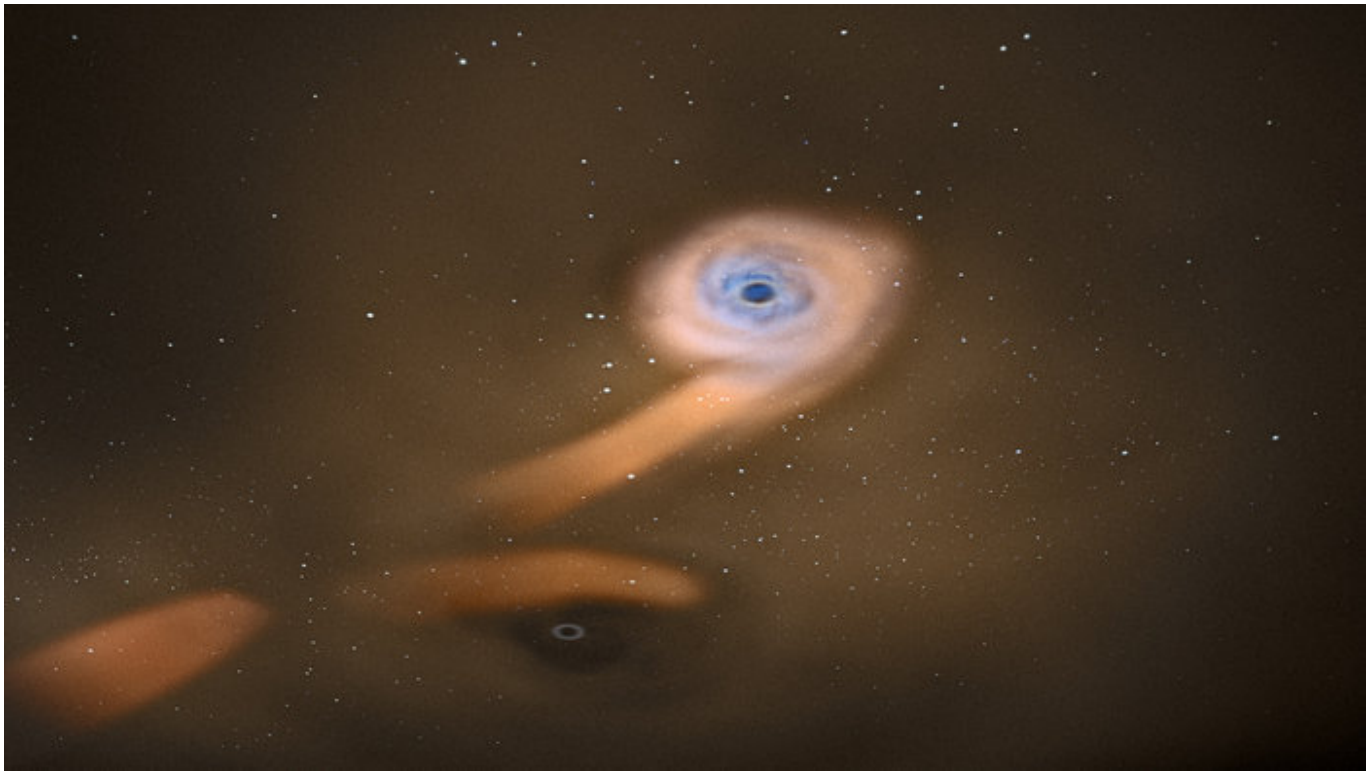
Snaren en holografie (16): Zwaartekracht en entropie

In de voorgaande artikelen van dit dossier hebben we gezien dat de begrippen entropie en zwaartekracht veel met elkaar te maken hebben. Dat is een verrassend resultaat, want entropie is een begrip uit de thermodynamica: een theorie die op het eerste gezicht totaal andere natuurkunde beschrijft dan de zwaartekracht. Is de wiskundige overeenkomst tussen thermodynamica en zwaartekracht louter toeval, of is komt hier een belangrijk gegeven over de fundamentele natuur aan het licht?

In dit artikel:

- Entropie en zwaartekracht
- Van Clausius naar Einstein
- Van entropie naar zwaartekracht
- Toeval of diepzinnige waarheid?



Afbeelding 1. Zwarte gaten.Een artist impression van twee zwarte gaten. Sinds de jaren ’70 weten we dat de zwaartekrachtwetten die het gedrag van zulke zwarte gaten beschrijven allerlei thermodynamische eigenschappen hebben. Afbeelding: ESA – C. Carreau.

Entropie en zwaartekracht

Wie deze website al een tijdje volgt, zal het opgevallen zijn dat begrippen uit de thermodynamica en de zwaartekracht regelmatig in één artikel genoemd worden. Om enkele voorbeelden te geven:

- Stephen Hawking toonde in de jaren ’70 aan dat zwarte gaten, de sterkste bronnen van zwaartekracht die we kennen, straling uitzenden, en dat die straling een bepaalde temperatuur heeft.
- Hawking toonde bovendien samen met Jacob Bekenstein aan dat we aan zwarte gaten een entropie kunnen toekennen – een grootheid die normaalgesproken gebruikt word om de hoeveelheid ‘microscopische informatie’ in thermodynamische systemen te kwantificeren. Deze entropie blijkt (in slim gekozen eenheden) gelijk te zijn aan het oppervlak van de horizon van het zwarte gat.
- Het blijkt zelfs mogelijk om voor zwarte gaten drie ‘hoofdwetten’ te formuleren die precies overeenkomen met de hoofdwetten van de thermodynamica.

- De overeenkomsten gelden niet alleen voor zwarte gaten: in de afgelopen twee artikelen zagen we dat algemene oppervlakken in een zwaartekrachtstheorie overeenkomen met een bepaalde verstrengelingsentropie in een duale theorie zonder zwaartekracht.

De grote vraag is natuurlijk: berust het patroon dat we hier zien – het keer op keer terugkomen van thermodynamica in het beschrijven van de (quantum-) zwaartekracht – op toeval, of zijn we hier gestuit op een diepe waarheid over de natuurkundige principes die ten grondslag liggen aan de zwaartekracht? Een eenduidig antwoord op deze vraag is nog niet geformuleerd, maar veel natuurkundigen verwachten dat het tweede antwoord juist zal blijken: dat er inderdaad een goede *reden* is dat zwaartekracht en thermodynamica zo veel op elkaar lijken. Een deel van het huidige onderzoek is er specifiek op gericht om de relatie tussen de twee gebieden zo duidelijk mogelijk te maken. In dit artikel willen we twee voorbeelden van dergelijk onderzoek noemen.



Afbeelding 2. Een kop koffie.Wat heeft de thermodynamica die deze kop koffie beschrijft te maken met de zwaartekracht in het heelal? Foto: Padurariu Alexandru.

Naar boven

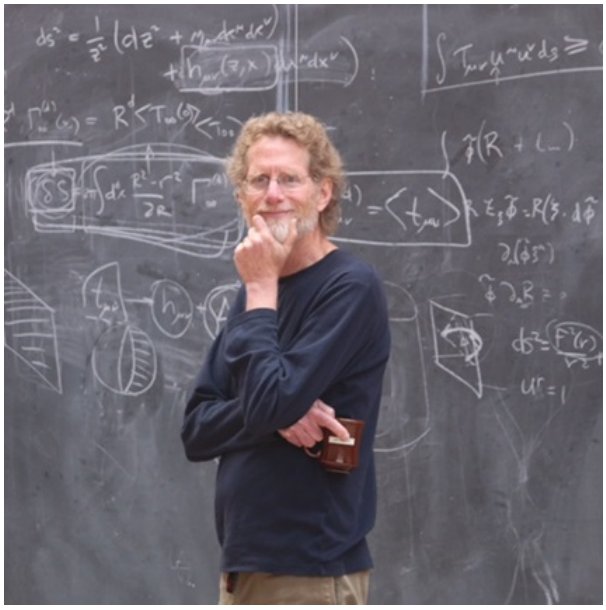
Van Clausius naar Einstein

Een van de eersten die de relatie tussen thermodynamica en zwaartekracht uitgebreid onderzocht was de Amerikaan Ted Jacobson. Hij vroeg zich af of het mogelijk zou zijn om de wetten van de zwaartekracht, zoals die aan het begin van de twintigste eeuw geformuleerd waren door Albert Einstein, af te leiden uit puur thermodynamische principes. In 1995 publiceerde Jacobson een artikel waarin hij liet zien dat dat inderdaad mogelijk is. Jacobson nam de volgende principes als uitgangspunten:

1. De thermodynamische wet van Clausius, die zegt dat de entropie in een systeem toeneemt als we warmte-energie aan het systeem toevoegen, en wel met een hoeveelheid die gelijk is aan de hoeveelheid toegevoegde warmte-energie gedeeld door de temperatuur. In een formule: $\delta S = \delta Q/T$.
2. Het door Bekenstein en Hawking ontdekte principe dat de entropie van een zwart gat gelijk is aan de oppervlakte van de horizon van het zwarte gat.
3. Het equivalentieprincipe dat door Einstein geformuleerd werd: elke waarnemer die in vrije val is, kan locaal ook beschreven worden als een stilstaande waarnemer in een vlakke ruimtetijd waarop geen krachten werken.

Het belangrijkste van deze uitgangspunten is het eerste: de wet van Clausius. Het tweede uitgangspunt vertelt ons hoe we de entropie die in het eerste uitgangspunt vookromt moeten vertalen in een grootheid die we kennen uit de zwaartekracht, en het derde vertelt ons uiteindelijk hoe die ‘vertaalslag’ voor elke afzonderlijke waarnemer gedaan moet worden.

Jacobson liet zien dat uit deze drie aannames volgt dat de ruimtetijd op grote schaal alleen maar beschreven kan worden door de zwaartekrachtswetten van Einstein. Met andere woorden: op deze manier bekeken volgt de algemene relativiteitstheorie uit de thermodynamische wet van Clausius!



Afbeelding 3. Ted Jacobson.Foto: Kavli Institute for Theoretical Physics.

Naar boven

Van entropie naar zwaartekracht

Het resultaat van Jacobson was een belangrijke doorbraak, aangezien het veel verder ging dan het aantonen van overeenkomsten tussen de thermodynamica en de zwaartekracht: Jacobson liet exact zien hoe de natuurwetten uit de ene theorie (zwaartekracht) uit die van de andere theorie (thermodynamica) afgeleid konden worden. Het zoeken bleef echter naar de onderliggende principes: als zwaartekracht gezien kan worden als een thermodynamische theorie, zouden we verwachten dat er ook voor de zwaartekracht onderliggende vrijheidsgraden te vinden moeten zijn waaruit de zwaartekrachtswetten op grote schaal volgen – precies zoals het thermodynamische gedrag van een kop koffie op grote schaal uiteindelijk volgt uit de microscopische wetten die de atomen beschrijven waaruit de koffie is opgebouwd.

Door de jaren heen probeerden diverse wetenschappers beter grip te krijgen op deze vraag. Een van de meest succesvolle pogingen daartoe is het werk van de Nederlandse natuurkundige Erik Verlinde, dat elders op deze site ook al besproken is. Verlinde koppelt de ideeën van Jacobson aan die van Gerard ’t Hooft, Leonard Susskind en Juan Maldacena: hij neemt aan dat de ‘atomen’ die de thermodynamica van de zwaartekracht beschrijven geen deeltjes in onze gebruikelijke beschrijving zijn, maar de vrijheidsgraden van de duale,

holografische theorie. Die aanname ligt voor de hand als we bedenken dat in de voorbeelden die we helemaal aan het begin van dit artikel noemden, diverse malen het woord ‘oppervlak’ voorkomt. Het begrip ‘entropie’ lijkt sterk verbonden met dat begrip ‘oppervlak’, en dus is de meest logische plek om op zoek te gaan naar de microscopische informatie die beschreven worden door entropie de *rand* van de ruimtetijd waarin de zwaartekracht zich afspeelt – en zoals we in het vorige artikel zagen is het juist op die rand waar de holografisch duale theorie zijn werk doet.

Verlinde vroeg zichzelf daarom af: kunnen we de zwaartekracht in een bepaald stuk ruimtetijd zien als een kracht die volgt uit entropie die zich bevindt op de rand van die ruimtetijd? Dat entropie inderdaad tot krachten kan leiden is een bekend fenomeen: de druk van een gas is bijvoorbeeld een gevolg van de entropie van het gas, en ook de kracht in een elastiekje kunnen we beschrijven als een gevolg van entropie.

In 2010 schreef Verlinde een artikel waarin hij liet zien dat ook de zwaartekracht op een soortgelijke manier als ‘entropische kracht’ beschreven kan worden. Net als Jacobson begon hij zijn redenering vanuit eenvoudige thermodynamische formules – in dit geval formules die het gedrag van de entropie op de rand van een stuk ruimtetijd beschrijven. Hij liet zien dat de entropische krachten die uit dit gedrag volgen *exact* voldoen aan de zwaartekrachtswetten van Newton en Einstein!



Afbeelding 4. Erik Verlinde.

Naar boven

Toeval of diepzinnige waarheid?

Het werk van Jacobson en het werk van Verlinde zijn twee voorbeelden waaruit duidelijk wordt dat er een heel sterke band is tussen thermodynamica enerzijds en de wetten van de zwaartekracht anderzijds. Jacobson liet zien dat de zwaartekrachtsvergelijkingen van Einstein afgeleid kunnen worden uit thermodynamische principes; Verlinde gaf bovendien een interpretatie aan een soortgelijke afleiding waarin de microscopische informatie gelocaliseerd is in de duale theorie, en de zwaartekracht ontstaat als een entropische kracht die het gevolg is van veranderingen in deze informatie.

Het is belangrijk om te beseffen dat in geen van deze gevallen nieuwe natuurwetten worden afgeleid. Zowel Jacobson als Verlinde eindigen exact met de bekende zwaartekrachtswetten van Newton en Einstein. Wat deze afleidingen wel toevoegen is een bepaalde mate van begrip. Jacobson laat zien dat we de zwaartekrachtswetten kunnen interpreteren als thermodynamische wetten; Verlinde geeft bovendien aan in welke richting we het microscopische model moeten zoeken dat aan deze thermodynamica ten grondslag ligt.

De vraag of al deze relaties tussen thermodynamica en zwaartekracht nu berusten op een mathematisch toeval, of dat ze ons iets leren over de fundamenten van de natuurkunde, is daarmee nog niet definitief beantwoord. Wel zijn er zoals we hebben gezien sterke aanwijzingen voor het tweede antwoord. Zoals met alle natuurkunde het geval is, zal ook deze vraag echter pas definitief beantwoord worden als uit de verschillende antwoorden ook verschillende voorspellingen voor *experimenten* volgen. Zijn er waarnemingen die we kunnen doen die onderscheiden tussen een entropische zwaartekracht en de klassieke? Dit is een vraag die de onderzoekers vandaag de dag zeer bezighoudt. Concrete voorstellen voor experimenten zijn er nog niet, maar het is beslist niet uitgesloten dat het antwoord “ja” is. Wellicht is het bijvoorbeeld mogelijk om nog maar deels begrepen zaken als donkere materie en donkere energie beter te begrijpen aan de hand van thermodynamische redeneringen. Dit is een onderzoeksrichting waar bijvoorbeeld Erik Verlinde op dit moment actief mee bezig is, dus wellicht kunnen we in een toekomstig vervolgartikel hier veel meer over zeggen.

Overigens zal het de lezer in deze serie artikelen veel algemener opgevallen zijn dat het experiment in ons verhaal een (wellicht te) ondergeschikte rol heeft gespeeld. De ideeën van snaartheorie en holografie zijn natuurlijk schitterend, maar uiteindelijk zullen deze ideeën ook in experimenten een rol moeten spelen om ze echt als natuurkunde te classificeren, en niet alleen als op de natuur geïnspireerde wiskunde. In het laatste artikel in dit dossier komen we uitgebreider terug op de vraag naar een experimentele verificatie van de snaartheorie.

Naar boven

Het zeventiende artikel in dit dossier is een bonusartikel, verschenen op de website van Quanta Magazine. Het beschrijft snaartheorie, quantumzwaartekracht, entropie, holografie, en de verbanden tussen deze onderwerpen.