

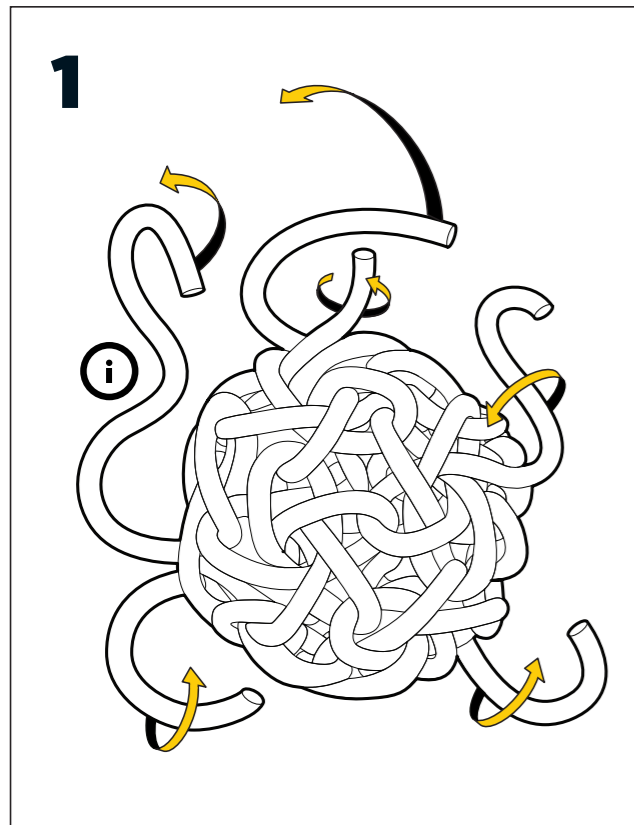
Een nieuwe HANDLEIDING voor de ZWAARTEKRACHT

Waar komt de zwaartekracht vandaan? De Nederlandse natuurkundige Erik Verlinde bedacht een complexe theorie om die vraag te beantwoorden. KIJK presenteert zijn idee als bouwpakket voor beginners. TEKST: BRUNO VAN WAYENBURG • ILLUSTRATIES: MR. PEN

Waarom vallen dingen? Isaac Newton beantwoordde deze vraag, en na hem Albert Einstein met zijn algemene relativiteitstheorie, en na hem duizenden theoretisch natuurkundigen met hun snaartheorie. Alleen past het antwoord nog altijd niet helemaal lekker bij de rest van de natuurkunde. Maar nu misschien wel, dankzij de Nederlandse theoretisch natuurkundige Erik Verlinde. Hij bedacht een nieuwe verklaring, waarin zwaartekracht geen fundamentele natuurkracht meer is. In januari 2010 plaatste de gevestigde wetenschapper een tekst online met de prikkelende titel *On the origin of gravity and the laws of Newton*. Het maakte een stroom van reacties en vervolpublicaties los, van uiterst sceptisch tot voorzichtig lovend. Verlinde publiceerde een iets aangepaste versie van zijn artikel in het *Journal of High Energy Physics* en kreeg de Spinozapremie van 2,5 miljoen euro om zijn idee (zelf spreekt hij liever nog niet van 'theorie') verder uit te werken. "Het kan nog wel enkele jaren duren voordat er precieze berekeningen en een verdere verduidelijking van alle concepten zijn", vertelde hij KIJK in een interview ter voorbereiding van dit verhaal. "Maar het gaat goed met het idee. Echt

onoverkomelijke bezwaren heb ik nog niet gehoord." Net als in het bewuste wetenschappelijke artikel, spuide Verlinde in dat interview een overdonderende stroom ideeën uit bijna de hele natuurkunde. Geen lichte kost, zelfs niet voor deskundigen. Wie het écht wil begrijpen, zal naast interesse ook het geduld en de toewijding moeten hebben die van de nieuweling een theoretisch natuurkundige maken. Een beetje zoals een meubelmaker jaren zwaluwstaarten en krukjes knutselt voordat hij aan zijn eerste hemelbed toe is. Maar voor de KIJK-lezer die daar geen tijd voor heeft, presenteren wij Verlindes nieuwe zwaartekrachttheorie hierbij als IKEA-meubel. Vijf losse onderdelen met een relatief simpel ontwerp, die de lezer zelf in elkaar kan passen. Compleet met cijfertjes die verwijzen naar de andere onderdelen. Wie alles mentaal aan elkaar weet te schroeven, snapt Verlindes idee. Althans, de instapversie: zwaartekracht is niet de fundamentele natuurkracht waar hij jaren voor is aangezien, maar een verschijnsel dat de som der delen ontstijgt. Een beetje als de druk van een gas, de files op de Nederlandse wegen of de romantische stemming bij een kaarslichtdiner: wel degelijk echt, maar nergens precies aan te wijzen in de losse onderdelen waaruit het ontstaat. ▶





Plancklengte. Dat is buiten het bereik van de allerkrachtigste deeltjesversnellers. Een van de kansrijkste pogingen tot een quantumtheorie van de zwaartekracht lijkt de snaartheorie, die stelt dat deeltjes kunnen worden vertegenwoordigd door kleine snaartjes die op verschillende manieren trillen, samenvloeden en splitsen. Maar een berekening of een nieuwe voorspelling die ook experimenteel is te controleren, heeft dit idee nog niet opgeleverd.

Emergentie is als een file, een zwerm spreekuilen of totaalvoetbal

Erger nog: waarnemingen die wél zijn gedaan, geven weer heel andere problemen. Zo gedragen sterrenstelsels zich alsof er grote concentraties onzichtbare, 'donkere' materie in aanwezig zijn. Ook raadselachtig is de afstotende 'donkere energie', nodig om de waargenomen versnelde uitdijing van het heelal te verklaren. Donkere materie neemt volgens schattingen 23 procent van alle massa-energie in het heelal voor zijn rekening, donkere energie zelfs 73 procent.

1

Zwaartekracht DE VREEMDE EEND

Het leek zo goed te gaan, eind jaren zeventig. Na jaren van experimenten in steeds grotere deeltjesversnellers en stevig doorpuzzelen door theoretisch natuurkundigen was de hele natuur verklaard op het niveau van elementaire deeltjes. Het resultaat was het standaardmodel: een setje oevergelijkingen dat op een A4-tje past. Volgens deze *executive summary* van de natuur bestaan er slechts 24 oerdeeltjes, en maar drie fundamentele wisselwerkingen of krachten tussen die deeltjes: de elektromagnetische kracht, de sterke (kern)kracht en de zwakke (kern)kracht. Die krachten worden overgebracht door nog weer vier krachtdeeltjes, en hoe dat precies in zijn werk gaat, wordt in verschillende smaken beschreven door de quantumveldentheorie.

We leken aardig op weg naar een Theorie van Alles. Behalve dan dat een vierde kracht zich totaal niet in het schema laat passen: de zwaartekracht, die ons met beide benen op de aarde houdt en zorgt dat die aarde om de zon draait.

In 1915, nog ver voor het standaardmodel, liet Albert Einstein zien dat die kracht uit te leggen valt als een vervorming van de ruimtetijd. Dat was heel elegant en bevredigend, maar zeventig jaar later bleek Einsteins ruimtekromming nauwelijks in quantumtaal te vatten. Experimenten bieden geen uitkomst: de resolutie waarbij zwaartekracht-quantumvelden verschijnen de kop op zouden steken, ligt bij afstanden van 1,6 maal 10^{-35} meter, de zogenoemde



2

2

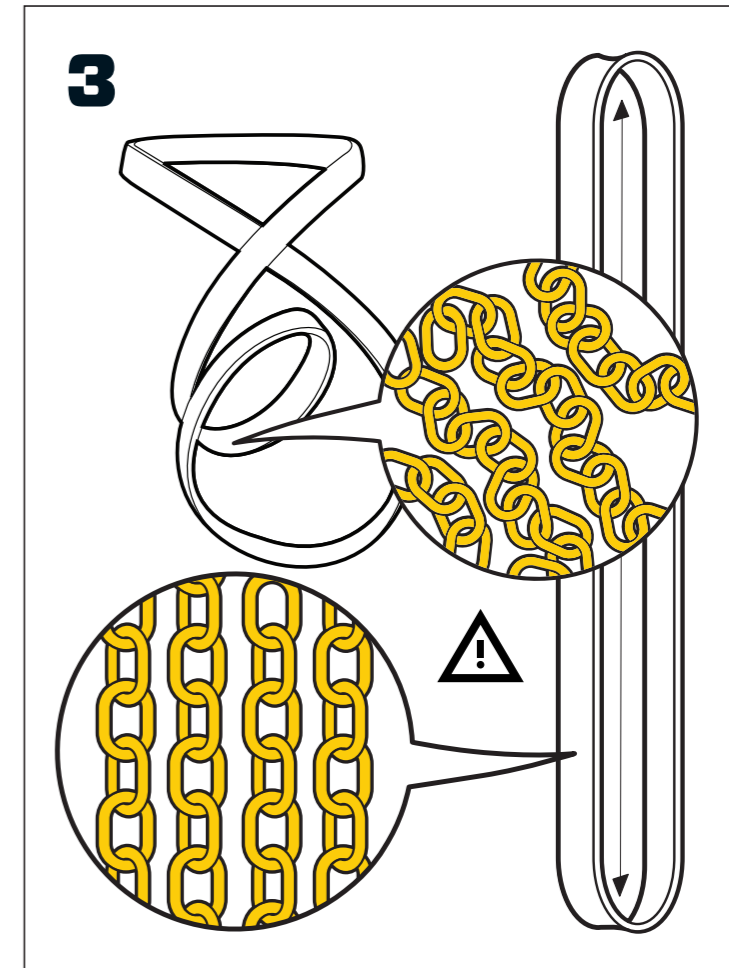
Emergentie DE SOM DER DELEN

Abstracter en ondoordringbaarder dan 'emergentie' klinkt natuurkundejargon zelden, maar het idee is eigenlijk simpel: wat is de druk van een enkele molecuul zuurstof? Je kunt pas spreken van druk, temperatuur en andere variabelen als je duizenden, miljoenen, miljarden maal miljarden moleculen bij elkaar hebt, die samen een constante kracht uitoefenen door miljoenen botsingen. Druk, kortom, is een emergent verschijnsel. Een beetje zoals een file, een zwerm spreekuilen of totaalvoetbal: het bestaat echt, maar valt niet te begrijpen als je alleen inzoomt op de losse onderdelen. Wat zijn de fileveroorzakende eigenschappen van een Ford Fiësta? De vraag is onzinnig: zo'n Ford rijdt doorgaans lekker door. Pas als je er een heleboel achter elkaar zet, doet er iets op dat eerst niet bestond: een file, een emergent verschijnsel. Ook natuurkrachten kunnen emergent zijn. Een voorbeeld is de trekkracht van een elastiekje, veroorzaakt door **entropie (3)**, zelf ook bij uitstek een emergent verschijnsel.

3

Entropie ALTIJD GROEIENDE WANORDE

Waarom veert een elastiekje terug als je het uitrekt? Om dezelfde reden dat een kamer waarin wordt geleefd vanzelf een rotzooi wordt. Een kamer kan maar op één manier volmaakt opgeruimd zijn (pen op zijn plek, laptop op zijn plek, elk boek op zijn plek), maar op miljoenen manieren rommelig: de pen kan op de vloer liggen, op de bank, enzovoort. Wanneer het leven in de kamer zijn loop heeft, wordt het geheel een rotzooi. Niet vanwege een fundamentele oerkracht, maar omdat er veel meer toestanden bestaan die 'rotzooi' heten dan nette toestanden. Deze rommelkamerwet is niets minder dan de tweede hoofdwet van de thermodynamica, die stelt dat de entropie in een systeem altijd toeneemt. Entropie is duidelijk een **emergente (2)** grootheid (een atoom heeft geen entropie), die correspondeert met het aantal verschillende toestanden dat gelijkstaat aan een bepaalde situatie. De entropie van de situatie 'rommelige kamer' is dus hoger dan die van 'nette kamer'. Entropie wordt daarom vaak omschreven als wanorde. Maar je kunt het ook informatie noemen: het omschrijven van een rommelige kamer ('rode pen ligt op de vloer, blauwe op de grond, Parker-pen in de plantenbak') kost meer bits dan de beschrijving van een ordelijke kamer ('alle pennen liggen in het pennenbakje'). En hoe zit het met dat elastiekje? Dat bestaat uit polymeren: lange ketens van aan elkaar gekoppelde



koolstofmoleculen. Het kost geen moeite, of energie, om een enkele keten uit te rekken: de koolstofmoleculen vormen soepel draaiende koppelingen. Een enkele keten is dan ook niet elastisch. Maar bij duizenden polymeerketens gaat entropie een rol spelen: voor duizenden ketens samen zijn er maar een paar manieren om helemaal uitgerekt te zijn, tegen miljoenen maal miljarden manieren om allemaal gezellig opgekronkeld te liggen. De entropie van het ingetrokken elastiekje is dus hoger. Dus volgens de tweede hoofdwet trekt het elastiekje, als je het uitrekt, terug. De trekkracht van het elastiekje is een **emergente (2)**, entropische kracht.

4

Zwarte gaten ZACHT GLOEIENDE ALLESOPSLOKKERS

Een eeuw na Einstein weet zo'n beetje iedereen wat er met iemand gebeurt die in een zwart gat valt. Als je eenmaal voorbij de waarnemingshorizon bent, het *point of no return*, is er geen redding meer mogelijk: zelfs licht ontsnapt niet over die fatale grens. Van de buitenkant gezien is de waarnemingshorizon het donkere oppervlak van het zwarte gat. Maar wat gebeurt er dan met de entropie of de informatie die

opgeslagen is in voorwerpen die in het zwarte gat vallen? Verdwijnt die ook? Dat zou gek zijn: volgens de tweede hoofdwet kan de **entropie (3)**, anders gezegd de hoeveelheid informatie, in het heelal immers alleen maar toenemen.

Met deze zwarte-gaten-informatieparadox hebben theoretisch natuurkundigen lang geworsteld, wat leidde tot een reeks verrassende ontdekkingen. Zo berekende Stephen Hawking in 1974 dat zwarte gaten quantummechanisch bekeken niet helemaal zwart zijn: de waarnemingshorizon lekt een beetje straling. Voortbordurend hierop wist zijn collega Jacob Bekenstein ook de entropie van een zwart gat te berekenen. Als je het oppervlak daarvan neemt, gemeten in vierkante Plancklengtes (een bizar kleine maat van 10^{-70} vierkante meter) en je deelt dat door vier, krijg je de entropie, gemeten in bits.

De tweede hoofdwet was gered: de entropie ging niet verloren, want zwarte gaten hebben zélf een entropie, die groeit als er iets invalt. Zwarte gaten hebben zelfs heel veel entropie: een zwart gat van 1 centimeter doorsnee heeft even veel entropie als 10 kubieke lichtjaar water. Maar wat betekent dat?

Een mogelijke interpretatie is deze: als je aanneemt dat het zwarte gat door een onderliggende, microscopische theorie wordt beschreven, bijvoorbeeld de

snaartheorie, zijn er erg veel microconfiguraties mogelijk die overeenkomen met het zwarte gat. De **entropie (3)** geeft precies aan hoeveel configuraties. Er zijn gewoon enorm veel verschillende knoedels snaren die je 'een zwart gat met een doorsnee van een centimeter' kunt noemen.



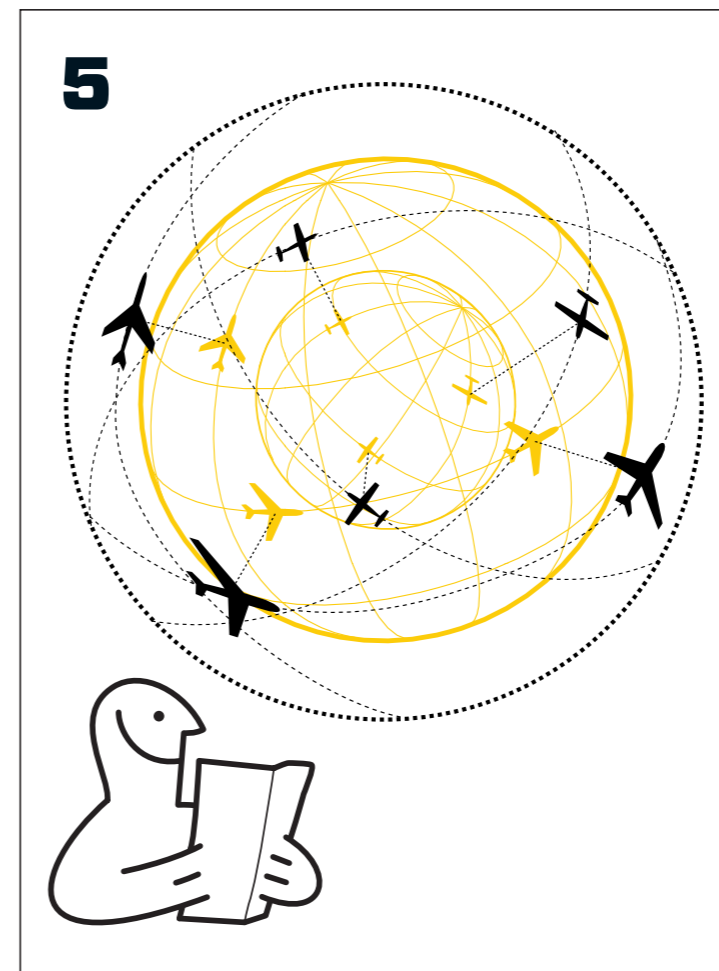
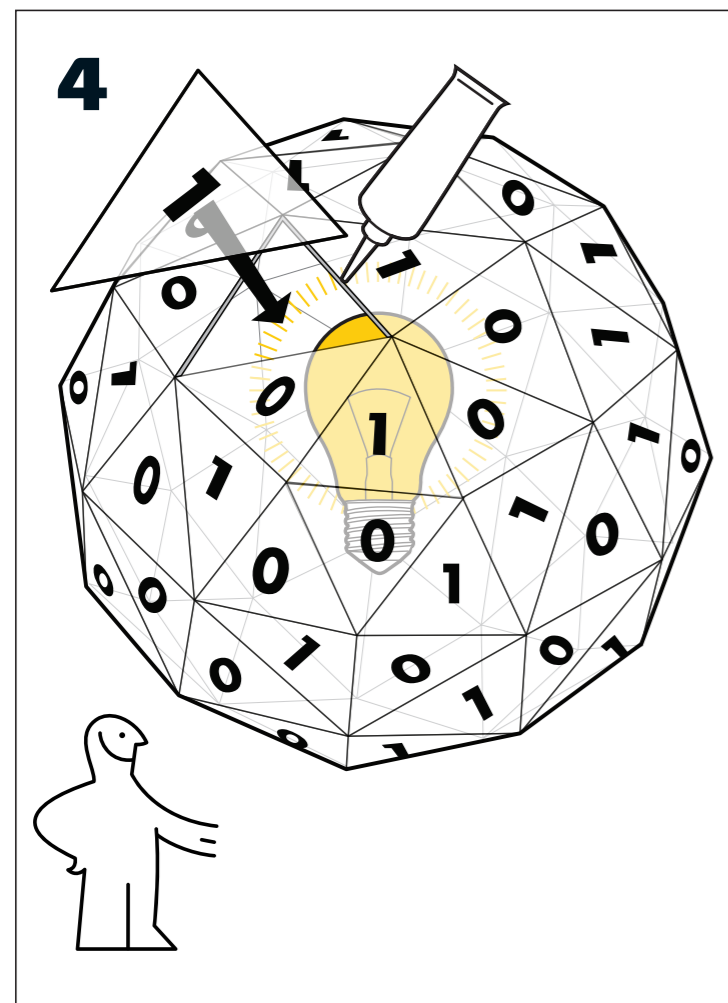
Hologrammen EEN GRATIS DIMENSIE

Zwarte gaten (4) zetten ook Gerard 't Hooft, de Nederlandse Nobelprijswinnaar in de natuurkunde, aan het denken. De **entropie (3)** (dus de informatie-inhoud) van een zwart gat was weliswaar extreem hoog, maar het was wel wat vreemd dat die evenredig was aan het *oppervlak* en niet aan het *volume*, zoals bij gewone materie geldt. Dit bracht 't Hooft tot zijn holografisch principe: alle informatie die nodig is om de natuurkunde binnen een bepaald volume te beschrijven, past op de schil om dat volume heen, gemeten in bitjes per

Niet de zwaartekracht veroorzaakt de entropietoename, maar andersom

vierkante Plancklengte. Niet alleen bij zwarte gaten, maar bij elk volume in de ruimte. Dit idee is vergelijkbaar met een hologram. Dat is een platte, tweedimensionale plaat met daarop optische gegevens die – als je ze onder de goede belichting bekijkt – een driedimensionaal beeld geven.

In 1997 kreeg het holografisch principe een concreet voorbeeld (nou ja, concreet... Voor theoretisch natuurkundigen dan). Juan Maldacena bedacht een vierdimensionaal modelheerl met een Einstein-achtige zwaartekracht en een quantumveldentheorie die zich afspeelde op de driedimensionale schil van dat modelheerl. Het verrassende was dat hij kon aantonen dat de gebeurtenissen en natuurwetten in het ene heerl één op één konden worden afgebeeld op het andere heerl. Afgezien van een wiskundige transformatie waren beide theorieën dus in essentie hetzelfde. Na Maldacena's heerl volgden er meer voorbeelden; ook tweedimensionale schillen die driedimensionale heerllen beschreven. Niet alleen gaf dat een bruikbare parallel tussen zwaartekrachttheorieën en quantumveldentheorieën, het was ook een mooi voorbeeld van het holografisch principe. Maar hoe kan het dan dat het heerl een dimensie meer heeft dan de schil die het beschrijft? Die extra dimensie rolde eigenlijk vanzelf uit de tweedimensionale quantumveldentheorie op de schil, door de gebeurtenissen daarin op verschillende schalen te bekijken. Verschijnselen op grote schaal hebben relatief weinig te maken met gebeurtenissen op kleine schaal. Vergelijk het met de gebeurtenissen op verschillende lengteschalen op een landkaart van de aarde: het vormen van hoopjes zand op een strand staat los van de contacten tussen de continenten. De



verschillende schalen 'leven' min of meer langs elkaar heen, zoals vliegtuigen op verschillende hoogtes dat ook doen. In die zin kan schaalgrootte in bepaalde gevallen, waaronder Maldacena's universum, een dimensie zijn: een **emergente (2)** dimensie.

Finale VERLINDES IDEE

Nu zijn we klaar om de bouwstenen **(1)** tot en met **(5)** samen te voegen tot Verlindes idee. Neem de horizon van een **zwart gat (4)**. Volgens Bekenstein is de **entropie (3)**, ofwel de hoeveelheid informatie die op die horizon is opgeslagen, evenredig aan het oppervlak. Gooi er een testmassa in, en het zwarte gat wordt iets zwaarder. Het oppervlak van het zwarte gat groeit, en dus neemt ook de entropie iets toe. Verlinde keert dat om. Niet de **zwaartekracht (1)** veroorzaakt de entropietoename, maar andersom. Net als het **elastiekje (2, 3)** waar geen oerkrachten een rol spelen, maar een hang naar meer wanorde. Dat klinkt als een leuk ideeetje, maar de rand van een

zwart gat is natuurlijk geen doorsneeplek. Daarnaast werkt zwaartekracht ook op andere plaatsen, waar geen zwart gat te bekennen is. Maar het **holografisch principe (5)** slaat óók niet alleen op zwarte gaten, en Verlinde maakt de holografische schermen tot basisingrediënt van zijn theorie. Wat de precieze onderliggende microscopische theorie ook is, volgens het holografisch principe kun je de informatie die ermee gepaard gaat samenvatten op het tweedimensionale scherm dat het volume omspant.

En net als bij de **extra dimensie (5)** in het Maldacena-heerl rolt er een extra, **emergente (2)** dimensie uit de microscopische theorie op het scherm als je de informatie op verschillende schalen bekijkt. Je kunt die dimensie opvatten als loodrecht op het scherm, de derde dimensie dus: ook de ruimte waarin wij leven is – lastig voor te stellen, inderdaad – emergent. Een deeltje dat langs deze vers ontstane ruimtecoördinaat naar een massa toe beweegt, schuift door de schaalgroottes heen. Het aantal microscopische toestanden dat daarmee overeenkomt, de **entropie (3)**, zal dus toenemen. Precies zoals de tweede hoofdwet wil, en net als bij het elastiekje. Het gevolg is een emergente kracht: de zwaartekracht.

Verlinde rekent met relatief eenvoudige natuurkunde uit hoe sterk die kracht zou moeten zijn, evenredig met de testmassa, en ook met de massa die door het scherm omsloten wordt. En omgekeerd evenredig met de afstand. Precies als bij Newton, maar dan met onderbouwing.

Epiloog WORDT ER OOK NOG WAT VOORSPELD?

Als het idee van Verlinde overeind blijft en uitgroeit tot een echte theorie, is het er een die extreem zuinig is met aannames: zelfs de precieze aard van de onderliggende microscopische theorie is niet echt belangrijk, zegt Verlinde, "of het nou snaartheorie is of iets anders." Maar een andere eis aan een theorie is natuurlijk dat deze nieuwe, te testen voorspellingen oplevert. Hoewel een echt experiment volgens Verlinde heel moeilijk te ontwerpen zal zijn, is er een berekening die je wel degelijk kunt opvatten als een voorspelling: "Als ik hiermee aan de slag ga, kom ik iets tegen dat je kunt interpreteren als donkere materie, en dat goed klopt met de metingen in sterrenstelsels", zegt hij. "Dat is voor mij een van de tekenen dat ik op de goede weg ben."

Wetenschapsjournalist Bruno van Wayenburg studeerde theoretische natuurkunde. Voor dit artikel interviewde hij prof. dr. Erik Verlinde (Universiteit van Amsterdam) en raadpleegde hij de volgende literatuur:

- Jacob Bekenstein: *Information in the holographic universe* | Scientific American (juli 2003)
- Juan Maldacena: *The illusion of gravity* | Scientific American (november 2005)
- Leonard Susskind: *The world as a hologram* | Journal of Mathematical Physics (1995)
- Erik Verlinde: *On the origin of gravity and the laws of Newton* | Journal of High Energy Physics (2011)

Links naar meer informatie vind je op www.kijk.nl/artikel/verlinde