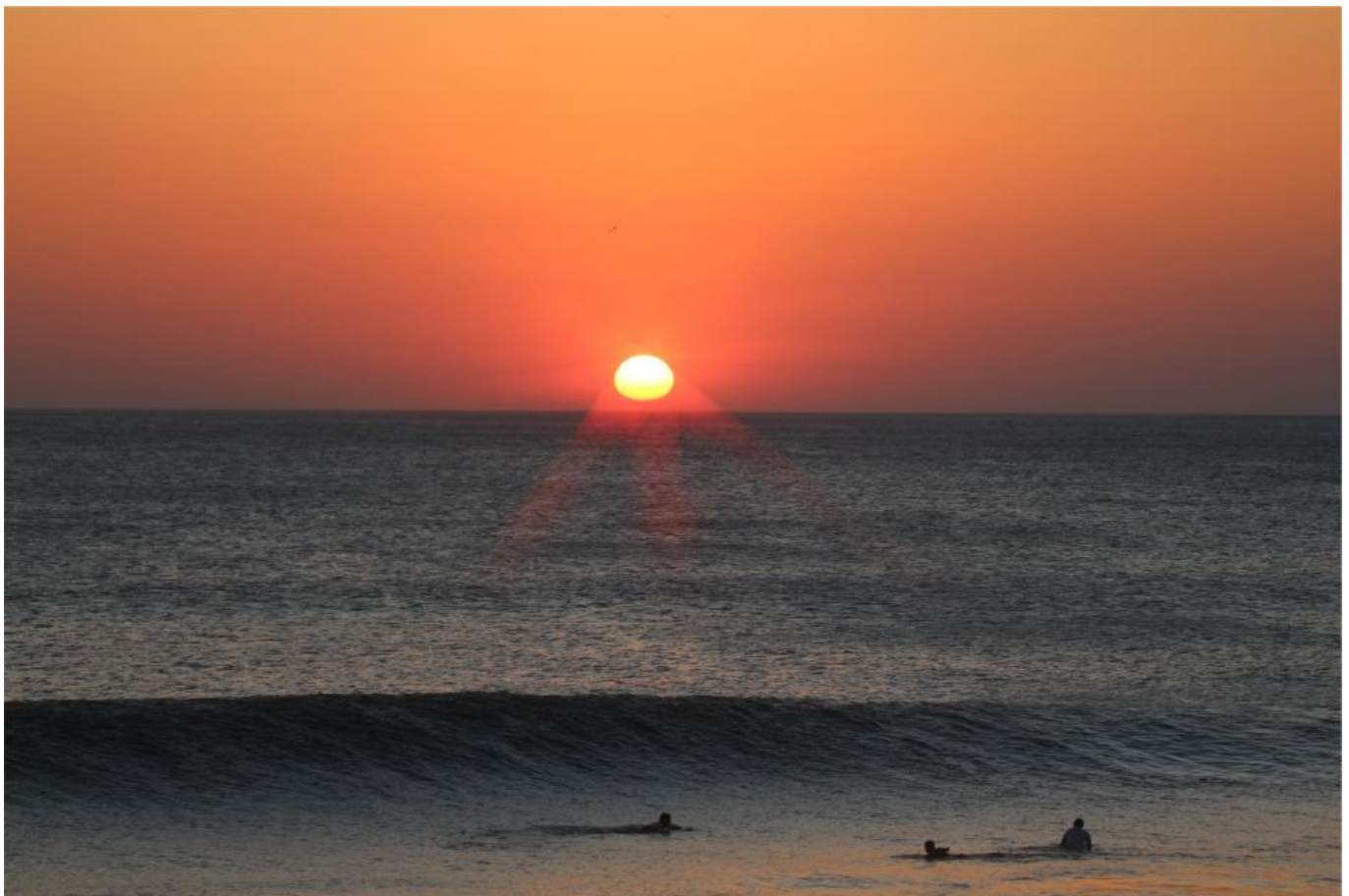


De horizon(nen) van het heelal

Het heelal dijt uit, al vanaf het begin der tijden. Sinds de observatie dat bijna alle sterrenstelsels van ons (en elkaar) af bewegen, zijn astronomen langzaam maar zeker tot het inzicht gekomen dat er tussen elke twee punten van de ruimte steeds meer ruimte bijkomt. Hierdoor blijkt ons heelal voor iedere waarnemer een horizon te hebben.



Afbeelding 1. Een 'gewone' horizon. Net als het aardoppervlak heeft ook het heelal een horizon: een denkbeeldige grens van waar voorbij je niet kunt zien. Foto: Marcus Dall Col.

Een van de bekendste astronomen die de mate van uitdijning probeerde te kwantificeren was Edwin Hubble, wiens naam bij het grote publiek vooral bekend is door de naar hem vernoemde ruimtetelescoop. De *constante van Hubble*, vaak aangeduid met H_0 , bepaalt de uitdijngssnelheid van het heelal, in eenheden van snelheid per megaparsec afstand (een

megaparsec is ongeveer 10^{19} km groot). In ons huidige universum is die uitdijingsnelheid niet bijzonder groot: 1 kubieke meter ruimte neemt in een miljoen jaar tijd met ongeveer 0,007% toe in alle richtingen (dus het nieuwe volume is $(1,00007)^3$ keer zo groot). Dat was wel anders vlak na de oerknal: volgens de moderne theorie was er toen een korte periode van hevige uitdijing, die ook wel *inflatie* wordt genoemd (zie ook onze [serie over kosmologie](#)). Deze theorie verklaart de sterk uitvergroete structuur in de verdeling van materie over het heelal en patronen in de kosmische achtergrondstraling. Na de inflatie volgde een periode van relatief zwakke uitdijing.

Maar ook al is de uitdijing vandaag de dag niet zo snel, op heel grote afstanden heeft het wel degelijk een merkbaar effect. Als iedere kubieke meter een minieme fractie uitdijt in een seconde, dan heeft dat op miljoenen lichtjaren afstand alsnog een grote uitwerking. In dit artikel zal ik de meest dramatische conclusie hiervan bespreken: de uitdijing van het heelal zorgt voor een *kosmologische horizon*.

Een uiterste grens aan het waarneembare heelal

Zie het als een rijzend brood: het deeg stelt de ruimte voor en wordt overal gelijkmatig groter. Laten we voor het gemak aannemen dat het heelal ook gelijkmatig uitdijt¹, met de bovengenoemde waarde van 0,007% toename in alle richtingen per miljoen jaar. Een punt A op een meter van jou af komt daarmee in een seconde $2,2 \times 10^{-18}$ meter verderop te liggen – niet veel, zou je zeggen. Maar een punt B op 14,4 miljard lichtjaar afstand ligt na een seconde 300.000 km verderop, want overal tussen jou en punt B is de ruimte in volume toegenomen. 300.000 km in één seconde is precies de snelheid van het licht! Conclusie: alles dat verder weg ligt dan punt B kan geen lichtsignaal versturen dat ooit het punt waar jij je bevindt zal bereiken. De afstand van 14,4 miljard lichtjaar definieert een bol rond een waarnemer van waarbuiten causaal (oorzakelijk) contact met de waarnemer fundamenteel onmogelijk is. De straal r_H van die bol heet de *Hubble-straal* en het boloppervlak de *Hubble-sfeer*. De Hubble-sfeer is dus een kosmologische ‘horizon’², in de zin dat het licht dat vandaag daarbuiten wordt uitgezonden nooit bij de waarnemer kan komen – een beetje zoals een zwemmer die tegen een te sterke stroom in moet zwemmen niet vooruit komt. Overigens merkt het lichtdeeltje in kwestie hier allemaal niets van en kan het moeiteloos in de richting van de Aarde bewegen. Voor het lichtdeeltje is het juist omgekeerd: de aarde

beweegt te snel weg en blijft daardoor onbereikbaar.

Een kleine kanttekening bij bovenstaand verhaal is dat de Hubble-constante eigenlijk niet constant is, maar in de loop van de tijd verandert (in de meeste modellen neemt H_0 af). Dus ook de Hubble-sfeer heeft een grootte die verandert op kosmologische tijdschalen. Ten slotte zou je je moeten afvragen: bewegen objecten buiten de Hubble-sfeer met snelheden groter dan de lichtsnelheid? En is dat dan niet in tegenspraak met de relativiteitstheorie? Het antwoord is: aangezien snelheden worden gemeten *in* de ruimtetijd, staat een stilstaand object buiten de Hubble-sfeer gewoon stil in de ruimte. Wat een 'snelheid' heeft is de uitdijng *van de ruimte zelf*, ten opzichte van een gekozen referentiepunt, en die snelheid kan inderdaad groter dan die van het licht zijn zonder dat dat in tegenspraak is met de wetten van de relativiteitstheorie.

Merk op dat de kosmologische horizon een concept is dat altijd afhangt van het referentiepunt dat je kiest. In het voorbeeld hierboven maten we afstanden en uitdijng ten opzichte van de aarde, maar een willekeurig ander referentiepunt in het heelal heeft een andere kosmologische horizon, op afstand r_H rond dat punt. De aarde is geen speciaal punt in het heelal; de ruimte dijt overal uit en het is de optelsom van alle uitdijng over grote afstanden ten opzichte van een referentiepunt die ervoor zorgt dat er kosmologische horizonnen zijn. Zo'n horizon is ook helemaal geen ongewone plek, geen bezienswaardigheid: ieder punt kan onderdeel zijn van een kosmologische horizon van een ander punt dat ver genoeg weg ligt.

Eigenschappen van de horizon: temperatuur en entropie

Kosmologische horizonnen lijken tot nu toe misschien nog een vrij abstract begrip met weinig fysische betekenis. Maar het blijkt dat kosmologische horizonnen wel degelijk fysische eigenschappen kunnen worden toegedicht. In een klassiek artikel uit 1977 [1] lieten Stephen Hawking en Gary Gibbons met een berekening zien dat een kosmologische horizon straling uitzendt met een bepaalde temperatuur. Deze temperatuur is weliswaar onmeetbaar klein (in de orde van 10^{-28} Kelvin) maar is theoretisch interessant omdat die kosmologische horizonnen als thermodynamische systemen beschrijft.



Afbeelding 2. Thermodynamica. Net als een kop koffie is ook de horizon van het heelal een thermodynamisch systeem, met een temperatuur en een entropie.

Dit is vergelijkbaar met de manier waarop [zwarte gaten](#) straling uitzenden, de zogenoemde [Hawkingstraling](#). De analogie met waarnemingshorizonden van zwarte gaten gaat behoorlijk ver op: het gebied binnen een kosmologische horizon is een soort ‘binnenstebuiten gekeerd’ zwart gat, waar informatie vanuit de waarnemer in het midden gezien alleen uit kan ontsnappen in plaats van er in te worden gevangen. Bovendien hebben zowel de waarnemingshorizon van een zwart gat als de kosmologische horizon een temperatuur – en bij een temperatuur hoort een [entropie](#), nog een thermodynamisch begrip. De entropie van een zwart gat, ook voor het eerst berekend door Hawking en zijn collega Bekenstein, roept tot op de dag van vandaag nog vragen op, al is er sinds een paar jaar [voortgang geboekt](#) in het begrip ervan. Maar zeker de entropie van een kosmologische horizon, gemeten in eenheden van de Hubble-straal, leidt 45 jaar na het artikel van Hawking en Gibbons nog tot vragen.

Een microscopische beschrijving van de horizon?

De belangrijkste vraag is: als een kosmologische horizon een entropie heeft, wat *telt* deze entropie dan? In gewone thermodynamische systemen telt de entropie het aantal microscopische vrijheidsgraden, gegeven een macroscopische toestand (zoals een gas in thermisch evenwicht: daar weet je de temperatuur, het volume, de druk, enzovoort en kun je je afvragen op hoeveel manieren zo'n gas opgebouwd kan zijn). Maar welke microscopische vrijheidsgraden worden er bij een kosmologische horizon geteld? In principe kan zo'n horizon in de lege ruimte gedefinieerd worden, dus de vrijheidsgraden kunnen geen gewone materie zijn. Bovendien is er het probleem van waarnemer-afhankelijkheid – elke waarnemer heeft een eigen horizon – dat een unieke microscopische beschrijving op het eerste gezicht problematisch maakt. Een microscopische theorie van waarnemingshorizonnen is dus nog een open probleem en dat heeft waarschijnlijk te maken met een ander open probleem, namelijk dat van de quantumzwaartekracht.

Een concrete onderzoeksrichting waar een groep theoretisch natuurkundigen tegenwoordig aan werkt gaat onder de cryptische noemer van 'dS/CFT'. Dit is een variatie op de ['AdS/CFT'](#)-correspondentie, waar AdS staat voor 'Anti-de Sitter' (een bepaalde gekromde ruimtetijd) en CFT voor 'conformal field theory' (een type quantumsystemen met veel symmetrie). AdS/CFT is inmiddels vrij goed begrepen en is de meest concrete beschrijving van quantumzwaartekracht die we tot nu toe hebben. Vervangen we de Anti-de Sitterruimte door 'de Sitter', een ander soort gekromde ruimtetijd die sterk lijkt op ons uitdijende heelal, dan is de hoop om een vergelijkbare correspondentie af te leiden. Deze afleiding is er helaas nog niet, maar men loopt al op de zaken vooruit en heeft het over de dS/CFT-correspondentie. Wanneer deze theorie beter begrepen wordt kunnen we hopelijk eindelijk de vraag beantwoorden wat er voor zorgt dat kosmologische horizonnen een entropie hebben. Voorlopig moeten we het doen zonder het antwoord, maar met een hoop fascinerende vragen over het universum.

[1] G.W. Gibbons & S. W. Hawking, [Cosmological event horizons, thermodynamics, and particle creation](#), Phys.Rev.D, vol.15, **10**, 1977.

¹ In werkelijkheid is de Hubble-constante niet constant, maar hangt af van de tijd. Zoals

eerder genoemd was de uitdijingsnelheid bijvoorbeeld veel groter tijdens de kosmische inflatie. In de meeste kosmologische modellen zal H_0 in de toekomst nog verder afnemen.

² Er zijn verschillende concepten van horizonnen in de kosmologie, wat soms verwarrende terminologie oplevert. Zo is de 'deeltjeshorizon' de grens waarbinnen deeltjes de aarde zouden hebben kunnen bereiken in de tijd dat het universum bestaat, en de 'waarnemingshorizon' de grens waarbinnen lichtsignalen ons ooit zouden kunnen bereiken; die grens beweegt zich dus met de lichtsnelheid van ons af. Maar de 'kosmologische horizon' die we hierboven bespreken heeft een vaste straal rond een referentiepunt en is gedefinieerd als de straal waarop de ruimte met de lichtsnelheid uitdijt ten opzichte van dat referentiepunt.