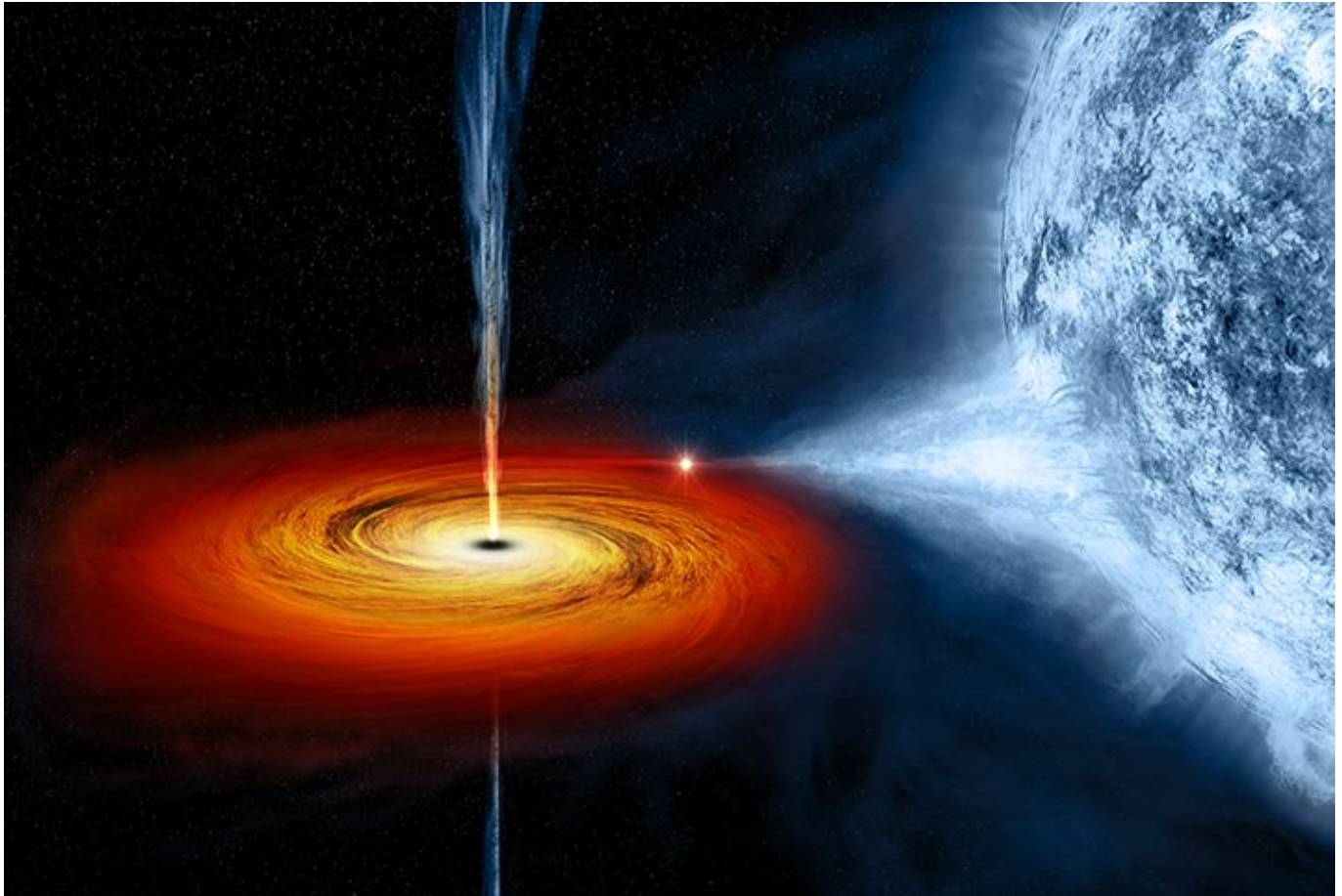


# Entropie (8): Entropie van zwarte gaten

Zwarte gaten zijn voor natuurkundigen enorm interessante objecten. Een van de belangrijkste resultaten uit de relativiteitstheorie van Albert Einstein is het feit dat er in het heelal een maximumsnelheid is: niets kan sneller bewegen dan de snelheid van het licht, zo'n 300.000 km/s. Een *zwart gat* is een plek in het heelal waar de zwaartekracht zó sterk is dat zelfs iets dat met de lichtsnelheid beweegt, niet aan die plek kan ontsnappen. Dat geldt dus ook voor het licht zelf - vandaar de naam "zwart gat". Een zwart gat kan bijvoorbeeld ontstaan als een uitgebrande zware ster onder zijn eigen zwaartekracht ineensloot, en zo een heel zwaar, compact object vormt.



**Afbeelding 1. Een zwart gat**Zwarte gaten kunnen niet met de huidige telescopen worden gezien; deze afbeelding is een “artist’s impression”. Het zwarte gat (links) slokt een nabijgelegen ster (rechts) op. (Afbeelding: NASA.)

De reden dat zwarte gaten voor natuurkundigen zo interessant zijn, is dat in deze objecten in een betrekkelijk klein gebied sprake is van een heel sterke zwaartekracht. Als gevolg daarvan spelen in de fysica van zwarte gaten zowel de relativiteitstheorie als de quantummechanica een belangrijke rol. Een van de grootste mysteries van de huidige theoretische natuurkunde is de vraag hoe deze twee fundamentele theorieën precies tot één geheel samengesmolten kunnen worden, en voor het bestuderen van die vraag zijn zware gaten dus de ideale objecten. Overigens gebeurt dat bestuderen voornamelijk op papier en in computers: doordat zwarte gaten geen licht uitstralen, is het vrijwel onmogelijk om ze aan de sterrenhemel te ontdekken en met behulp van telescopen te bestuderen. Wat we aan de sterrenhemel soms kunnen zien zijn de effecten van zwarte gaten – zoals de straling die vrijkomt als materie in een zwart gat valt – maar tot nu toe is het nog nooit direct gelukt om een zwart gat zelf waar te nemen.

In een apart artikel over zwarte gaten dat later verschijnt, vertellen we veel meer over deze boeiende objecten. Voor het huidige artikel is voornamelijk het volgende van belang: hoewel in een zwart gat alle materie naar een enkel *punt* toe valt (de zogenaamde singulariteit) kunnen we een zwart gat toch het beste beschrijven als een *gebied* in het heelal. Hoe dichterbij we namelijk bij de singulariteit komen, hoe sterker de zwaartekracht zal zijn, en op een gegeven moment zal die zwaartekracht zo sterk zijn dat een “point of no return” is bereikt. Vanaf dat punt is het niet meer mogelijk, zelfs niet voor iets dat met de lichtsnelheid beweegt, om aan het zwarte gat te ontsnappen. Een zwart gat heeft dus een denkbeeldige *horizon* om zich heen, die het gebied afbakent waarbinnen ontsnappen niet meer mogelijk is. Hoewel er rond de horizon niets anders is dan lege ruimte is het toch nuttig om de horizon te zien als het *oppervlak* van het zwarte gat.

Op het eerste gezicht zouden we zwarte gaten dus kunnen omschrijven als de “vuilnisbakken” van het heelal. Zodra iets in een zwart gat valt, is het voor de rest van het heelal verloren, en lijkt het geen enkele invloed meer uit te kunnen oefenen op de buitenwereld.

Dat die beschrijving de natuurkunde van zwarte gaten tekortdoet, blijkt als we bedenken welke rol zwarte gaten spelen voor de Tweede Hoofdwet. Stel dat we een natuurkundig systeem met een bepaalde entropie – bijvoorbeeld een gevulde gasfles – in een zwart gat laten vallen. De gasfles verdwijnt voor de buitenwereld volkomen, maar verdwijnt de *entropie* van het gas daarmee ook? Als dat het geval zou zijn, zou de totale entropie in het heelal afnemen, en dat zou in tegenspraak zijn met de Tweede Hoofdwet. Conclusie: óf de Tweede Hoofdwet is niet algemeen geldig, óf zwarte gaten hebben zelf een bepaalde entropie, die groeit naarmate er meer materie in het zwarte gat valt.

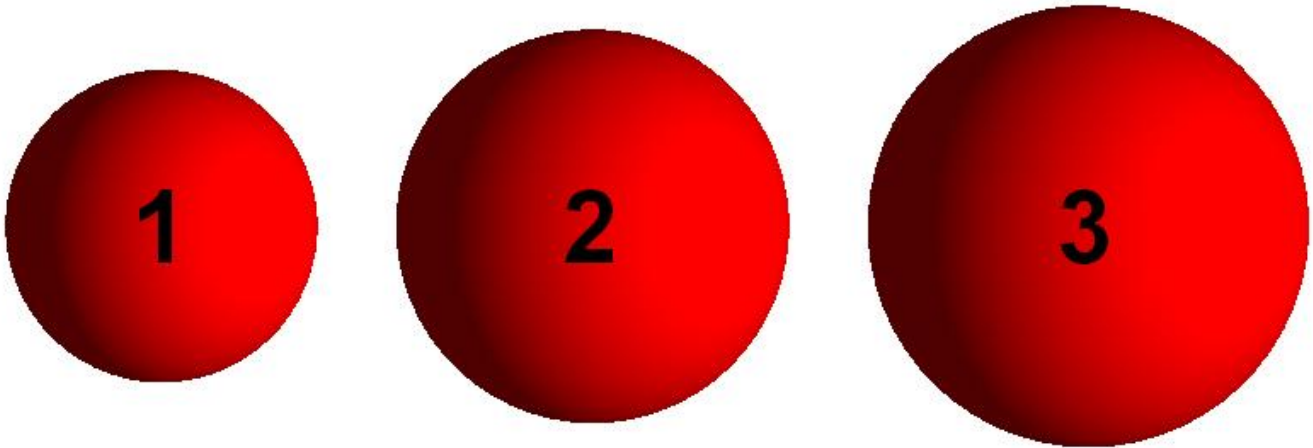


**Afbeelding 2. Stephen Hawking** Stephen Hawking toonde aan dat een zwart gat straling uitzendt. Hawking en Jacob Bekenstein lieten zien dat een zwart gat ook een entropie heeft, die toeneemt als de oppervlakte toeneemt.

Het blijkt dat van deze twee mogelijkheden de tweede het geval is: een zwart gat heeft inderdaad een grote entropie. Jacob Bekenstein en Stephen Hawking lieten zien dat die entropie evenredig is met het oppervlak van de horizon van het zwarte gat: als het zwarte gat in oppervlakte tweemaal zo groot wordt, wordt de entropie van het zwarte gat óók tweemaal zo groot. Dat resultaat leidt tot een aantal interessante vragen:

1) Voor veel systemen, zoals bijvoorbeeld gas in een gasfles, groeit de entropie evenredig met het *volume* van de fles: een verder identieke gasfles met een tweemaal zo grote inhoud heeft een tweemaal zo grote entropie. Waarom groeit de entropie van een zwart gat niet even snel als het volume, maar even snel als de *oppervlakte*? De laatste groei is beduidend kleiner – zie afbeelding 3. Het lijkt alsof de informatie over de “bouwstenen” van een zwart gat niet, zoals de atomen in bijvoorbeeld een gas, over de hele inhoud van het zwarte gat zijn verspreid, maar alsof die informatie zich op de een of andere manier op de horizon (het oppervlak) van het zwarte gat bevindt. Het blijkt dat dit laatste idee heel precies gemaakt kan worden: de natuurkunde in het zwarte gat (en in allerlei andere systemen waarin de zwaartekracht een rol speelt) kan beschreven worden met behulp van een zogenaamde *duale* beschrijving in een lagerdimensionale ruimte, zoals het oppervlak. De laatste beschrijving is dus een soort “hologram” van de hogerdimensionale zwaartekrachtstheorie;

we beschrijven dit idee veel uitgebreider in een dossier over het [holografisch principe](#).



**Afbeelding 3. Drie bollen**Drie bollen van verschillende groottes: bol 2 heeft tweemaal de inhoud van bol 1; bol 3 heeft tweemaal de oppervlakte van bol 1. Als een bol groter wordt, neem de inhoud dus beduidend sneller toe dan de oppervlakte.

2) Als een zwart gat een entropie heeft, verwachten we dat het ook een temperatuur heeft: volgens de Derde Hoofdwet is de entropie van objecten zonder temperatuur immers gelijk aan nul. Maar objecten die een temperatuur hebben, stralen warmte uit. Een zwart gat zou dus ook straling moeten uitzenden. Hoe is dat mogelijk, als er niets aan een zwart gat kan ontsnappen? Deze puzzel werd gedeeltelijk opgelost door Stephen Hawking: hij liet zien dat, door effecten die zich in zekere zin op de rand van het zwarte gat afspelen, een zwart gat toch een (meestal extreem kleine) hoeveelheid straling kan uitzenden. Na (meestal extreem lange) tijd kan een zwart gat hierdoor zelfs volledig “verdampen”. Meer over deze zogenaamde *Hawkingstraling* valt te lezen in een artikel over zwarte gaten dat later zal verschijnen.

3) Het verschijnsel van Hawkingstraling roept direct een volgende vraag op. De soort en hoeveelheid straling die een zwart gat uitzendt, hangt volgens Hawkings berekening namelijk alleen af van de *temperatuur* van het zwarte gat. De straling bevat dus nauwelijks informatie. Dat lijkt in tegenspraak met iets wat we eerder zagen: op microscopisch niveau zijn alle natuurwetten die we kennen omkeerbaar in de tijd. Dat houdt in het bijzonder in dat we, als we heel precies de eindsituatie van een proces kennen, ook kunnen terugrekenen om de begintoestand van dat proces te achterhalen. Zwarte gaten lijken door de Hawkingstraling echter in tegenspraak te zijn met dat principe. Als we een fiets van 15kg in een zwart gat

gooien en dat zwarte gat laten verdampen, ontstaat precies dezelfde eindsituatie – lege ruimte en veel straling – als wanneer we 15kg aardappelen in hetzelfde zwarte gat gooien en het laten verdampen. Dezelfde eindsituatie ontstaat dus uit twee heel verschillende beginsituaties, en de natuurkunde lijkt niet meer tijdomkeerbaar – of in wiskundige termen: niet meer *unitair*. Er zijn nu dus twee mogelijkheden: óf de unitariteit van de natuurkunde is niet zo'n fundamenteel principe als we dachten, óf de berekening van Hawking was niet helemaal correct en de straling van een zwart gat bevat toch een bepaalde hoeveelheid informatie. Welke van deze twee oplossingen de juiste is, is nog altijd een open vraag waarover veel gediscussieerd wordt. In een toekomstig artikel over unitariteit valt hierover veel meer te lezen.

Kortom: het betrekkelijk eenvoudige begrip entropie leidt, als we het toepassen op de natuurkunde van zwarte gaten, tot allerlei heel fundamentele en soms nog onbeantwoorde vragen over zwaartekracht en quantummechanica. Er is dus voldoende reden om dit al bijna tweehonderd jaar oude begrip nog uitgebreid verder te bestuderen!