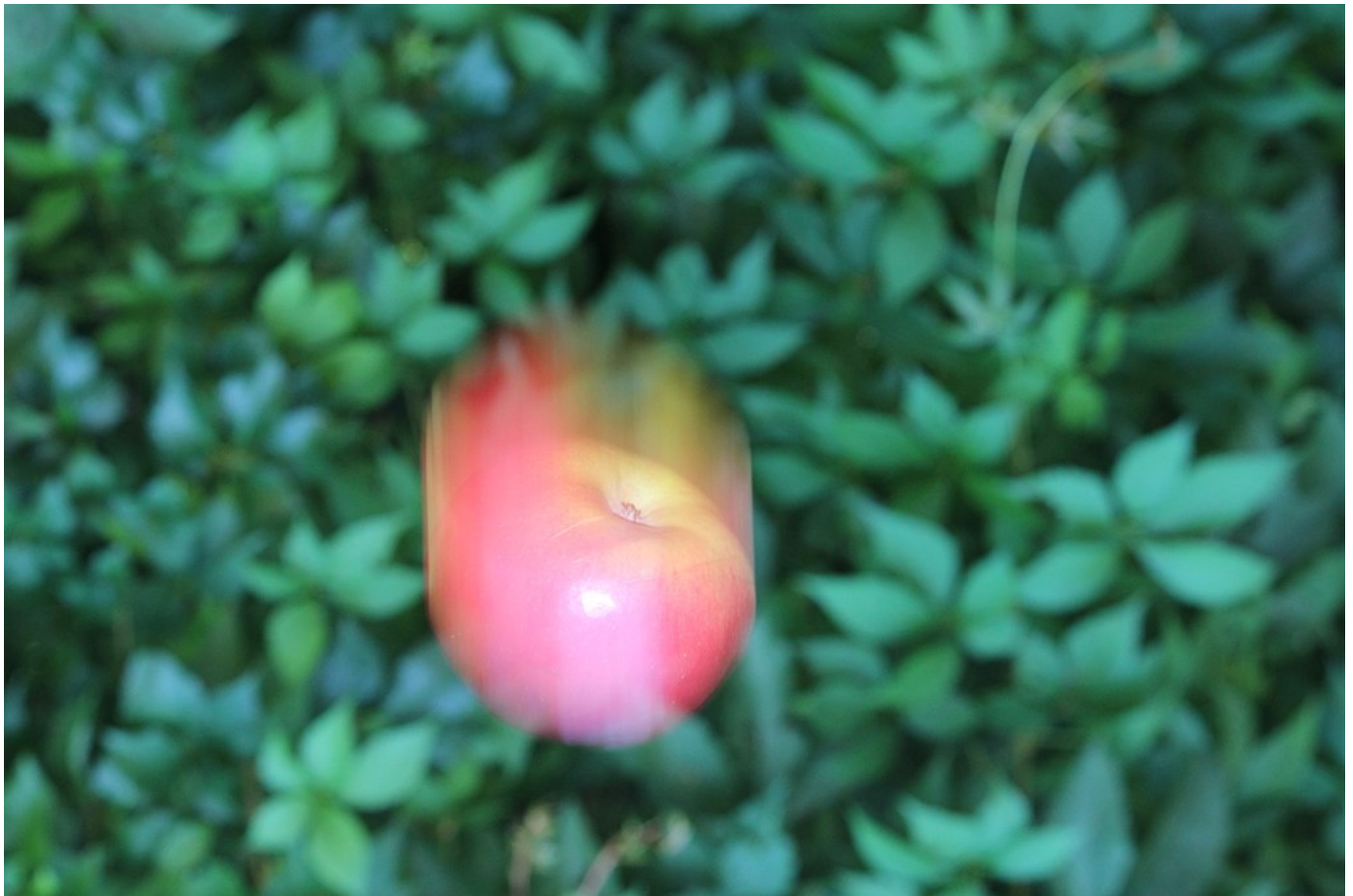


Een nieuw principe voor de zwaartekracht

De afgelopen decennia is er een nieuw perspectief op zwaartekracht ontstaan: de theorie van emergente zwaartekracht. Manus Visser ging er eens goed voor zitten en legt uit welke ideeën en welke wiskunde leiden tot deze nieuwe blik op Einsteins vergelijkingen.



Afbeelding 1. Een vallende appel. Newtons beschrijving van vallende appels lijkt beslist niet op hoe natuurkundigen vandaag de dag tegen de zwaartekracht aankijken. Afbeelding: [Zátonyi Sándor](#).

Een paar jaar geleden leidde de theoretisch natuurkundige Ted Jacobson Einsteins vergelijking voor de zwaartekracht af uit een nieuw microscopisch principe. In technische

termen: hij stelde voor dat de totale entropie van materie en ruimtetijd maximaal is in het vacuüm. Dit betekent dat ruimtetijd lokaal in thermisch evenwicht is. Wat dat allemaal precies betekent, zullen we in dit artikel zien.

Zwaartekracht bestaat niet op de allerkleinste schaal

De afgelopen decennia is er een ander perspectief op zwaartekracht ontstaan: de theorie van [emergente zwaartekracht](#). Met [emergentie](#) bedoelen we dat er op grote schaal nieuwe eigenschappen voorkomen die op kleine schaal niet aanwezig zijn. Volgens deze kijk bestaat zwaartekracht überhaupt niet op de allerkleinste schaal (lees: de Planckschaal, zo'n 10^{-35} m), maar komt zij pas tevoorschijn op grotere schaal. Hetzelfde geldt daarmee voor ruimtetijd, omdat volgens Einstein zwaartekracht niets anders is dan de kromming van die ruimtetijd. Deze emergente kijk roept natuurlijk vragen op: wat is de microscopische beschrijving van ruimtetijd dan wel? En hoe 'emergeert' zwaartekracht precies op grote schaal uit deze beschrijving?

De belangrijkste aanwijzingen voor de emergentie van ruimtetijd en zwaartekracht komen uit de theorie van zwarte gaten. In de jaren zeventig ontdekten de fysici Jacob Bekenstein en Stephen Hawking (en anderen) dat zwarte gaten thermodynamische objecten zijn, met een temperatuur, energie en entropie. Dat laatste begrip, entropie, speelt een centrale rol in dit verhaal. Wil je weten wat entropie ook alweer is, lees dan vooral [onze serie artikelen over dit onderwerp](#). De [formule](#) voor de entropie van zwarte gaten is

$$S_{\text{BH}} = \frac{A k_B c^3}{4 G \hbar}$$

waarin $A=4\pi r_H^2$ de oppervlakte van een bolvormige horizon is en (r_H) de straal. De andere parameters in de zogeheten Bekenstein-Hawkingentropie zijn fundamentele natuurconstanten: de gereduceerde Planckconstante (\hbar) , de Boltzmannconstante (k_B) , de lichtsnelheid (c) en de zwaartekrachtsconstante van Newton, (G) . Het bijzondere aan deze entropie is dat het resultaat quantummechanica, thermodynamica, relativiteitstheorie en zwaartekracht in één formule combineert.

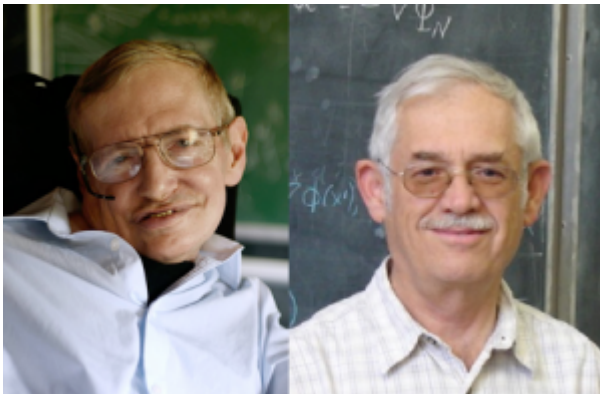
We kunnen de Bekenstein-Hawkingentropie ook herschrijven in termen van de Plancklengte, een combinatie die alleen uit natuurconstanten bestaat:

$$\ell_P = \sqrt{G \hbar / c^3}$$

Hiermee is

$$S_{\text{BH}} = k_B \frac{A}{4 \ell_P^2}$$

Deze schrijfwijze is handig voor de microscopische interpretatie die we hieronder zullen tegenkomen.



Afbeelding 2. Hawking en

Bekenstein. Stephen Hawking (links, 1942-2018) en Jacob Bekenstein (rechts, 1947-2015) zijn pioniers op het gebied van de thermodynamica van zwarte gaten.

Verstrengelingsentropie

Thermodynamische systemen bestaan meestal uit kleinere bestanddelen, *microscopische vrijheidsgraden* genoemd. Een gas bestaat bijvoorbeeld uit grofweg 10^{23} individuele moleculen. De thermodynamische eigenschappen van zwarte gaten suggereren dat zij ook uit microscopische vrijheidsgraden bestaan. Een interessant voorstel is dat die vrijheidsgraden verstrengelde quantumvelden zijn. De entropie van zwarte gaten kun je daarmee zien als de [verstrengelingsentropie](#) in een theorie van quantumzwaartekracht. Die verstrengelingsentropie is een maat voor de hoeveelheid verstrengeling in een quantumtoestand.

In de quantumveldentheorie (onze meest accurate quantumtheorie voor materie) heeft de

verstrengelingsentropie twee interessante eigenschappen. Ten eerste is de entropie voor een gebied in de ruimte (bijvoorbeeld in de vorm van een bal) proportioneel aan het oppervlak van de rand van het gebied. Dit komt doordat de meeste verstrengeling tussen de binnen- en buitenkant van een gebied zich aan de rand bevindt. Ten tweede is de entropie van het gebied divergent – dat wil zeggen: extreem of zelfs oneindig groot – omdat er oneindig veel vrijheidsgraden in een lokale quantumveldentheorie op de rand van het gebied blijken te bestaan. In een formule: de verstrengelingsentropie is gelijk aan

$$S_{\text{verstr}} = \frac{A}{\epsilon^2}$$

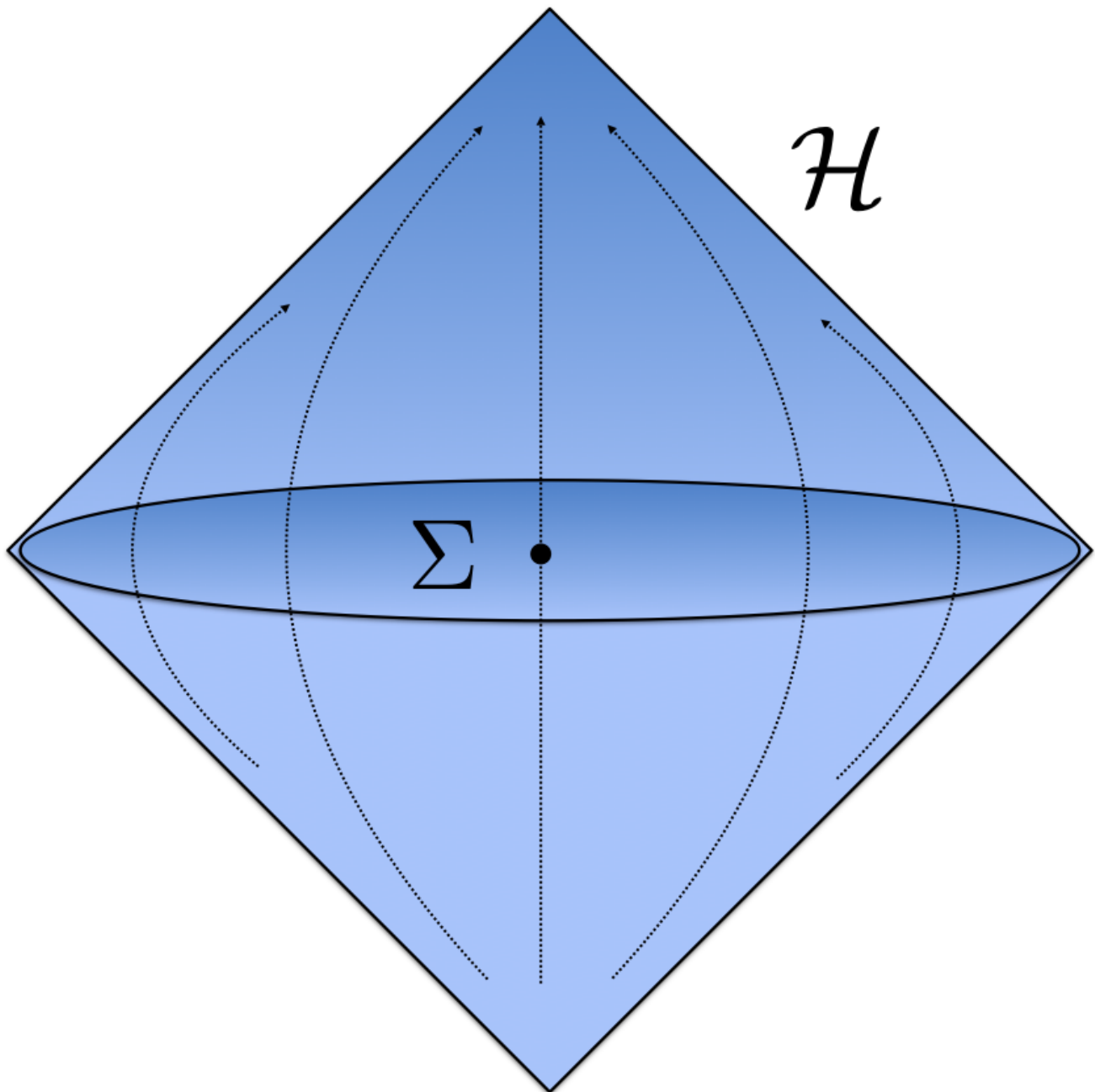
waarbij A de oppervlakte is van de rand, en ϵ een ‘regulator’ of ‘cutoff’: een klein getal dat, als je het nul maakt, een oneindig grote entropie produceert.

Deze oppervlaktewet voor de verstrengelingsentropie doet denken aan de Bekenstein-Hawkingentropie van zwarte gaten, maar de laatstgenoemde entropie is niet oneindig groot. In quantumzwaartekracht moet er dus een universele cutoff zijn van de divergentie, die ervoor zorgt dat het aantal vrijheidsgraden eindig is in een gebied. Als we de Plancklengte als cutoff nemen, $\epsilon = \ell_P$, dan is de verstrengelingsentropie inderdaad gelijk aan de Bekenstein-Hawkingentropie (op een constante factor na). Overigens is het idee van zo’n universele cutoff consistent met het [holografisch principe](#), dat stelt dat er een eindig aantal vrijheidsgraden bestaat in een gebied en dat het aantal proportioneel is aan het oppervlak van de rand.

Lokaal thermisch evenwicht

Jacobsons idee is dat de thermodynamica van zwaartekracht niet alleen voor zwarte gaten geldt, maar ook voor lokale regio’s in ruimtetijd. Dit komt doordat de thermodynamica van zwarte gaten zijn oorsprong heeft in de aanwezigheid van een [waarnemingshorizon](#). De quantumtoestand van materie blijkt altijd aan de wetten van de thermodynamica te voldoen aan de buitenkant van een horizon. Lokaal rond een willekeurig punt in de ruimtetijd kun je ook een waarnemingshorizon maken, ofwel door te versnellen ofwel door een causale diamant te maken. Een *causale diamant* is het gebied in ruimtetijd waarmee een waarnemer in causaal contact is gedurende een gegeven tijd: zij kan signalen ontvangen en zenden naar elke andere waarnemer in de diamant. Zo’n gebied heeft een horizon in de toekomst en in het verleden. Waarnemers binnen de diamant kunnen geen lichtsignalen ontvangen binnen

de voorgeschreven tijd van gebeurtenissen buiten de horizon in de toekomst, en ze kunnen ze niet uitzenden naar gebeurtenissen buiten de horizon in het verleden.



Afbeelding 3. Een causale diamant. Een causale diamant is een gebied in ruimtetijd (tijd loopt verticaal en ruimte horizontaal). De stippellijnen zijn paden van waarnemers die binnen de diamant blijven. De horizon H is het vierkant aan de buitenkant en Σ is een bal in de ruimte.

In 1995 schreef Jacobson een beroemd artikel over de thermodynamische interpretatie van Einsteins vergelijking in het eerste geval: in de buurt van een lokale versnellingshorizon. Hij bewees dat de zwaartekrachtsvergelijking equivalent is aan een toestandsvergelijking in de thermodynamica. Twintig jaar later schreef hij een nieuw artikel waarin hij Einsteins vergelijking afleidde uit een thermische evenwichtsconditie voor het tweede geval: dat van lokale causale diamanten. Je kunt causale diamanten zo klein maken als je wilt, door de tijd waarin de waarnemer observaties doet arbitrair klein te maken. Zulke lokale kleine causale diamanten blijken in thermisch evenwicht te zijn omdat ze een horizon hebben en omdat de ruimtetijd zo goed als vlak is rond een lokaal punt.

Nieuw principe voor emergente zwaartekracht

Jacobsons nieuwe microscopische principe voor emergente zwaartekracht, beschreven in zijn artikel uit 2016, is als volgt. Hij stelt dat de totale verstrengelingsentropie van elke lokale causale diamant in ruimtetijd *maximaal* is in het vacuüm. Hij neemt als totale entropie de som van de entropie van de ruimtetijd (de Bekenstein-Hawking entropie) en de verstrengelingsentropie van materie: $(S_{\text{tot}} = S_{\text{BH}} + S_{\text{mat}})$.

Dit wordt ook wel de *gegeneraliseerde entropie* genoemd, omdat de totale entropie van ons universum niet alleen bestaat uit de entropie van materie maar ook uit de entropie van bijvoorbeeld zwarte gaten (en algemener: van ruimtetijd). Deze gegeneraliseerde entropie voldoet aan de zogenaamde gegeneraliseerde tweede hoofdwet van de thermodynamica, die zegt dat (S_{tot}) alleen kan toenemen of gelijk blijven.

Het principe dat de gegeneraliseerde entropie al maximaal is in het vacuüm is dus een evenwichtsconditie. Thermische systemen in evenwicht hebben altijd maximale entropie, omdat de entropie van een systeem toeneemt totdat het systeem een evenwicht bereikt. Jacobson stelt dus dat ruimtetijd lokaal in thermisch evenwicht is. Uit deze evenwichtsconditie leidt hij vervolgens Einsteins vergelijking af op een ingenieuze manier. De precieze details zijn nog technischer dan wat ik hier al heb beschreven; als je geïnteresseerd bent in de details van Jacobsons afleiding, kun je die in zijn oorspronkelijke artikel lezen, of de introductie van mijn proefschrift – de referenties vind je hieronder.

Referenties

Ted Jacobson (2016). [Entanglement equilibrium and the Einstein equation](#). Phys. Rev. Lett. 116, 201101.

Manus Visser (2019). [Emergent Gravity in a Holographic Universe](#), proefschrift Universiteit van Amsterdam. ISBN 978-94-6323-653-9.