

# Waarom is zwaartekracht emergent?

**Een populair idee onder theoretisch natuurkundigen is dat zwaartekracht op de allerkleinste schaal niet bestaat, maar pas tevoorschijn komt op macroscopische schaal. Met andere woorden, dat zwaartekracht 'emergent' is. Waarom denkt men eigenlijk dat zwaartekracht emergent is? In dit artikel geef ik een aantal redenen voor de emergentie van zwaartekracht.**

## Emergente zwaartekracht

[Emergente zwaartekracht](#) is een hot topic in de natuurkunde. Een bekende pionier in dit onderwerp is [Erik Verlinde](#), die in 2010 en 2016 twee belangrijke artikelen hierover publiceerde. Echter, Verlinde is niet de enige voorstander van dit idee, veel snaartheoretici geloven ook dat zwaartekracht op de allerkleinste schaal niet bestaat. Maar waarom eigenlijk? De aanwijzingen voor dit idee komen niet alleen voort uit de snaartheorie. Er zijn ook hints vanuit Einsteins theorie van zwaartekracht die suggereren dat zwaartekracht emergent is. In dit artikel zal ik drie van zulke hints bespreken.

Maar eerst, wat betekent *emergente zwaartekracht*? In [dit artikel](#) heb ik eerder besproken wat emergentie betekent. Emergentie is het fenomeen dat er op grote schaal nieuwe eigenschappen optreden die op kleine schaal niet aanwezig zijn. Een bekend voorbeeld van een emergent verschijnsel is temperatuur. Een gas van moleculen heeft een temperatuur doordat de moleculen constant in beweging zijn en op elkaar botsen. Een enkele molecuul heeft echter geen temperatuur. Temperatuur is dus een collectief verschijnsel dat pas op macroscopische schaal zichtbaar is.

Toegepast op zwaartekracht zou emergentie dus betekenen dat zwaartekracht op de allerkleinste schaal niet bestaat. Door de interactie van een onderliggende microscopische structuur, de 'atomen' van ruimtetijd, komt de zwaartekracht pas op macroscopische schaal tevoorschijn. Het feit dat wij zwaartekracht ervaren heeft dus een microscopische oorsprong, net als temperatuur! Althans, dat is het idee. Ik zal nu de aanwijzingen uitleggen die we hiervoor hebben vanuit Einsteins zwaartekrachtstheorie.



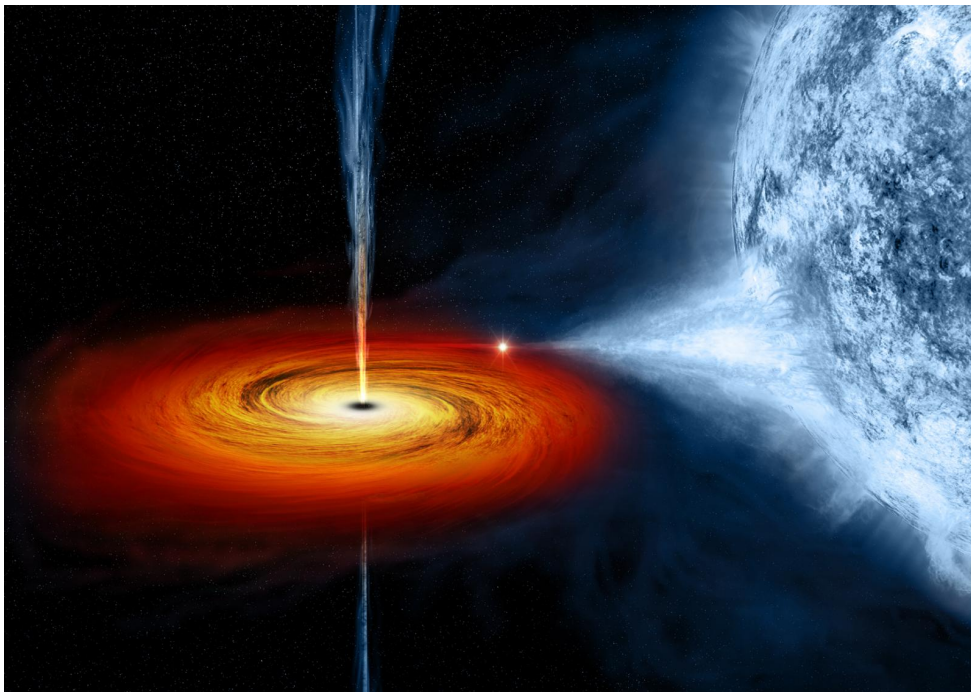
**Afbeelding 1. Emergente zwaartekracht.** Wellicht komt de zwaartekracht, die op macroscopische schaal op een appel werkt, voort uit een onderliggend microscopisch principe over informatie.

## De universaliteit van zwaartekracht

Zwaartekracht is een universele kracht. *Alle* deeltjes hier op aarde en in het universum worden aangetrokken door de zwaartekracht. Zelfs licht wordt afgebogen door zware objecten zoals de zon. De andere fundamentele krachten in de natuur – elektromagnetisme, de zwakke en sterke kernkracht – hebben niet zo'n universeel bereik. De elektromagnetische kracht werkt bijvoorbeeld alleen op deeltjes met een elektrische lading, zoals een elektron of een proton (en bijvoorbeeld niet op een neutron). Bovendien zijn de meeste grote objecten niet elektrisch geladen, omdat ze uit evenveel positief als negatief geladen deeltjes bestaan. Grote objecten worden dus vaak niet beïnvloed door de elektrische kracht, maar wel door zwaartekracht. Er bestaat namelijk niet zoals als 'negatieve massa', waardoor grote objecten opeens minder zwaar zijn dan kleinere objecten. De zwaartekracht werkt dus op alle objecten met massa of energie, hoe groot of klein ze ook zijn.

De universaliteit van zwaartekracht lijkt erg op de universaliteit van thermodynamica, de natuurkundige theorie van warmte en temperatuur. De thermodynamica is op heel veel verschillende systemen van toepassing: een gas, een stoommachine, een thermoskan, de zon, et cetera. Onafhankelijk van de precieze samenstelling van de thermodynamische systemen, kunnen we toch dezelfde fysische grootheden (zoals temperatuur en druk) en natuurwetten gebruiken om deze systemen te beschrijven. De wetten van de thermodynamica zijn dus ook universeel toepasbaar, net als de wetten van de zwaartekracht.

De universaliteit van de thermodynamica heeft echter een duidelijke oorsprong. Het komt doordat we niet alle details van de microscopische beschrijving hoeven te weten om een thermodynamisch systeem goed te kunnen beschrijven. We hoeven bijvoorbeeld niet te weten uit welke moleculen een gas precies bestaat om toch iets te kunnen zeggen over de temperatuur (dat gaat slechts over de gemiddelde beweging van de moleculen). Misschien geldt hetzelfde wel voor de zwaartekracht en ruimtetijd: ze komen voort uit een onderliggende microscopische structuur, maar we hoeven niet de precieze details van deze structuur te weten om de zwaartekrachtswetten van Newton en Einstein af te kunnen leiden.



**Afbeelding 2. Zwart gat.**Een artist impression van een zwart gat genaamd Cygnus X-1. Sinds de jaren '70 weten we dat de zwaartekrachtswetten die het gedrag van zwarte gaten beschrijven allerlei thermodynamische eigenschappen hebben. Image Credit: NASA/CXC/M.Weiss

## Thermodynamica van zwarte gaten

De tweede hint voor de emergentie van zwaartekracht komt van zwarte gaten. In de jaren '70 ontdekten Stephen Hawking, Jacob Bekenstein en anderen dat de fysica van zwarte gaten verrassend goed beschreven kan worden met thermodynamica. Ze konden zelfs [drie hoofdwetten voor zwarte gaten](#) formuleren die precies overeenkomen met de drie hoofdwetten van de thermodynamica. Daardoor kwamen natuurkundigen al snel tot de conclusie dat zwaartekracht – in elk geval rond zwarte gaten – een thermodynamisch

verschijnsel is.

De relatie tussen thermodynamica en zwaartekracht bij zwarte gaten is een nog sterkere hint dan de universaliteit dat de zwaartekracht op de allerkleinste schaal niet bestaat. Aangezien de thermodynamische wetten afgeleid kunnen worden uit microscopische natuurkunde (beter bekend als 'statistische mechanica'), zou het kunnen dat de zwaartekracht ook voortkomt uit een onderliggend microscopisch principe. We weten wat de microscopische betekenis is van bijvoorbeeld temperatuur, druk en warmte, en theoretici zijn vandaag de dag eigenlijk op zoek naar een soortgelijke microscopische beschrijving voor de wetten van de zwaartekracht.

## Het holografische principe

De laatste hint is het zogeheten [holografische principe](#), dat de Nederlandse Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft voor het eerst heeft geformuleerd. Dit principe kan worden gemotiveerd vanuit de thermodynamica van zwarte gaten. Het stelt dat het aantal fundamentele vrijheidsgraden in een bepaalde regio (bijvoorbeeld de kamer waar je nu in zit) niet groter kan zijn dan het oppervlakte van de rand van deze regio (oftewel de muren van de kamer). Dit principe is 'holografisch' in de zin dat alles dat zich afspeelt aan de binnenkant van de regio beschreven kan worden vanuit de rand. (Zie [mijn praatje](#) bij de Universiteit van Nederland en [het dossier](#) voor een uitgebreidere uitleg van het holografische principe.)

Het holografische principe heeft grote implicaties voor de juiste quantumtheorie van zwaartekracht, omdat het een limiet geeft op het aantal vrijheidsgraden van deze theorie. In een standaard lokale quantum(velden)theorie groeit het aantal vrijheidsgraden namelijk met het volume van de regio, in plaats van het oppervlakte. Het holografisch principe impliceert dus dat zwaartekracht op microscopisch niveau niet beschreven kan worden door *lokale* quantum-vrijheidsgraden. De oppervlaktewet voor het aantal vrijheidsgraden kan alleen verklaard worden als de vrijheidsgraden *niet-lokaal* zijn, zoals [verstengelde quantumtoestanden](#) of [D-branen](#), anders zijn er simpelweg te veel fundamentele vrijheidsgraden. Deze niet-lokaliteit suggereert dat zwaartekracht een microscopische beschrijving heeft die compleet haaks staat op onze huidige beschrijving van de zwaartekracht (volgens Einstein en Newton). Met andere woorden, op de allerkleinste schaal gelden de standaardwetten van de zwaartekracht niet.

Concluderend: de universaliteit van zwaartekracht, de thermodynamica van zwarte gaten en

het holografische principe zijn samen een sterke aanwijzing voor het feit dat zwaartekracht emergeert uit een (niet-lokale) microscopische beschrijving. Wat deze beschrijving precies is weten we niet, maar dat hoeven we misschien ook niet te weten om de oorsprong van zwaartekracht te begrijpen.

## Referentie

Niels Linnemann en Manus Visser, *Hints towards the Emergent Nature of Gravity*, [arXiv:1711.10503](https://arxiv.org/abs/1711.10503)