Harige zwarte gaten en thermodynamica

In de natuurkunde verzinnen we soms, of, laten we eerlijk zijn: best wel vaak, rare namen voor de dingen die we willen beschrijven. Zo is het bijvoorbeeld niet ongebruikelijk om bij een lezing over harige zwarte gaten te horen. We hebben het zelfs soms over zachte haren van zwarte gaten. Je begint je misschien af te vragen waar men het dan in hemelsnaam over heeft. Deze woorden hebben echter een heel andere betekenis dan de gebruikelijke, wanneer het zwarte gaten betreft.

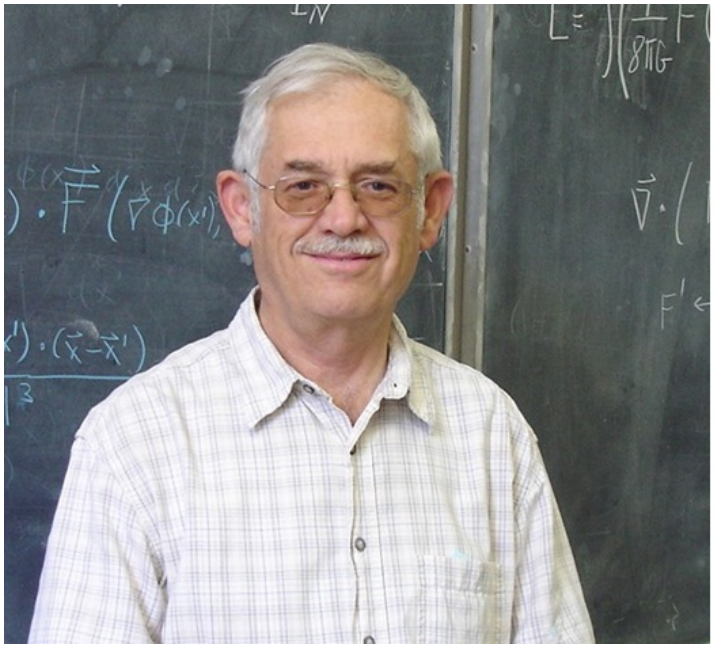


Afbeelding 1. Een Schotse Hooglander – oftewel: een harige koe. Afbeelding: George Hodan.

We beginnen met *niet*-harige zwarte gaten; laten we zeggen: kale zwarte gaten. Dit zijn zwarte gaten zoals je ze misschien wel kent uit andere artikelen op deze site, of uit andere populairwetenschappelijke literatuur. Het gaat dan om een object dat zo zwaar en compact is, dat de ermee geassocieerde zwaartekracht zo sterk is dat zelfs licht, wanneer het dichtbij genoeg komt, niet meer aan het object kan ontsnappen. Dit komt doordat de ruimtetijd door deze massa zo sterk gekromd wordt dat het pad van het licht naar binnen wordt gebogen tot het een zogenaamde singulariteit raakt. Het oppervlak wat een lichtstraal passeert, waarna het niet meer aan het zwarte gat kan ontkomen, noemen we de horizon van het zwarte gat.

Dat zulke objecten ook in de natuur zouden kunnen bestaan, werd het duidelijkst voorspeld door Einsteins algemene relativiteitstheorie in 1915. Zwarte gaten zijn namelijk oplossingen van Einsteins veldvergelijkingen, die je vertellen hoe de ruimte kromt door de aanwezigheid van energie in die ruimte, en hoe massa, dus energie, zelf onder invloed van die kromming beweegt. Een van de eerste oplossingen voor deze vergelijkingen werd gevonden door Duitse natuurkundige Karl Schwarzschild, in 1916, en die oplossing beschreef het nu naar hem vernoemde Schwarzschild-zwarte gat. Dit zwarte gat is heel simpel van structuur: zijn enige eigenschap is zijn massa, en alle andere eigenschappen, zoals de grootte van de horizon, worden bepaald door deze massa.

Vrij snel na Schwarzschilds ontdekking, tussen 1916 en 1921, werd onafhankelijk een oplossing gevonden door de Duitsers Hans Reissner, Hermann Weyl, de Fin Gunnar Nordström en Engelsman George Barker Jeffery: een beschrijving van een zwart gat met ook een elektrische (of magnetische) lading, naast de massa. Deze oplossing werd daarna een Reissner-Nordström-zwart gat genoemd. Ten slotte werd rond 1963, bijna 50 jaar later, ook een oplossing voor een zwart gat met een impulsmoment (dus: een draaiing) gevonden door Nieuw Zeelander Roy Kerr, en vervolgens een zwart gat met alle drie, massa, lading en impulsmoment, door de Amerikaan Ezra Newman. Een dergelijk zwart gat noemen we daarom een Kerr-Newman zwart gat.




Afbeelding 2. Jacob Bekenstein en John Archibald Wheeler. Afbeeldingen via Wikimedia Commons (links, rechts).

Het waren de Amerikaanse natuurkundigen John Wheeler en zijn toenmalige student Jacob Bekenstein, die het begonnen te hebben over *harige* zwarte gaten. Of eigenlijk: ze speculeerden dat zwarte gaten geen 'haar' hebben en formuleerden het zogenaamde *'no hair'*-theorema. Hiermee bedoelden ze dat je aan een eenmaal ontstaan zwart gat niet meer kan zien wat erin gegaan is om dat zwarte gat te vormen. Een zwart gat heeft daarmee eigenlijk maar drie onafhankelijke eigenschappen: de massa, de lading en het impulsmoment. Dit is ook te zien aan de oplossingen van Einsteins veldvergelijkingen die ik hierboven noemde: de enige ingrediënten die je in die oplossing moet stoppen zijn inderdaad de massa, de lading en het impulsmoment. Twee zwarte gaten die overeenkomen op de genoemde drie punten, zijn identiek. Je zou je bijvoorbeeld kunnen voorstellen dat je een zwart gat maakt door een hoop materie zonder lading samen te persen tot het de gewenste dichtheid bereikt, óf door hetzelfde te doen door een hoop antimaterie zonder lading samen te persen. Je kan volgens het no hair-theorema daarna niet aan het zwarte gat zien welke van de twee 'grondstoffen' je gebruikt hebt.

Zo'n situatie is hoogst ongebruikelijk, want normaal gesproken zijn er allerlei behouden grootheden aan materie of antimaterie die je nog zou moeten kunnen meten, zoals bijvoorbeeld het leptongetal, maar voor een zwart gat zouden zulke behoudswetten dus niet meetbaar zijn.. Het no hair-theorema werd in 1967 voor simpele gevallen bewezen door

Werner Israel, maar voor het meest algemene geval blijft het een hypothese.

Thermodynamica van zwarte gaten

Het no hair-theorema is niet het enige wat Bekenstein en Wheeler bedachten. Wheeler vroeg zijn student Bekenstein om over het volgende na te denken: als je een kopje thee hebt, dan heeft die thee een bepaalde entropie. Als je dat kopje thee vervolgens in een zwart gat gooit, wat gebeurt er dan met die entropie? Op een bepaalde manier meet de entropie van een systeem hoeveel informatie dat systeem bevat, of hoeveel informatie je uit dat systeem zou kunnen krijgen door metingen te doen. Als alles aan een zwart gat volledig bepaald wordt door drie getallen, is dat niet veel informatie. Een zwart gat zou dus een entropie van bijna nul moeten hebben. Maar als je een kopje thee, een object met een heel hoge entropie, in een zwart gat zou gooien, dan zou al die entropie dus verdwijnen. Kenners van de tweede wet van de thermodynamica gaan nu rechtop in hun stoel zitten: entropie mag nooit afnemen!

Om dit op te lossen wilde Bekenstein toch een bepaalde entropie toekennen aan het zwarte gat, en hij wilde om bovenstaande reden dat die definitie evenredig zou zijn met een grootheid van het zwarte gat die niet kan afnemen. Toevallig had niemand minder dan Stephen Hawking net zijn *oppervlaktewet* bewezen: het oppervlak van de horizon van een zwart gat neemt nooit af. Bekenstein stelde dus voor dat de entropie van het zwarte gat evenredig zou zijn met het oppervlak van de horizon. Anders verwoord: Bekenstein stelde voor dat je, om de entropie in een bepaalde hoeveelheid ruimte te berekenen, eerst alle entropie van de normale materie in die ruimte berekent, zoals je altijd zou doen, maar daar dan nog een term aan toevoegt die proportioneel is aan het oppervlak van de horizon van een zwart gat, als er een zwart gat in die ruimte is.

Het zo ontstane begrip noemde hij de *gegeneraliseerde entropie*. Hij kon ook meteen testen of deze gegeneraliseerde entropie aan de tweede wet van de thermodynamica voldoet: wat gebeurt er als je thee, of, om de berekening wat simpeler te maken, licht met wat entropie, in een zwart gat laat vallen? De entropie van de thee of het licht verdwijnt, maar het zwarte gat krijgt er energie, en dus massa, bij, en de horizon van het zwarte gat groeit een beetje. Daardoor neemt dus de term in de entropie die proportioneel is aan dat oppervlak toe. De vraag is dan of die toename genoeg is om te compenseren voor het verlies van de ‘normale’

entropie. Dat blijkt inderdaad zo te zijn, ten minste: als het licht wat je in het zwarte gat schijnt een golflengte heeft die korter is dan grofweg de grootte van het zwarte gat zelf. Voor licht met een langere golflengte gaf Bekenstein ook een, wat omslachtig en uiteindelijk niet kloppend, argument, maar we zullen hierna zien dat je eigenlijk precies zo'n afwijking zou verwachten.



Afbeelding 3. Stephen Hawking in vrije val. Foto: Jim Campbell/Aero-News Network.

Stephen Hawking vond het eigenlijk helemaal geen goed idee om een entropie toe te kennen aan het zwarte gat. Wat er dus gebeurde was dat hij ging proberen om Bekensteins ongelijk te bewijzen, maar in plaats daarvan kwam hij op hetzelfde antwoord uit: zwarte gaten hebben een entropie evenredig met het oppervlak van de horizon, en Hawking rekende ook de evenredigheidsconstante uit, waarmee hij kreeg dat

$$S_{BH} = \frac{A_{hor}}{4G \hbar},$$

waarin S_{BH} de entropie van het zwarte gat is, A_{hor} het oppervlak van de horizon, G de gravitatieconstante van Newton, en $\hbar$ Plancks constante uit de

quantummechanica. Dat laatste laat dus zien dat de entropie van een zwart gat een quantummechanisch effect is. De lichtsnelheid en Boltzmanns constante uit de thermodynamica zitten overigens ook in deze formule verstopt, maar zijn voor het gemak gelijk aan 1 gezet.

Hawking leidde niet alleen de precieze vorm van de formule af, maar liet ook zien dat deze entropie ontstaat door het feit dat zwarte gaten, wanneer er quantumvelden aanwezig zijn, straling uitzenden. Deze straling wordt dan ook Hawkingstraling genoemd. Dit is tegenintuïtief: zwarte gaten slokken alleen dingen op, en zenden volgens Einsteins omschrijving dus niets uit. Een vaak genoemd en enigszins gepopulariseerde uitleg voor het fenomeen dat er tóch straling wordt uitgezonden, is dat het vacuüm in quantumveldentheorie de hele tijd uit het niets paren van deeltjes en antideeltjes creëert, die elkaar normaal gesproken korte tijd daarna weer annihileren, maar waarvan er bij de horizon één in het zwarte gat valt, en er met de ander dus energie uit het systeem wegstraalt.

Wat blijkt nu? De Hawkingstraling heeft exact de golflengte van het licht dat de tweede wet van de thermodynamica overtreedt in Bekensteins redenering, en vormt de verklaring voor die overtreding. Met andere woorden: als Bekenstein iets verder door had geredeneerd, had hij misschien zelf de straling van zwarte gaten kunnen voorspellen! Dat een zwart gat straling uitzendt betekent overigens ook dat het langzaam verdampt, wat leidt tot een van de bekendste paradoxen van de theoretische fysica: de informatieparadox.

Terug naar harige zwarte gaten

We zien dus dat het toevoegen van quantumeffecten aan de ‘klassieke’ achtergrond van een zwart gat, leidt tot het interessante onderzoeksgebied van thermodynamica van zwarte gaten. Je zou je kunnen afvragen wat de status van het no hair-theorema is in dit veld. Als een zwart gat een bepaalde entropie heeft, hoe kan het dan volledig omschreven worden door maar drie getallen? Zwarte gaten zijn zelfs de meest hoogentropische objecten in ons universum! Toch kun je in deze context stellen dat het no hair theorema nog steeds enige waarde heeft: het beschrijft de toestand van het zwarte gat wanneer het in *thermisch evenwicht* is.

Een zekere versie van het no hair-theorema gaat namelijk ook op voor een normaal thermodynamisch systeem zoals een kopje thee. Giet je wat (haver)melk in je kokend hete

kopje thee, dan duurt het even voor de temperatuur overal in je kopje weer gelijk is, en het systeem dus weer een thermisch evenwicht bereikt. Je kopje thee is, nadat het dat thermische evenwicht heeft bereikt, volledig te beschrijven aan de hand van alleen zijn temperatuur, druk en volume: macroscopische grootheden. Voor zwarte gaten geldt hetzelfde, met nu massa, lading en impulsmoment. Zo behoudt het no hair-theorema toch zijn status, ook binnen de thermodynamica van zwarte gaten, alleen dan op een macroscopisch niveau. Op een microscopisch niveau zou een zwart gat quantummechanisch gezien dus wél haar hebben. Precies uitvinden welk 'kapsel' het zwarte gat draagt, is een van de grote open vragen in de moderne theoretische natuurkunde, zo zou je kunnen stellen.

Terug naar de vraag: als zwarte gaten geen haar hebben, waarom kun je dan toch in lezingen over harige zwarte gaten horen spreken? Dat is omdat veel natuurkundigen in een poging om de raadsels rond quantumzwaartekracht op te lossen ook graag nadenken over theorieën die afwijken van de normale zwaartekrachtstheorie van Einstein die geformuleerd is in vier ruimtetijddimensies. Ze beschouwen dan theorieën die een beetje hiervan afwijken, of die meer dimensies hebben. In het bijzonder denkt men graag na in 10 of 11 dimensies, omdat dit is waar snaartheorie zijn spieren laat zien. In deze hogere dimensies, of in deze afwijkende theorieën, heb je wel degelijk zwarte gaten met veel meer eigenschappen dan alleen de drie genoemde, en dus spreekt men daar ook wel van harige zwarte gaten[1].

Je hoeft overigens niet over zulke exotische dingen na te denken om het over harige zwarte gaten te hebben. In recente jaren heeft men het ook wel over de *zachte* haren van een zwart gat. Een zwart gat zou zelfs 'oneindig veel zachte haren hebben'. *Zacht* betekent in de hoge-energiefysica simpelweg dat het gaat om deeltjes met een heel lage energie. Zo noemen we een foton met een energie die vrijwel nul is, en dus met een heel grote golflengte, een zacht foton, en zo zijn er bijvoorbeeld ook zachte gravitonen. Recent zagen we in een artikel van Ameya Kadhe dat deze zachte deeltjes een heel diepe band hebben met de zogeheten *asymptotische symmetrieën* van een ruimtetijd. Het meenemen van de effecten van deze zachte deeltjes in de berekeningen, leidt tot een 'deken van zacht haar' over de horizon van het zwarte gat. Dit werd gepostuleerd door Hawking in een van zijn laatste artikelen, samen met Sasha Haco, Malcolm Perry en Andrew Strominger. Het bestaan van dit zachte haar zou zelfs een gedeelte vormen van een oplossing voor de eerder genoemde informatieparadox! Wat deze zachte deeltjes nu precies voor de informatieparadox betekenen, is een mooi

onderwerp voor een toekomstig artikel.

---

[1] Richard Feynman had nog zijn bedenkingen bij zulk obsceen klinkend taalgebruik, maar dit werd snel weggewuifd door Wheeler.