten. De RAR vergelijkt de hoeveelheid zwaartekracht die men zou verwachten op grond van de zichtbare materie in een sterrenstelsel, met de hoeveelheid zwaartekracht die daadwerkelijk aanwezig is - oftewel: er wordt bepaald hoeveel 'extra' zwaartekracht er bestaat, bovenop die van de normale materie. Tot nu toe was die extra zwaartekracht alleen bepaald tot aan de buitenranden van sterrenstelsels door te kijken naar de beweging van sterren, en tot vijf keer daar voorbij met behulp van metingen van de draaisnelheid van koud gas. Met behulp van de lenseffecten van zwaartekracht slaagden deze onderzoekers er nu in om de RAR voor een honderd keer kleinere zwaartekracht te meten dan voorheen, en daarmee door te dringen tot in de veel verdere buitengebieden van sterrenstelsels.

Daarmee kon de extra zwaartekracht extreem goed gemeten worden - maar is die zwaartekracht nu een gevolg van onzichtbare donkere materie, of zijn het de zwaartekrachtwetten zelf die we moeten aanpassen? Auteur Kyle Oman geeft aan dat de aanname van 'echt spul' in elk geval deels lijkt te werken: "We vergelijken de metingen in ons onderzoek met vier verschillende modellen: twee waarin het bestaan van donkeremateriedeeltjes wordt aangenomen waarmee het heelal in computers wordt gesimuleerd, en twee waarin de zwaartekrachtwetten worden aangepast - het emergente-zwaartekrachtmodel van Erik Verlinde en de 'Modified Newtonian Dynamics', MOND. Een van

de twee donkerematerie-simulaties, MICE, doet voorspellingen die uitstekend in overeenstemming zijn met onze metingen. We waren verrast dat de voorspellingen van de andere simulatie, BAHAMAS, heel anders waren. Dat er überhaupt een verschil was kwam al als een verrassing, omdat de twee modellen veel overeenkomsten hebben. Maar bovendien hadden we verwacht dat, áls er al een verschil was, BAHAMAS het juist beter zou doen. BAHAMAS is een gedetailleerder model dan MICE, dat nauwkeuriger ons huidige begrip van hoe sterrenstelsels zich vormen in een universum met donkere materie benadert. Toch presteert juist MICE veel beter als we de uitkomsten met de metingen vergelijken. In de toekomst willen we aan de hand van wat we nu gevonden hebben nader onderzoeken wat de reden is voor het verschil tussen de simulaties.”

Jonge en oude sterrenstelsels

Daarmee lijkt dus ten minste één donkerematerie-verklaring wél te passen. Ook de alternatieve zwaartekrachtmodellen voorspellen echter de gemeten RAR. Gelijk spel dus, lijkt het, maar hoe weten we nu welk model écht klopt? Margot Brouwer, die het onderzoek leidde, vervolgt: “Na onze eerste tests concludeerden we dat de twee alternatieve zwaartekrachttheorieën en MICE redelijk overeenkwamen met onze waarnemingen. Het spannendste kwam echter nog: omdat we meer dan 259.000 sterrenstelsels tot onze beschikking hadden, konden we ze ook opsplitsen in verschillende types: relatief jonge blauwe spiraalvormige stelsels tegenover relatief oude rode elliptische stelsels.” Die twee typen sterrenstelsels hebben een heel verschillende vormingsgeschiedenis: rode elliptische stelsels ontstaan uit interacties tussen verschillende sterrenstelsels, bijvoorbeeld als twee blauwe spiralen langs elkaar scheren of zelfs samensmelten. Men verwacht binnen de deeltjestheorie van donkere materie dat de verhouding tussen normale en donkere materie in die twee typen sterrenstelsels kan verschillen. Modellen zoals die van Verlinde en MOND gebruiken daarentegen geen donkerematerie-deeltjes, en voorspellen daarom een vaste relatie tussen de verwachte en de gemeten zwaartekracht – onafhankelijk van het type sterrenstelsel. Brouwer: “We ontdekten dat de RAR voor de twee typen sterrenstelsels significant verschilde. Dat zou dus een sterke aanwijzing voor donkere materie als deeltje kunnen zijn.”



Afbeelding 2. Een grafiek van de Radial Acceleration Relation (RAR). Op de achtergrond een foto van het elliptische sterrenstelsel M87, om de afstand tot de kern van het sterrenstelsel aan te geven. De grafiek toont hoe de meetwaarden lopen van hoge zwaartekrachtsversnelling in het centrum van het sterrenstelsel, naar lage zwaartekrachtsversnelling ver buiten het sterrenstelsel. Afbeelding: Chris Mihos (Case Western Reserve University) / [ESO](https://www.eso.org/).

Maar er zit nog een addertje onder het gras: gas. Veel sterrenstelsels worden waarschijnlijk omhuld door een diffuse wolk heet gas, die heel moeilijk waar te nemen is. Als er rondom de jonge blauwe spiraalstelsels bijna geen gas zit, maar rondom de oude rode elliptische stelsels juist veel (met grofweg evenveel massa als de sterren), dan zou dat het verschil tussen de RAR van de twee typen sterrenstelsels kunnen verklaren. Om een definitieve uitspraak te doen over het gemeten verschil moet de hoeveelheid diffuus gas dus óók nauwkeurig worden gemeten – en laat dat nu net onmogelijk zijn met de KiDS-telescopen. Er zijn wel metingen

gedaan voor een kleine groep van zo'n honderd sterrenstelsels, waarbij inderdaad meer gas gevonden werd rond elliptische sterrenstelsels, maar het is nog de vraag hoe representatief die metingen zijn voor de 259.000 stelsels die in het huidige onderzoek werden bestudeerd.

Donkere materie op voorsprong?

Als blijkt dat extra gas het verschil tussen de twee typen stelsels níét kan verklaren, zijn de resultaten van de metingen met donkerematerie-deeltjes makkelijker voorstelbaar dan aan de hand van alternatieve zwaartekrachtmodellen. Toch is zelfs dan de wedstrijd nog niet gespeeld. Hoewel het verschil lastig te verklaren is binnen MOND, ziet Erik Verlinde nog wel een uitweg voor zijn eigen theorie. Verlinde: "Mijn huidige model is alleen toepasbaar op statische, geïsoleerde, bolvormige sterrenstelsels, en kan daarmee inderdaad de verschillende typen sterrenstelsels nog niet goed van elkaar onderscheiden. Ik zie deze resultaten dan ook als een uitdaging en inspiratie om aan de slag te gaan met een asymmetrische, dynamische versie van mijn theorie, waarin ook meegenomen kan worden dat sterrenstelsels met een verschillende vorm en vormingsgeschiedenis een verschillende hoeveelheid 'schijnbare donkere materie' hebben."

Zelfs met de nieuwe metingen is de strijd tussen donkere materie als deeltje en alternatieve zwaartekracht dus nog niet beslecht. Toch betekenen de resultaten een enorme stap voorwaarts: als het gemeten zwaartekrachtsverschil tussen de diverse soorten sterrenstelsels klopt, dan zal het juiste model, van welke soort ook, in elk geval nauwkeurig genoeg moeten zijn om dit te verklaren. Veel bestaande modellen zouden dan al direct de prullenbak in kunnen, en dat dunt het landschap van mogelijke verklaringen sterk uit. Daarbij vraagt dit onderzoek om systematische metingen van het hete gas rond sterrenstelsels. Edwin Valentijn formuleert het als volgt: "We hebben als waarnemers het punt bereikt waar we de hoeveelheid extra zwaartekracht rondom sterrenstelsels nauwkeuriger kunnen meten dan hun hoeveelheid zichtbare materie. De tegenstrijdige conclusie is dat we de aanwezigheid van normale materie in de vorm van heet gas rond sterrenstelsels nader zullen moeten onderzoeken, voordat we met toekomstige telescopen als Euclid het mysterie van donkere materie definitief op kunnen lossen."

Publicatie

[*The weak lensing radial acceleration relation: Constraining modified gravity and cold dark*](#)

[*matter theories with KiDS-1000*](#), M. Brouwer et al., *Astronomy & Astrophysics* 650, A113 (2021).