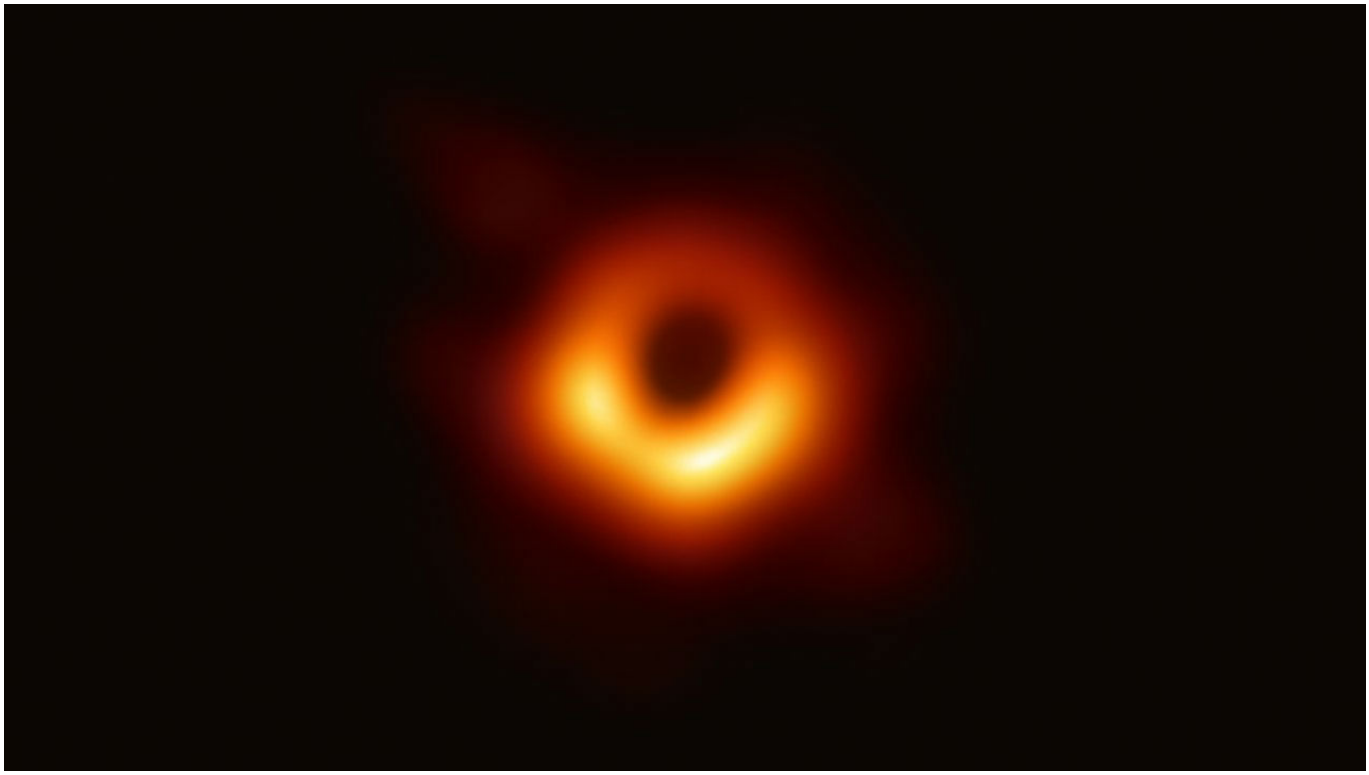
# Hoe maak je een zwart gat in het lab?

**Het zwarte gat is een van de meest tot de verbeelding sprekende soorten objecten in ons heelal: een hoeveelheid materie die zo ontzettend dicht op elkaar gepakt zit dat haar zwaartekracht iedere raket, en zelfs iedere lichtstraal die probeert te ontsnappen, genadeloos terugtrekt. Superzware zwarte gaten bepalen de vorm en bewegingen van hele melkwegstelsels; zwarte gaten staan aan de wieg van speculatieve scifi-structuren als wormgaten die reizen over kosmische afstanden en terug in de tijd mogelijk zouden maken, en zwarte gaten inspireren de nieuwste inzichten in de moderne natuurkunde, van het holografisch principe tot kosmologie.**



**Afbeelding 1. Een zwart gat.** Tegenwoordig kunnen we enkele zwarte gaten in het heelal op de foto zetten. Maar kunnen we ook zwarte gaten maken – of op zijn minst: nabootsen – in

laboratoria op aarde? Foto: EHT Collaboration.

Ondanks het overweldigende bewijs dat zwarte gaten echt voorkomen op plekken in het heelal waar we ze verwachten, en dat hun zwaartekracht precies is zoals we van ze verwachten, mist er nog een groot puzzelstuk in het begrip dat natuurkundigen hebben van zwarte gaten. De materie die samengepakt zit in zwarte gaten bestaat namelijk uit heel veel quantumdeeltjes, en van quantumdeeltjes weten we dat die zich soms raar gedragen. Quantumdeeltjes kunnen bijvoorbeeld tunnelen, waarbij ze door plekken heen bewegen waar een alledaags object zoals een tennisbal nooit zou kunnen komen. Quantumdeeltjes binnen in een zwart gat zouden volgens de quantumtheorie het zwarte gat uit moeten kunnen tunnelen, ook al kan een alledaags object als een raket zoiets nooit voor elkaar krijgen. Volgens de quantumtheorie zorgen die wegtunnelende deeltjes ervoor dat het zwarte gat langzaam verdampt: het kan dus niet alles vasthouden wat erin valt, maar zet alles wat er ooit in gevallen is uiteindelijk om in tunnelende quantumdeeltjes die weer uitgestraald worden.

Dat de quantumtheorie voorspelt dat zwarte gaten verdampen, is een probleem voor wetenschappers, want het lijkt in te gaan tegen een van de meest fundamentele wetten van de quantumtheorie zelf. Die wet zegt grofweg dat je van een verzameling quantumdeeltjes altijd net zo gemakkelijk hun posities en andere eigenschappen in de toekomst kunt voorspellen als dat je kunt terugredeneren hoe die posities en andere eigenschappen in het verleden geweest zijn. Bij een verdampend zwart gat kan dat niet: van een deeltje dat in een zwart gat valt en er dan weer uit tunnelt kun je prima voorspellen wat het verder nog zal gaan doen, maar het is onmogelijk om te achterhalen waar het geweest is voordat het in het zwarte gat viel. Verdampende zwarte gaten lijken dus aan de ene kant onvermijdelijk omdat de materie die in zwarte gaten terechtkomt uit quantumdeeltjes bestaat, maar aan de andere kant lijken ze ook onmogelijk omdat die verdamping in tegenspraak zou zijn met de wetten van de quantumtheorie.

Zo’n ogenschijnlijk onoplosbaar probleem geeft in de wetenschap altijd aan dat er nog iets nieuws te ontdekken valt. In dit geval is het bijvoorbeeld nog helemaal niet duidelijk wat er precies gebeurt met quantumdeeltjes binnen in het zwarte gat. Omdat we niet van buitenaf het zwarte gat in kunnen kijken, kunnen we ook niet zien of de quantumdeeltjes daar misschien onverwachte dingen doen, en of het tunnelen naar de buitenkant wel precies

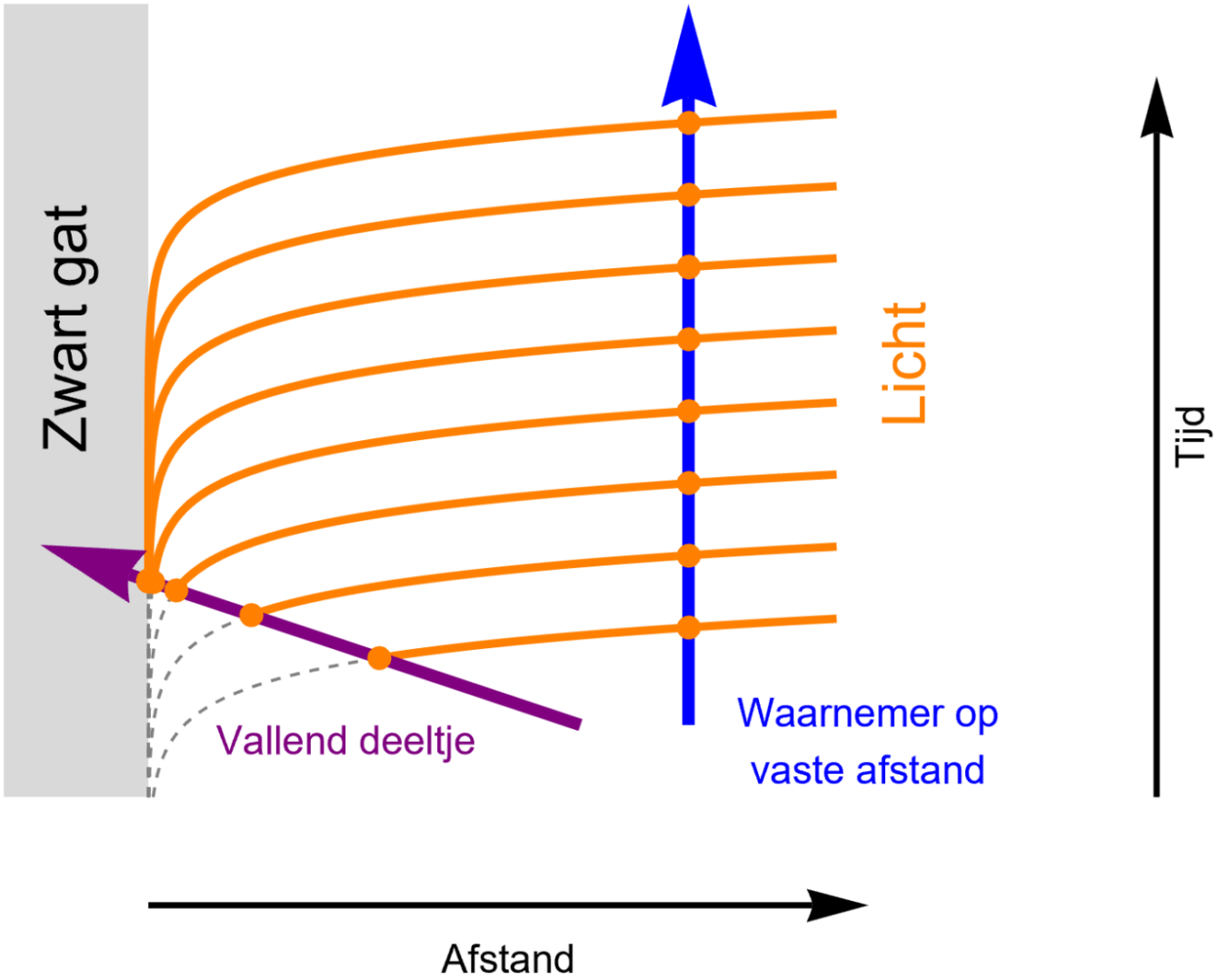
gebeurt op de manier die we verwachten. Wat onderzoekers eigenlijk nodig hebben is een 'test'-zwart gat in het lab, waar ze experimenten mee kunnen doen, en waarvan ze de quantumdeeltjes die erin vallen en eruit tunnelen precies kunnen volgen.

Natuurlijk is het een erg slecht idee om een zwart gat te maken in een laboratorium, dat vervolgens alles in het lab, het lab zelf, en de hele wereld zou kunnen opslokken. Gelukkig is het ook onmogelijk om dit voor elkaar te krijgen met de relatief zwakke krachten die we op aarde kunnen genereren. Maar wat misschien wel zou kunnen, is het ontwerpen en maken van zogenaamde 'analoge zwarte gaten': natuurkundige experimenten of opstellingen die niet precies een zwart gat zijn, maar die wel bepaalde eigenschappen van een zwart gat heel precies nabootsen. Ze vormen als het ware een analogie van een zwarte gat. Het idee om zulke analoge zwarte gaten te gebruiken om echte zwarte gaten beter te begrijpen, is net zoiets als het gebruik van dummies bij het begrijpen wat er met een lichaam gebeurt tijdens een autobotsing, of het testen van een schaalmodel voor een dam voordat je hem in het echt bouwt.

Analoge zwarte gaten kunnen in principe op verschillende manieren gemaakt worden, bijvoorbeeld met geluidsgolven in stromend water, lichtstralen in metamaterialen, of met elektronen in een speciaal ontworpen arrangement van atomen. In de praktijk blijkt het echter ontzettend moeilijk te zijn om het water, de metamaterialen of de atoomroosters precies zo te krijgen dat ze op een zwart gat beginnen te lijken. Vooralsnog bestaan analoge zwarte gaten dus alleen op papier, maar verschillende groepen onderzoekers in de wereld komen steeds dichter bij het daadwerkelijk realiseren van analoge zwarte gaten in het lab.

Welke eigenschappen van een zwart gat precies nagebootst worden in een analoog experiment, hangt af van de precieze opstelling. Een van de meest geprobeerde dingen is om een analoog zwart gat te maken waarin de quantumdeeltjes dezelfde krachten voelen als ze zouden voelen tijdens het vallen in een echt zwart gat. Als dit lukt, is ook het traject dat door het deeltje afgelegd wordt (zijn positie op elk tijdstip) gelijk aan het traject dat je zou verwachten voor een deeltje dat in een echt zwart gat valt. Dit is op zichzelf al een interessant experiment om te doen, omdat iemand die vanaf een afstandje kijkt wat er gebeurt met een deeltje dat ze naar het zwarte gat toe gooit, dat deeltje nooit in het zwarte gat ziet verdwijnen! Om het deeltje te zien moet ze immers licht kunnen opvangen dat door het deeltje uitgezonden of weerkaatst wordt, en als het deeltje te dicht bij het zwarte gat

komt wordt zulk licht door het zwarte gat aangetrokken en doet het er bijna oneindig lang over om op een afstand geobserveerd te worden. Het gevolg is dat het deeltje vanaf een afstand gezien er oneindig lang over lijkt te doen om dicht bij het zwarte gat te komen. Dit effect, waarbij deeltjes eindeloos lijken te ‘blijven hangen’ als je ze in het zwarte gat probeert te gooien, kun je precies nabootsen in een experiment met een analoog zwart gat.




**Afbeelding 2. Een val in een zwart gat.** Een vallend deeltje (paars) komt terecht in een zwart gat (het grijze gebied). Horizontaal staat de afstand tot het zwarte gat uitgezet; verticaal de tijd. Een waarnemer op vaste afstand (blauw) vangt op elk tijdstip licht op dat het invallende deeltje heeft uitgezonden voordat het de rand van het zwarte gat bereikte. Voor de buitenstaander lijkt het deeltje dus nooit de rand van het zwarte gat te bereiken!

Een echt zwart gat doet echter meer dan alleen krachten uitoefenen op deeltjes. Zoals beschreven door Albert Einstein, vervormt alle materie, en zeker ook een zwart gat, de

ruimte eromheen. Die onzichtbare vervorming van de ruimte wordt door verschillende personen op verschillende manieren ervaren, afhankelijk van hoe ze zich bewegen. Dit effect lijkt een beetje op de onzichtbare wind die de koers van een luchtballon beïnvloedt. Bij ideale omstandigheden bewegen de ballon en de wind met dezelfde snelheid – zelfs als de windsnelheid steeds verandert en er dus krachten op de ballon werken. In de luchtballon merk je dan niets van de wind, en zolang je niet naar de aarde kijkt kun je uit niets opmaken dat er een kracht op de ballon werkt. Vanaf de aarde gezien echter, zal de ballon met grote, steeds veranderende snelheid voorbij schieten en kan er wel degelijk een kracht gemeten worden die op de ballon werkt. De kromming van de ruimte werkt op soortgelijke manier als de wind, en de manier waarop je de krachten ervaart die door de kromming veroorzaakt worden, hangt af van je eigen omstandigheden.

Hier komen we op een belangrijk verschil tussen analoge zwarte gaten en echte zwarte gaten. Ook al kan een analoog zwart gat namelijk precies het traject van een deeltje dicht bij een echt zwart gat nabootsen, het kan dit alleen vanuit één enkel gezichtspunt. Het effect van de ‘wind’ of ruimtekromming is bij analoge zwarte gaten dus al vastgelegd in de manier waarop ze gemaakt worden. De vorm van het kanaal waar water doorheen stroomt, of de keuze voor een bepaald arrangement van atomen in een analoog zwart gat, bepaalt niet alleen het traject van een vallend deeltje, maar ook hoe dit traject gezien kan worden. Er is bijvoorbeeld geen manier om bij het deeltje dat er oneindig lang over lijkt te doen om in een analoog zwart gat te vallen, te meten hoe dat deeltje het vallen zelf ervaart, ook al weten we uit berekeningen aan echte zwarte gaten dat het voor het deeltje moet lijken alsof het al snel het zwarte gat ingetrokken wordt.

Met behulp van analoge zwarte gaten hopen wetenschappers experimenten te gaan doen waarmee hun meer paradoxale eigenschappen bestudeerd kunnen worden, zoals de gesuggereerde verdamping door quantumtunnelen. Hoewel de analoge zwarte gaten die daarvoor nodig zijn nog niet daadwerkelijk gemaakt zijn in het lab, is het nu al mogelijk om meer te leren over zwarte gaten door te analyseren wat we zouden verwachten te zien in mogelijke experimenten. Om bijvoorbeeld te leren over het instorten van een ster en de vorming van een zwart gat, kun je een experiment overwegen waarin we beginnen zonder analoog zwart gat, en er dan plotseling één introduceren. Wat zou je verwachten dat er dan te zien is vanuit het gezichtspunt van iemand ver van het analoge zwarte gat vandaan? Het antwoord dat wetenschappers voorspellen is dat in het echt zo iemand *straling* uit het nieuw-

gevormde zwarte gat zal zien komen, veroorzaakt door quantumtunnelen. Voor het analoge zwarte gat kunnen wetenschappers nu uitrekenen dat er inderdaad straling te zien zal zijn, en dat die straling precies de verwachte temperatuur zal hebben!

Maar er is een onverwachte wending: diezelfde berekening voor het analoge zwarte gat laat, onverwacht, ook zien dat die straling die daaruit komt niet door tunnelen vanuit het zwarte gat veroorzaakt wordt. In plaats daarvan bestaat de straling uit quantumdeeltjes die zich gedragen als golven, en die tijdens de formatie van het analoge zwarte gat verstrengeld raken met deeltjes binnen in het zwarte gat. Gezien vanuit het gezichtspunt van iemand ver weg, ziet die verstrengelde toestand van deeltjes binnen en buiten het analoge zwarte gat er precies zo uit als de verwachte straling van een echt zwart gat, zonder dat er deeltjes hoeven te tunnelen. Of dit betekent dat echte zwarte gaten ook kunnen stralen zonder tunnelen, en of dit het raadsel kan oplossen waarmee ik dit artikel begon – de vraag óf, hoe en waarom zwarte gaten verdampen, is nog niet te zeggen – maar experimenten met analoge zwarte gaten zijn dé manier om hier uiteindelijk achter te komen.