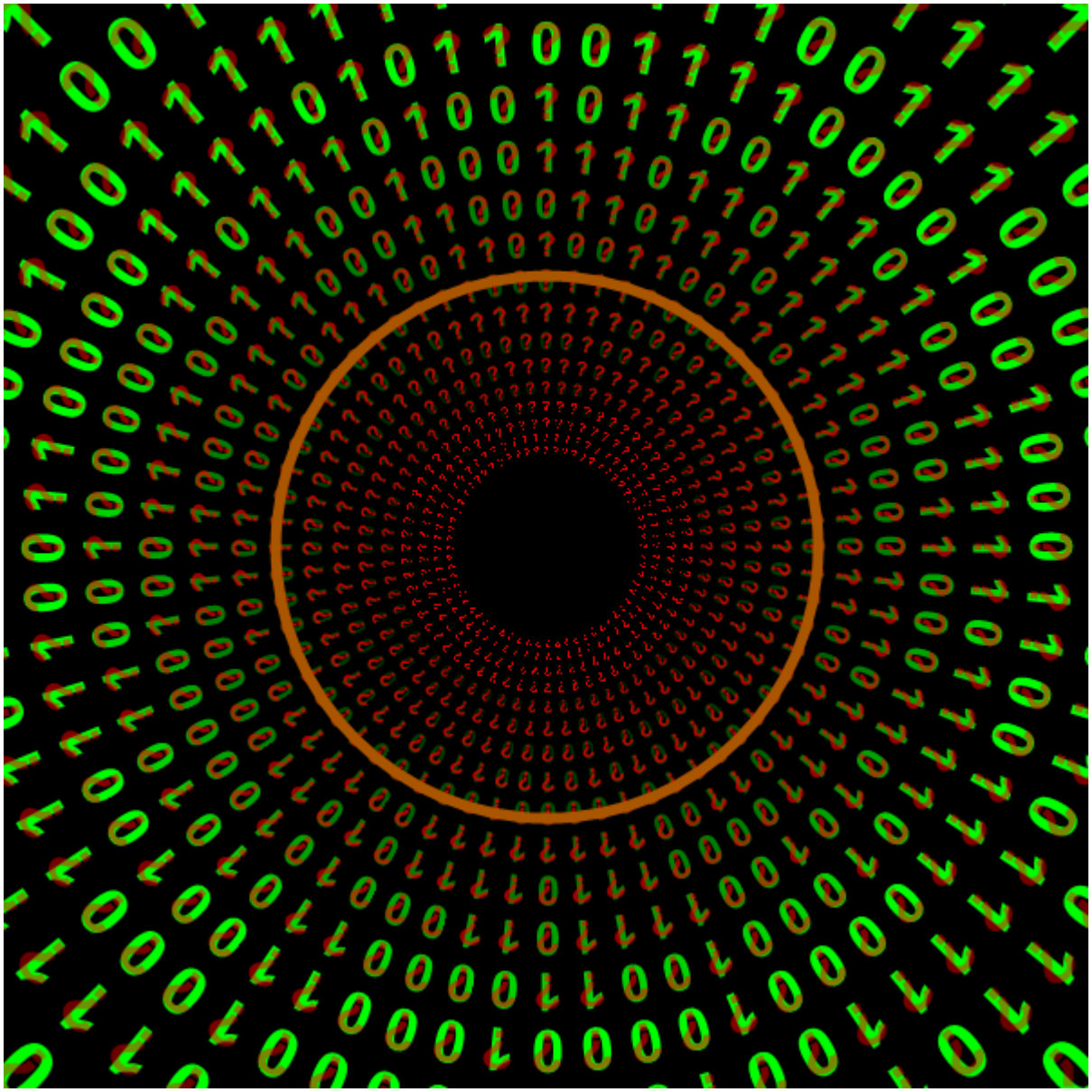
Snaren en holografie (11): De informatieparadox

Het holografisch principe heeft, sinds Juan Maldacena er in 1998 een eerste voorbeeld van vond, allerlei toepassingen gevonden in de moderne theoretische natuurkunde. In het vorige artikel in deze serie hebben we gezien dat het holografisch principe afkomstig is uit ideeën over zwarte gaten. Het ligt dus voor de hand dat een deel van de toepassingen ons ook nieuwe dingen leert over deze mysterieuze objecten. Vandaag bespreken we misschien wel het bekendste voorbeeld waarin dat het geval is: de informatieparadox.

In dit artikel:

- Hawkingstraling
- De informatieparadox
- Een weddenschap
- Holografie en informatie



Afbeelding 1. De informatieparadox.Gaat informatie die in een zwart gat verdwijnt voorgoed verloren, of kan deze informatie in de vorm van straling weer naar buiten komen?

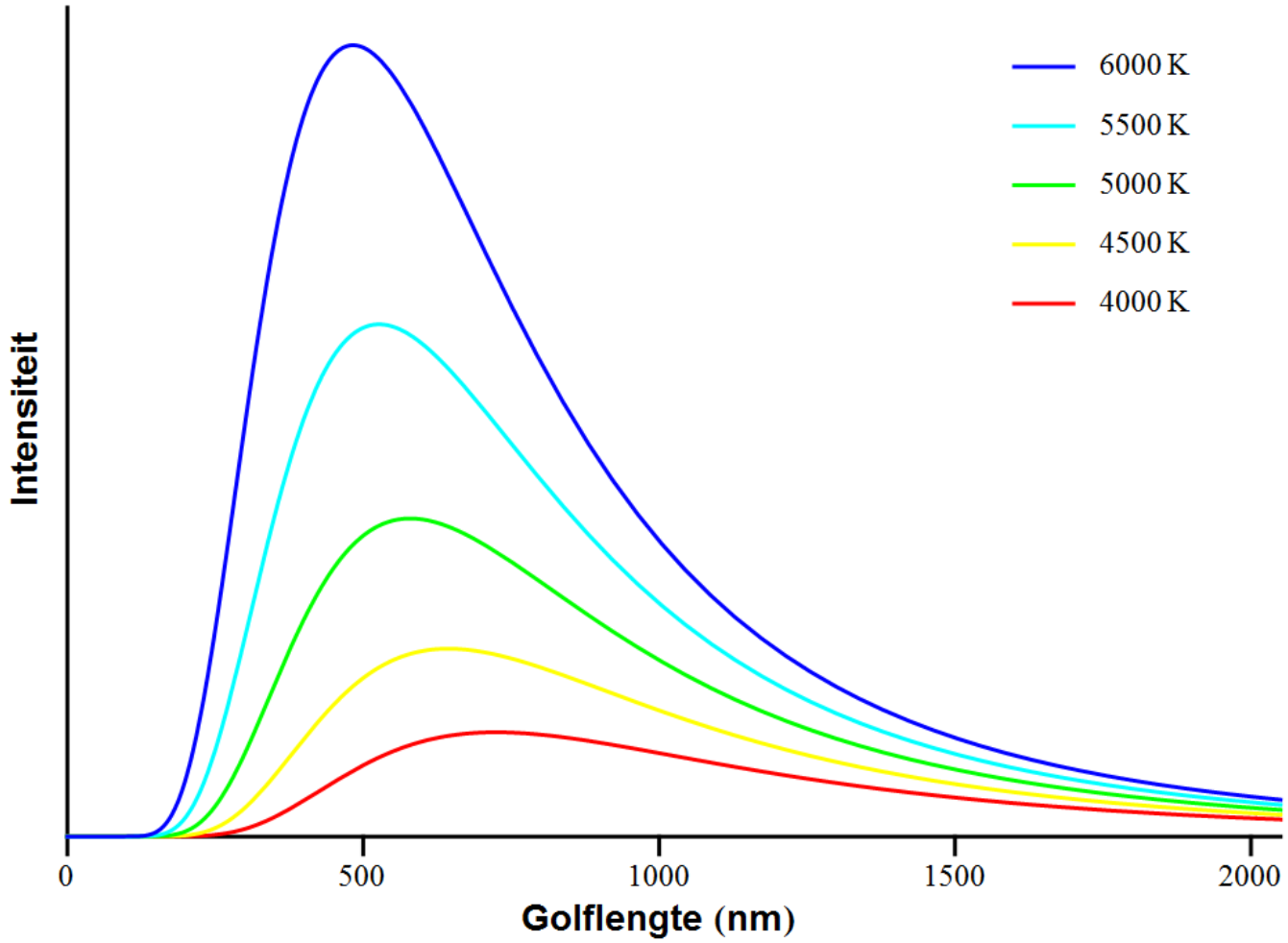
Hawkingstraling

Zwarte gaten zijn gebieden in het heelal waar de zwaartekracht van een massa-concentratie, zoals een ineengestorte sterkern of het centrum van een sterrenstelsel, zó sterk is dat zelfs het licht niet aan deze gebieden kan ontsnappen. Zoals Albert Einstein aantoonde, is de lichtsnelheid de hoogst mogelijke snelheid in het heelal, en dus lijkt deze uitspraak in te houden dat er helemaal *niets* aan zwarte gaten kan ontsnappen.

Volgens de wetten van de relativiteitstheorie is dat laatste inderdaad het geval, maar de

bekende natuurkundige Stephen Hawking liet in 1974 zien dat zwarte gaten niet meer volledig ‘zwart’ zijn als we ook de quantummechanica in het verhaal betrekken. In de quantummechanica kunnen zaken die klassiek niet mogelijk zijn, vaak tóch gebeuren (denk aan het beroemde tunneleffect), en dit blijkt ook te gelden voor het uitzenden van straling door zwarte gaten. Hoewel het uitzenden van zulke straling door de wetten van de relativiteitstheorie verboden wordt – ook straling kan immers niet sneller dan het licht bewegen – liet Hawking zien dat de kansprocessen van de quantumfysica ervoor zorgen dat elk zwart gat tóch heel langzaam straling uitzendt.

In een artikel in ons dossier over zwarte gaten hebben we deze Hawkingstraling en zijn oorsprong al eens uitgebreid besproken. Datzelfde geldt overigens voor veel andere onderwerpen uit dit artikel; wie na het lezen van dit artikel meer details wil, kan zijn hart dus ophalen in dat dossier. We ontdekten daar ook een heel belangrijke eigenschap van de Hawkingstraling: die straling bevat geen enkele informatie! Dat feit is een direct gevolg van het kanskarakter van de quantummechanica: bij een gegeven temperatuur kunnen we voor elke golflengte precies uitrekenen wat de *kans* is dat het zwarte gat in een bepaald tijdsinterval een foton met die golflengte uitzendt, maar óf en wanneer dat gebeurt, berust op een toevalsproces waaruit geen enkele informatie kan worden afgeleid over de interne structuur van het zwarte gat. In meer technische termen: een zwart gat is volgens de berekeningen van Hawking een perfecte zwarte straler.



Afbeelding 2. Het spectrum van zwarte stralers.In deze grafiek staat, voor verschillende temperaturen, de hoeveelheid straling van een geïdealiseerde zwarte straler voor elke golflengte weergegeven. Een zwart gat lijkt de perfecte zwarte straler: de straling daarvan voldoet volgens Hakwings berekeningen *exact* aan deze grafiek, en bevat dus geen enkele informatie over andere eigenschappen dan de temperatuur van het zwarte gat.

Naar boven

De informatieparadox

Een jaar later, in 1975, lieten Hawking en Jacob Bekenstein zien dat het bestaan van Hawkingstraling leidt tot een vreemde paradox. Door deze straling verliest een zwart gat namelijk energie, en uiteindelijk kan het zwarte gat, als het niet ‘gevoed’ wordt door nieuwe materie, op die manier geheel verdampen. Zodra dit gebeurt, leidt het feit dat de Hawkingstraling geen informatie bevat echter tot een theoretisch probleem. Er is namelijk op

dat moment op geen enkele manier meer vast te stellen hoe en waaruit het zwarte gat oorspronkelijk gevormd is. Of het zwarte gat nu afkomstig is van een supernova-explosie waarbij een sterkern ineenstortte, of van een bizar experiment waarbij iemand probeerde een miljard olifanten in een kamer van drie bij drie meter te proppen – in alle gevallen ziet de Hawkingstraling er precies hetzelfde uit, en is na het verdampen van het zwarte gat die informatie dus voorgoed verloren.

Dit is niet alleen een filosofisch onbevredigende situatie; het is ook een natuurkundig raadsel. In de berekeningen van Hawking gebruikte hij namelijk alleen de wetten van de relativiteitstheorie en de quantumfysica, en elk afzonderlijk hebben die theorieën de eigenschap dat er *nooit informatie verloren gaat*. Dit is overigens een eigenschap die bijna alle natuurkundige theorieën hebben: uit de eindsituatie van een proces kunnen we vrijwel altijd terugrekenen (in elk geval in principe – in de praktijk valt zo'n berekening meestal niet mee!) naar wat de beginsituatie was. De relativiteitstheorie en de quantummechanica hebben elk deze eigenschap – maar hoe kan het dan dat de combinatie van die twee theorieën diezelfde eigenschap niet lijkt te hebben?

Er lijken drie mogelijke antwoorden op deze vraag te zijn. Ten eerste zou het kunnen dat zwarte gaten nooit helemáál kunnen verdampen: dat er altijd een 'kern' of 'rest' overblijft die de informatie over de oorspronkelijke vorming van het zwarte gat bevat. Er zijn echter geen aanwijzingen – noch theoretisch, nog experimenteel – die erop wijzen dat er een proces is dat de verdamping van zwarte gaten op een gegeven moment tegenhoudt, dus weinig fysici zien deze oplossing als een waarschijnlijke kandidaat.

Afbeelding 3. Stephen Hawking.Hawking ontdekte in 1974 dat zwarte gaten op het quantumniveau heel langzaam straling kunnen uitstralen, en stelde in 1975 dat dit leidt tot de beroemde informatieparadox. Foto: Philip Waterson, LBIPP, LRPS.

Een tweede mogelijkheid is dat de oorspronkelijke berekening van Hawking niet helemaal volledig was. In die berekening worden inderdaad enkele aannames en vereenvoudigingen gemaakt, en het zou kunnen dat daarmee in zekere zin het kind met het badwater wordt weggegooid. Wellicht blijkt bij een nog preciezere berekening dus dat de Hawkingstraling wel degelijk een klein beetje informatie bevat, en dat uit de informatie van alle straling bij elkaar uiteindelijk toch de hele ontstaansgeschiedenis van een zwart gat gereconstrueerd kan worden.

Ten slotte is het natuurlijk mogelijk dat de berekening van Hawking wél juist was, en dat een zwart gat inderdaad informatie vernietigt. Dat zou betekenen dat de combinatie van de quantummechanica en de relativiteitstheorie beduidend complexer moet zijn dan het simpelweg aan elkaar plakken van de vergelijkingen uit de twee theorieën. Een volledige theorie van de quantumzwaartekracht moet dan ook *verklaren* waarom de deelgebieden wel informatie lijken te behouden, maar het geheel niet.

Naar boven

Een weddenschap

Het was oorspronkelijk allesbehalve duidelijk welke van de drie genoemde oplossingen de juiste was. Sterker nog: ruim twintig jaar na de ontdekking van Hawkingstraling, in 1997, was er nog altijd geen oplossing gevonden. Meningen waren er wel volop: bijna iedere fysicus die aan dit onderwerp werkte had wel een voorkeur voor één van de drie oplossingen.

Dat gold ook voor Hawking zelf: hij was er in de loop der jaren steeds meer van overtuigd geraakt dat zijn berekening juist was, en dat er dus inderdaad informatie verloren zou moeten gaan in een volledige theorie van de quantumzwaartekracht. Kip Thorne, een andere bekende theoreet die aan de fysica van zwarte gaten werkte, was het met hem eens, maar een derde collega, John Preskill, dacht juist dat uiteindelijk zou blijken dat Hawkings berekening toch kleine scheurtjes vertoonde en dat informatie bij het verdampen van een zwart gat tóch behouden zou zijn.

Hawking, Thorne en Preskill besloten een weddenschap af te sluiten: als één van beide partijen in de toekomst gelijk zou blijken te hebben zou die van de andere partij een encyclopedie naar keuze krijgen. De keuze voor een encyclopedie als prijs was daarbij natuurlijk bedoeld als knipoog naar het al dan niet bewaren van informatie.

Afbeelding 4. John Preskill, Kip Thorne en Stephen Hawking.Hawking, Preskill en Thorne sloten in 1997 een beroemde weddenschap af over de informatieparadox. Foto: Caltech / Heidi Aspaturian.

De weddenschap werd zoals gezegd in 1997 afgesloten, nadat er al ruim 20 jaar weinig voortgang was geboekt in het oplossen van de paradox. De tijd was echter rijp voor een oplossing: aan het eind van datzelfde jaar schreef Juan Maldacena een eerste versie van zijn artikel over de AdS/CFT-correspondentie. Uiteindelijk zou dat artikel ertoe leiden dat één van de partijen de weddenschap zou opgeven.

Naar boven

Holografie en informatie

Hoe kon holografie een licht werpen op de informatieparadox? Zoals we gezien hebben, is holografie een dualiteit tussen twee verschillende natuurkundige modellen: aan de ene kant een snaartheorie, waarin in het bijzonder de zwaartekracht een rol speelt, en aan de andere kant een ‘gewone’ quantumveldentheorie, waarin geen zwaartekracht voorkomt. Deze twee

modellen beschrijven op het oog heel verschillende natuurkunde, maar hebben de bijzondere eigenschap dat elk proces in de ene theorie ‘vertaald’ kan worden in een proces in de andere theorie, en dat daarmee elke berekening die voor het ene model gedaan kan worden, ook in het andere model kan worden uitgewerkt.

Het grote nut van deze dualiteit voor de informatieparadox ligt in het feit dat de quantumveldentheorie *geen* zwaartekracht bevat. Dat wil zeggen dat we voor berekeningen in die theorie *alleen* gebruik hoeven te maken van de wetten van de quantummechanica. En van die wetten weten we inmiddels dat informatie in alle processen behouden blijft! De redenering is daarmee eenvoudig: als we elk proces uit de snaartheorie kunnen vertalen in een proces in de veldentheorie, en als bij die laatste processen geen informatie verloren gaat, moet dus ook in de processen in de snaartheorie geen informatie verloren gaan. Maar de snaartheorie is een model van de quantumzwaartekracht waarin ook zwarte gaten voorkomen. We hebben dus een model van quantummechanische zwarte gaten waarin we – hoewel het doorrekenen van exacte processen heel lastig is – zeker weten dat er geen informatie verloren kan gaan!

Hoewel deze redenering overtuigend klinkt, moesten er nog wel de nodige details uitgewerkt worden. Het duurde enkele jaren voordat de meeste fysici ervan overtuigd waren dat het idee van Maldacena werkte, en dat op deze manier inderdaad uitspraken over de fysica van zwarte gaten konden worden gedaan. Dat was echter niet meer een kwestie van tijd, en in 2004 was ook Stephen Hawking ervan overtuigd dat de straling van zwarte gaten tóch informatie moet bevatten. Over hoe dat precies gebeurt was (en is) nog veel onduidelijkheid, maar Hawking zette in een artikel een aantal van zijn ideeën daarover uiteen, en gaf daarmee ook direct de weddenschap op. Later dat jaar kreeg John Preskill van hem zijn prijs overhandigd: een exemplaar van ‘Total Baseball – The Ultimate Baseball Encyclopedia’.

Afbeelding 5. Een gewonnen weddenschap.John Preskill houdt de encycopedie omhoog die hij zojuist van Stephen Hawking ontvangen heeft voor de gewonnen weddenschap. Afbeelding via de American Physical Society.

Daarmee heeft het holografisch principe dus een belangrijke bijdrage geleverd aan de theorie van zwarte gaten, maar het laatste woord over dit onderwerp is nog lang niet gezegd. Kip Thorne is bijvoorbeeld nog niet overtuigd van de juistheid van Hawkings nieuwe argumenten; zijn deel van de weddenschap met John Preskill loopt nog altijd. En ook de vraag hóe de straling van een zwart gat zijn informatie behoudt is nog altijd niet helemaal beantwoord. Ook in het onderzoek naar het antwoord op die vraag speelt holografie weer een centrale rol: het zou immers in theorie mogelijk moeten zijn om het hele proces van straling in de duale veldentheorie door te rekenen. In de praktijk zijn dergelijke berekeningen echter enorm gecompliceerd, en lopen we bij pogingen om ze te beantwoorden tegen allerlei nieuwe vragen aan. Diverse van deze vragen zijn al in eerdere artikelen op deze website besproken: zie bijvoorbeeld het artikel over de firewall-paradox en het artikel over 'ER=EPR'. Ook in de toekomstige artikelen in dit dossier zullen we nog diverse malen op de processen in en rond zwarte gaten terugkomen.

Naar boven

In het twaalfde artikel in dit dossier komen we een heel andere toepassing van het holografisch principe tegen: het principe leert ons lessen over de fysica in het allervroegste heelal.