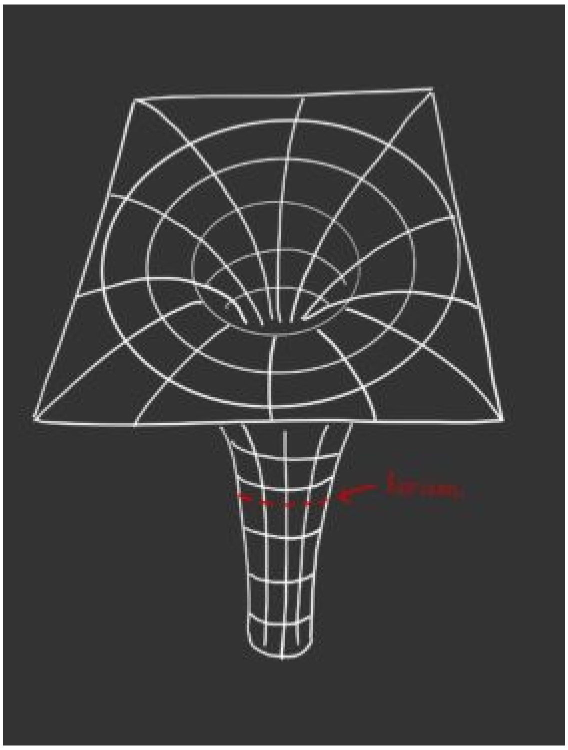
Zakken goud achter de horizon

Het gegeven dat zwarte gaten een entropie hebben, brengt vele vraagstukken met zich mee, zoals de veelbesproken informatieparadox. Een andere, minder bekende paradox is die van de ‘zak goud’: in dit geval niet onderaan de regenboog, maar achter de horizon van een zwart gat.

Afbeelding 1. Ligt er goud achter de horizon van een zwart gat? Afbeelding via Pikist.

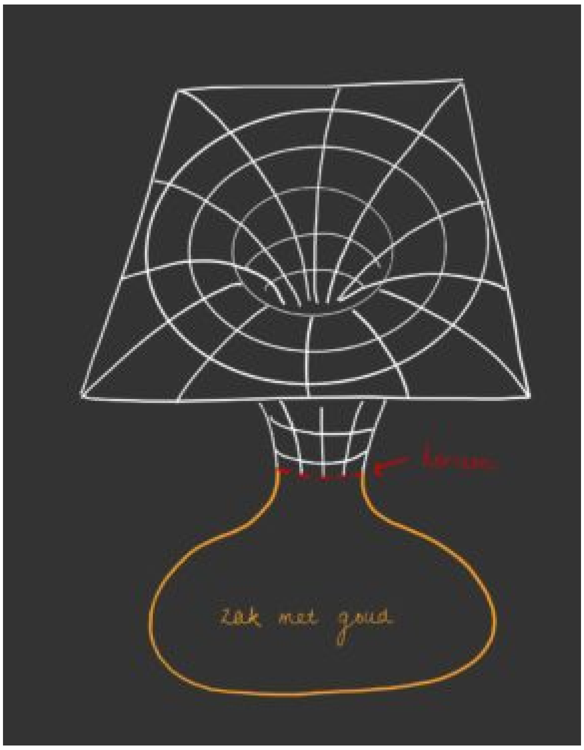
Sinds de jaren 70 weten we dankzij het werk van Jakob Bekenstein en Stephen Hawking dat zwarte gaten een entropie hebben, een eigenschap die iets zegt over de hoeveelheid informatie die het zwarte gat bevat, en dat die entropie evenredig is met hun oppervlakte. Wordt het zwarte gat in oppervlakte dus tweemaal zo groot (bijvoorbeeld omdat het een ster opslokt), dan wordt de entropie ook tweemaal zo hoog. Entropie wordt vaak geïnterpreteerd als een thermodynamische grootheid – de entropie zegt iets over hoeveel arbeid het zwarte gat bij een bepaalde temperatuur kan verrichten. Er is echter ook een microscopische interpretatie van entropie: die telt volgens de statistische fysica het aantal *microscopische toestanden* waarin een systeem – in dit geval een zwart gat – zich kan bevinden. In de jaren 90 lukte het de snaartheoretici Andrew Strominger en Cumrun Vafa voor het eerst om contact te maken met deze tweede interpretatie: zij 'telden' het aantal mogelijke manieren om een zwart gat te bouwen uit snaren en zogeheten *D-branes*. De uitkomst was precies gelijk aan de thermodynamische entropie van Bekenstein en Hawking en betekende een belangrijke doorbraak in de snaartheorie.

Een op het eerste gezicht puur filosofische, maar toch zeer cruciale vraag luidt: *welke* microscopische toestanden telt de Bekenstein-Hawking entropie? Hebben Strominger en Vafa *alle* toestanden geteld waarin het zwarte gat zich kan bevinden, of alleen de toestanden die *van buitenaf* van elkaar te onderscheiden zijn? Een goed voorbeeld aan de hand waarvan we kunnen zien wat het verschil tussen deze twee is, heet de 'zak met goud'-ruimtetijd.



Afbeelding 2. Een ‘gewoon’ zwart gat.

De *bag of gold spacetime* werd in de jaren zestig geïntroduceerd door de natuurkundige John Wheeler. Het idee is simpel: we nemen een zwart gat in de verder lege ruimtetijd, snijden in gedachten de diepe ‘put’ achter de horizon weg en naaien in plaats daarvan een uitdijend heelal aan de horizon. Binnenin het zwarte gat zit dan dus in zekere zin een heel nieuw heelal! (Dat de natuurwetten een dergelijke constructie toestaan is natuurlijk niet vanzelfsprekend. De natuurkunde hierachter is preciezer en ingewikkelder dan hier is beschreven: bij het ‘aannaaien’ komt een hoop wiskunde kijken om ervoor te zorgen dat de spreekwoordelijke naad glad is afgewerkt). In afbeelding 2 is een schematische weergave van een zwart gat te zien. De ruimtetijd (het witte raster) is zeer sterk gekromd – zodanig dat als je voorbij de horizon (de rode stippellijn) komt, je nooit meer omhoog kan ‘klimmen’: je kan nooit meer ontsnappen uit het zwarte gat. In afbeelding 3 zien we dezelfde ruimtetijd en horizon, maar met daarachter een grote ‘zak’. We zouden daar in theorie naartoe kunnen reizen via het zogeheten wormgat – de verbinding door de horizon heen. Over zulke wormgaten kun je bijvoorbeeld in dit artikel meer lezen. Aangezien de zak goud/het nieuwe heelal achter de horizon ligt, zullen we echter nooit meer terug kunnen gaan om onze vondst met de wereld te delen.



Afbeelding 3. Een zwart gat met een "zak met goud".

De reden dat deze constructie een 'zak met goud' wordt genoemd, heeft te maken met de entropie die zo'n 'zak' kan bevatten. Voor een zwart gat van een bepaalde (vaste) massa *M* kunnen we het uitdijende heelal achter de horizon (de zak) precies uitrekenen en zo groot maken als we willen. Zo'n uitdijend heelal heeft een karakteristieke tijdsafhankelijke *schaalfactor,* die we meestal *a(t)* noemen, en de energiedichtheid ρ in zo'n heelal is evenredig met $1/a(t)^2$ en bestaat bijvoorbeeld uit thermische straling. Daarbij hoort ook een entropie ter grootte van:

$$S \sim Volume \times \rho^{3/4} \sim a(t)^{3/2}$$

In theorie zou het heelal/de zak oneindig groot kunnen uitdijen (oftewel $a \to \infty$), met daarmee dus ook een oneindig grote entropie – wat zou betekenen dat er een oneindig groot aantal mogelijke toestanden schuilgaat achter de horizon. Dit strookt echter niet met de (eindige) Bekenstein-Hawking entropie, die bepaald wordt door het oppervlak van de horizon!

Als 'bags of gold' inderdaad een willekeurig groot aantal toestanden binnenin een zwart gat kunnen 'verstoppen', welke eindige deelverzameling van toestanden hebben Strominger en Vafa dan geteld? Er zijn grofweg twee mogelijke oplossingen:

- De ‘zak met goud’-ruimtetijd is een *semi-klassieke* beschrijving en berust niet op een volledige theorie van quantumzwaartekracht (zoals de snaartheorie waarin Strominger en Vafa hun berekening deden). Het zou kunnen dat de (oneindig veel) toestanden in de zak met goud niet allemaal verschillende, goed gedefinieerde toestanden zijn in zo’n volledige theorie. In dat geval is het aantal toestanden in de ‘bag of gold’ dus toch eindig, en hebben Strominger en Vafa mogelijk wél alle toestanden geteld.
- De meeste van de toestanden binnenin een zwart gat (en dat kunnen er dan wel degelijk oneindig veel zijn) zijn niet waar te nemen van buiten het zwarte gat en worden in de berekening van Strominger en Vafa daarom niet meegeteld.

Dit tweede punt geeft een interessante oplossing maar is eigenlijk nog subtieler, en leidt tot extra vragen die te maken hebben met de AdS/CFT-correspondentie. De discussie over zakken met goud betreft meestal een zwart gat in een *Anti-de Sitter-ruimtetijd* (een ruimtetijd met een negatieve kromming en een rand – een favoriete ‘speeltuin’ voor theoretisch natuurkundigen). Het idee van AdS/CFT is dat alles wat in de ruimtetijd gebeurt, ook begrepen kan worden door alleen naar de rand van die ruimtetijd te kijken. Dat betekent ook dat in principe alles in de ruimtetijd gevormd moet kunnen worden door bepaalde manipulaties uit te voeren op de rand – zo kan men in de theorie een zwart gat maken door deeltjes vanaf de rand ‘naar binnen te gooien’, tot ze zich zo sterk ophopen dat ze een zwart gat vormen. Het probleem met onze zak met goud-constructie is dat het niet duidelijk is of een dergelijk complex zwart gat ook gemaakt kan worden vanaf de rand – en dus of zo’n constructie wel is toegestaan volgens de wetten van de natuur.

Het feit dat de quantumzwaartekracht-theorie het bestaan van ‘bags of gold’ niet uitsluit leidt dus tot allerlei interessante raadsels en vragen binnen de theoretische natuurkunde. Deze vragen zijn nog altijd onderwerp van discussie binnen de AdS/CFT-gemeenschap, dus het antwoord kunnen we hier nog niet geven. Vooralsnog zullen we genoegen moeten nemen met het standpunt dat de Bekenstein-Hawkingentropie in elk geval de toestanden telt die we van buitenaf kunnen onderscheiden – of er zich daadwerkelijk een zak met goud achter de horizon kan bevinden, is een mysterie waar we in de toekomst meer over hopen te leren.