De zwaartekracht als entropische kracht

De natuurkunde komt er in de media vaak bekaaid af. Dat is niet verwonderlijk: er zijn nu eenmaal meer mensen geïnteresseerd in een kabinetscrisis dan in een nieuwe supergeleider. Toch dringen er zo nu en dan natuurkundige ontwikkelingen door tot de landelijke media. Het gaat daarbij meestal om experimentele resultaten: denk aan de persconferenties van het CERN over het Higgsdeeltje, of aan de metingen die zouden aantonen dat neutrino's sneller zijn dan het licht. Nog zeldzamer is het dat een onderwerp uit de theoretische fysica de landelijke bladen haalt. Wanneer dat gebeurt, moet er dus wel sprake zijn van een heel bijzonder en aansprekend idee. Voor Erik Verlindes entropische zwaartekracht geldt dat zeker.

Afbeelding 1. Erik Verlinde

Zwaartekracht: een vreemde eend in de bijt

De achtergrond bij dit verhaal zal de meeste fysici vertrouwd in de oren klinken. De

fundamentele theoretische natuurkunde rust op twee belangrijke peilers, de algemene relativiteitstheorie en de quantummechanica. Afzonderlijk doen die theorieën hun werk geweldig, maar zodra we ze willen combineren, bijvoorbeeld om de fysica van zwarte gaten of de oerknal te beschrijven, ontstaat er een probleem. Als we proberen volgens de bestaande recepten met een quantumversie van de zwaartekracht te rekenen, vinden we uitkomsten die allerlei onherstelbare oneindigheden bevatten.

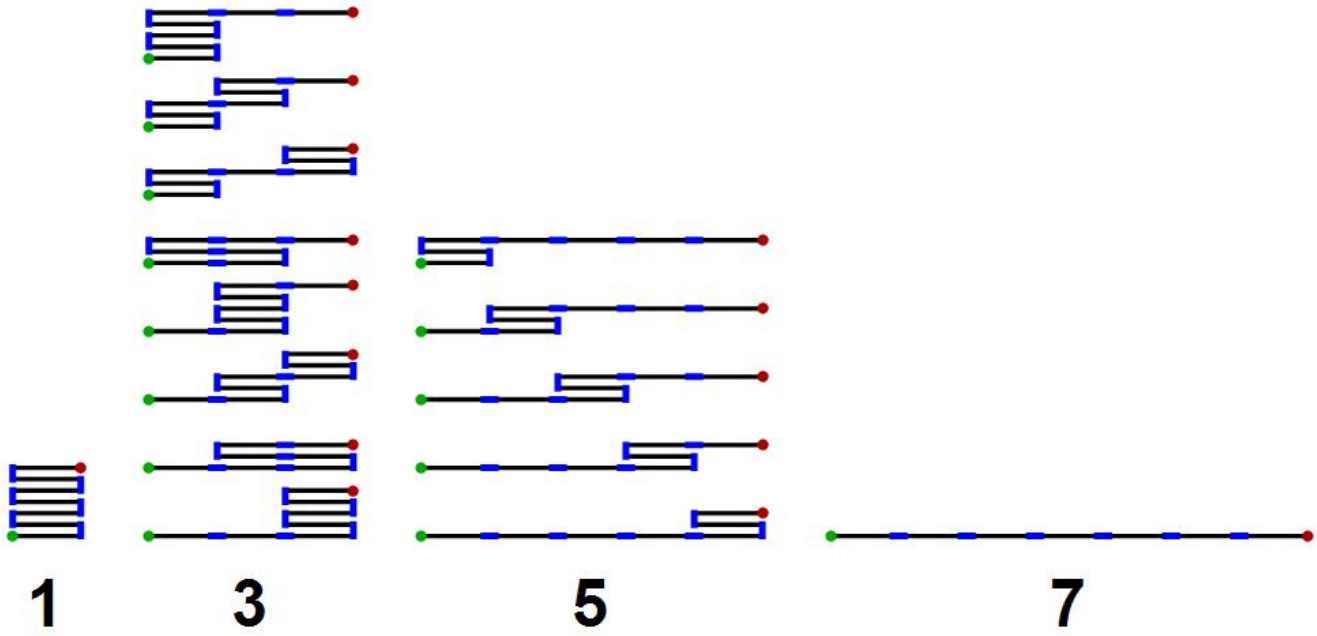
In de afgelopen halve eeuw is op allerlei manieren geprobeerd dit probleem te repareren, maar vooralsnog zonder doorslaand succes. Er bestaan natuurlijk theorieën die zowel de zwaartekracht als de quantummechanica bevatten – de snaartheorie is het bekendste voorbeeld – maar die theorieën brengen allemaal hun eigen problemen met zich mee. Een theorie van de quantumzwaartekracht die daadwerkelijk de natuur om ons heen beschrijft, is nog altijd niet gevonden.

Ook het idee van Erik Verlinde is overigens geen theorie van de quantumzwaartekracht in die zin. Wat de Amsterdamse natuurkundige doet in zijn inmiddels veelgeciteerde artikel “On the origin of gravity and the laws of Newton”, is een nieuwe manier opperen om over de zwaartekracht na te denken. Zijn idee is van toepassing op alle theorieën die de zwaartekracht en de quantummechanica bevatten, en gaat terug naar onze basisideeën over wat de zwaartekracht eigenlijk is. Verlindes idee in één zin: zwaartekracht is geen quantumkracht zoals de andere fundamentele krachten in de natuur, maar een zogeheten *entropische* kracht.

Entropische krachten

Elke natuurkundige leert al vroeg in zijn studie dat de natuur vier fundamentele krachten kent: de zwaartekracht, de elektromagnetische kracht en de sterke en zwakke kernkracht. De krachten die we in het dagelijks leven ervaren, zijn echter lang niet altijd directe manifestaties van die vier fundamentele natuurkrachten. Als een stevige windstoot ons bijna omverblaast, vergt het heel wat tussenstappen om die kracht terug te leiden op de vier basiskrachten. Hetzelfde geldt voor de kracht die een uitgerekt elastiekje uitoefent. Dergelijke krachten kunnen we omschrijven als *emergente* krachten: ze ontstaan uit de combinatie van een groot aantal factoren. Als we die factoren afzonderlijk bekijken, zien we de uiteindelijke kracht niet of nauwelijks terug.

Laten we het voorbeeld van een elastiekje wat beter bekijken. Elastiek is gemaakt uit polymeren – moleculen die bestaan uit een lange herhaling van gelijksoortige segmenten. De segmenten zijn rigide, maar de koppelingen ertussen zijn flexibel. We kunnen een polymeer dus in een model beschrijven als een reeks van staafjes die vrij om hun koppelpunten kunnen bewegen. We gaan er voor het gemak van uit dat op elk koppelpunt maar twee mogelijkheden zijn: het polymeer is volledig dubbelgevouwen, of het is volledig uitgestrekt. Wanneer we nu een groot aantal segmenten aan elkaar koppelen, kunnen configuraties van allerlei verschillende lengtes ontstaan. Niet alle lengtes zijn daarbij echter even waarschijnlijk.



Afbeelding 2. Een polymeerDe verschillende configuraties van een polymeer met zeven segmenten. We zien dat 3 de meest waarschijnlijke lengte is, gevolgd door 5. De lengtes 1 en 7 zijn erg onwaarschijnlijk. In deze afbeelding zijn alleen configuraties opgenomen waarin het ene eindpunt (groen) zich uiterst links bevindt, en het andere eindpunt (rood) uiterst rechts. Deze aanname is niet essentieel; andere aannames geven andere getallen, maar hetzelfde algemene beeld.

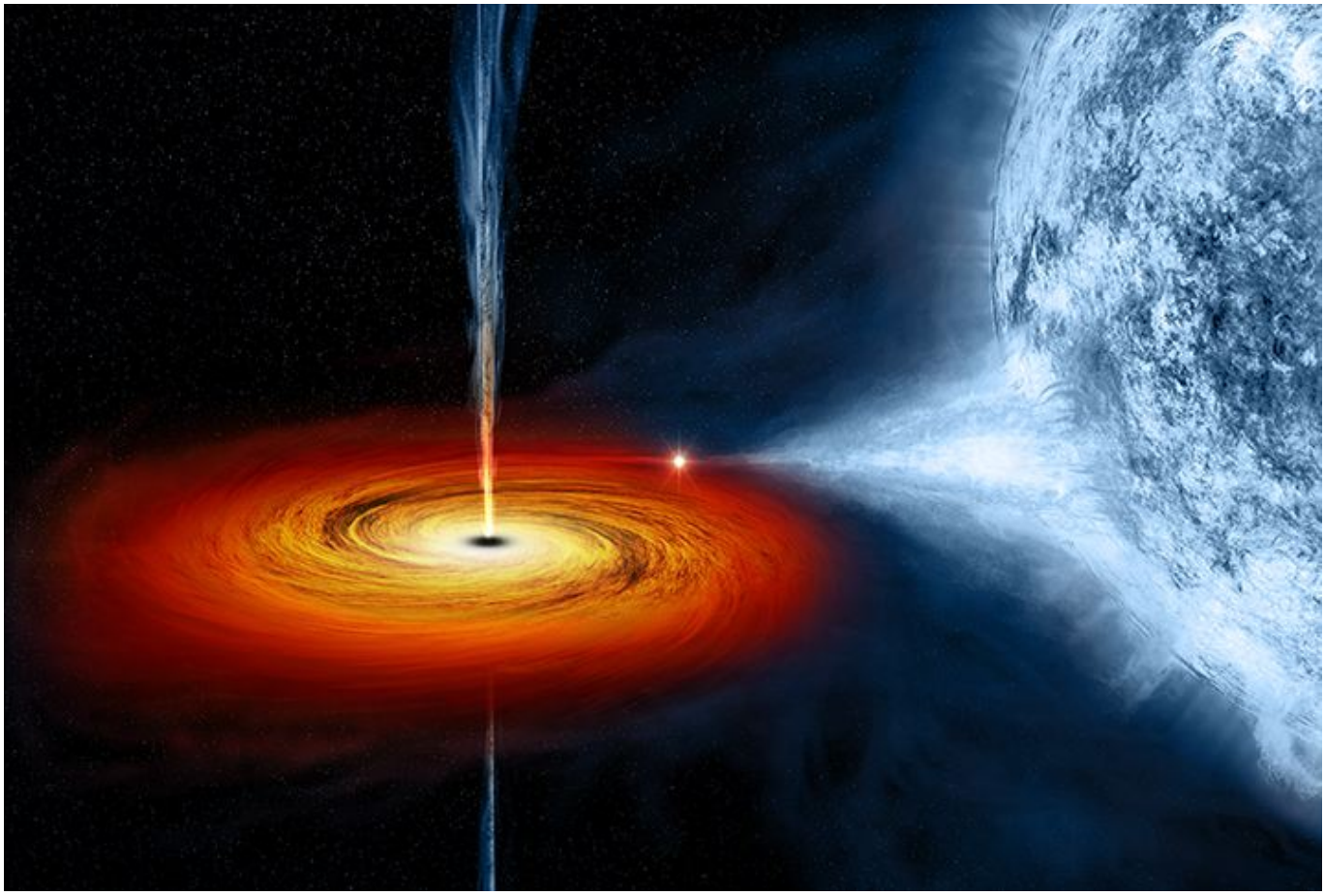
Afbeelding 2 geeft de configuraties weer van een polymeer met een totale lengte van zeven segmenten. Verreweg de meeste configuraties hebben een effectieve lengte van drie- of vijfmaal de lengte van een segment; de lengtes 1 en 7 komen elk maar in één unieke configuratie voor. Wanneer we het polymeer in een warme omgeving aan zijn lot overlaten, zal na korte tijd door trillingen en botsingen met luchtmoleculen en andere

polymeersegmenten een willekeurig gevouwen toestand ontstaan. Zoals we zien is de kans heel groot dat die toestand een lengte van 3 of 5 heeft. In echt rubber zal dit effect nog veel sterker zijn: een gemiddeld rubberpolymeer heeft enkele duizenden segmenten, en zal dus heel sterk de neiging hebben een bepaalde evenwichtslengte op te zoeken. Het resultaat is een emergente kracht: de kracht die we voelen als we een elastiekje uitrekken.

Wat hier plaatsvindt, is niets anders dan een manifestatie van de Tweede Hoofdwet van de thermodynamica. De *entropie* van een systeem waarop geen invloed van buitenaf wordt uitgeoefend – grofweg: de waarschijnlijkheid van de toestand waarin het systeem zich bevindt – zal altijd toenemen. In dit geval: als we een uitgerekt elastiekje loslaten, zal het terugveren naar zijn evenwichtstoestand. Emergente krachten zoals deze worden daarom ook *entropische* krachten genoemd.

Een nieuwe kijk op de zwaartekracht

Emergente verschijnselen en entropie spelen ook in de quantumzwaartekracht een belangrijke rol. Een bekend voorbeeld hiervan is het *holografisch principe*, dat terugvoert op ideeën uit de jaren zeventig van onder meer de Nederlandse Nobelprijswinnaar Gerard ’t Hooft. Uit werk van Stephen Hawking aan zwarte gaten was gebleken dat een zwart gat in een quantumbeschrijving niet alleen maar zaken opslokt, zoals klassiek wel het geval is. Een quantum-zwart gat straalt ook een minuscule hoeveelheid energie uit, en is daarmee een thermodynamisch systeem met een temperatuur en een entropie. Die entropie is echter niet evenredig met het *volume* van het zwarte gat, zoals bijvoorbeeld in een gas het geval is, maar met de *oppervlakte* ervan. Het is alsof de informatie die een zwart gat bevat niet over de hele inhoud, maar alleen over het oppervlak verdeeld is.



Afbeelding 3. Een zwart gatIn de klassieke theorie slokt een zwart gat alles op dat in zijn buurt komt. Quantummechanisch gezien straalt een zwart gat ook langzaam energie uit, en vormt zo een thermodynamisch systeem met een temperatuur en een entropie. (Afbeelding: NASA.)

't Hooft stelde voor om deze observatie heel letterlijk te nemen: wellicht was de beste beschrijving van een theorie van de quantumzwaartekracht er één in een dimensie minder, op een oppervlak in plaats van in een volume. Vandaar de naam "holografisch principe": de extra dimensie is, net als in een hologram, een emergent verschijnsel dat niet in de fundamentele theorie aanwezig is. Een belangrijke verificatie van het holografische principe kwam in 1997, toen Juan Maldacena liet zien dat bepaalde modellen in de snaartheorie zich inderdaad equivalent laten beschrijven als modellen zonder zwaartekracht in een dimensie minder.

Het idee van Erik Verlinde gaat een stap verder. Daarin wordt aangenomen dat niet alleen de ruimtetijd zelf, maar ook de zwaartekracht een emergent verschijnsel is. Dat is geen heel vreemde aanname: sinds Einstein weten we immers dat zwaartekracht en ruimtetijd heel nauw met elkaar verbonden zijn. Wat Verlinde aantoont, is dat de zwaartekracht in een

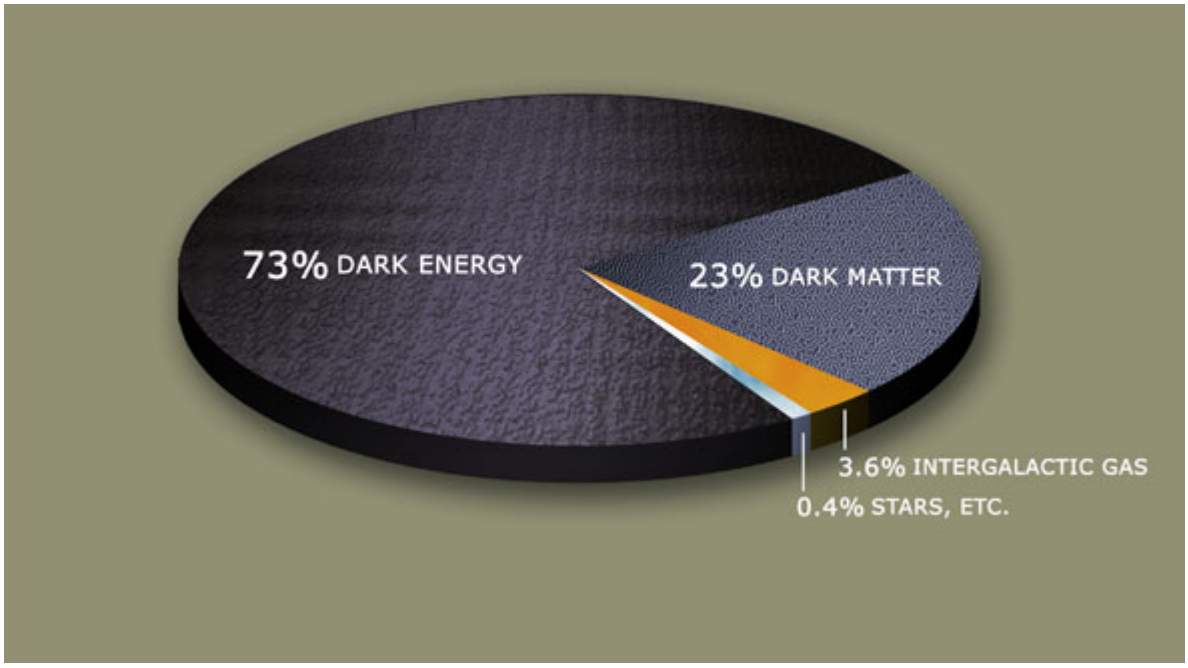
holografische beschrijving inderdaad gezien kan worden als een emergente, entropische kracht.

Bijvoorbeeld: als we een voorwerp in een zwart gat laten vallen, zal de grootte van het zwarte gat, en daarmee zijn entropie, iets toenemen. In een holografisch model kan deze redenering omgekeerd worden: de neiging van het systeem om de entropie te vergroten, leidt tot een proces dat in de hogerdimensionale theorie beschreven kan worden als zwaartekracht. Dit geldt niet alleen voor zwarte gaten: met wat eenvoudige rekenstappen kunnen uit de entropietoename voor willekeurige configuraties precies de bekende zwaartekrachtswetten van Newton en Einstein worden afgeleid.

Hoe nu verder?

Het is bekend dat het Newton al een doorn in het oog was dat zijn wetten de zwaartekracht wel goed *beschreven*, maar de mysterieuze “action at a distance” niet *verklaarden*. Waar “beschrijven” precies ophoudt en “verklaren” begint, is een vraag voor filosofen, maar het idee van Erik Verlinde laat ons in elk geval beter begrijpen waarom de zwaartekracht doet wat ze doet. De kracht is niets anders dan een manifestatie van het toenemen van entropie: de overgang van het heelal van minder waarschijnlijke toestanden in meer waarschijnlijke.

Verlindes afleiding van de zwaartekrachtwetten kan dus op zijn minst gezien worden als een filosofische stap voorwaarts. De vraag is natuurlijk: kunnen we er in de praktijk ook iets mee? Is het idee van de entropische zwaartekracht alleen een nieuwe manier om bestaande natuurwetten te beschrijven, of leidt het ook tot nieuwe resultaten?



Afbeelding 4. Donkere materie en donkere energieDe hoeveelheden gewone materie, donkere materie en donkere energie in het heelal. (Afbeelding: NASA.)

Het is nog te vroeg om hierop een definitief antwoord te geven, maar de voortekenen zijn gunstig. Zo kan het idee van de entropische zwaartekracht worden losgelaten op het heelal als geheel. We ontdekken dan dat het holografische warmtebad, dat van de zwaartekracht een entropische kracht maakt, zich in ons heelal manifesteert als een hoeveelheid extra energie en materie. Er kan vrij nauwkeurig geschat worden hoeveel extra materie en energie dit oplevert, en de uitkomsten liggen verrassend dicht bij de percentages donkere materie en donkere energie die in ons heelal worden gemeten.

Mogelijk kan het idee van de entropische zwaartekracht dus een verklaring geven voor de aanwezigheid van deze mysterieuze componenten in ons heelal. Wat het idee nog meer te bieden heeft, en hoe veel het ons verder op weg helpt naar een fundamentele theorie van quantumzwaartekrachtsverschijnselen in het heelal, zal de toekomst leren.

Het bovenstaande artikel verscheen oorspronkelijk in het juninummer van 2012 van N!, het tijdschrift van de Vereniging van Eindhovense Natuurkundig Ingenieurs en de studievereniging voor Technische Natuurkunde “Johannes Diderik van der Waals”. Onze hartelijke dank aan de redactie voor de toestemming om het artikel hier te reproduceren.