

## Zwarte gaten, de sleutel tot quantum-gravitatie?

Chiel Postma en Selma Verhoeven

Gerard 't Hooft is Nederlands meest vooraanstaand theoretisch natuurkundige. Hij leverde in de jaren zeventig belangrijke bijdragen aan de ontwikkeling van de ijktheorieën die gebruikt worden in de beschrijving van de wisselwerkingen van de elementaire deeltjes. De laatste jaren gaat zijn aandacht uit naar zwarte gaten. Het probleem is het vinden van een consistente quantummechanische beschrijving van zwarte gaten, een probleem dat direct verbonden is met de veel bezongen en nog meer gesmade 'Theorie van Alles'. Hierover spraken we met Gerard 't Hooft in zijn werkkamer te Utrecht.

"Toen mijn kinderen klein waren zeiden ze dat ze later geen natuurkundige wilden worden, want 'dan zit je drie uur lang naar een vel wit papier te staren.'" Dat staren is voor Gerard 't Hooft niet zonder vrucht gebleven. Als jong promovendus van Martin Veltman bewees hij begin jaren zeventig dat spontaan gebroken ijktheorieën renormaliseerbaar zijn. Dit was een heel belangrijk resultaat want het betekende dat het enkele jaren eerder door Weinberg en Salam ontwikkelde model voor de elektrozwakke kracht wiskundig consistent is. In 1974 ontdekte 't Hooft, onafhankelijk van Alexander Polyakov, dat sommige modellen voor de elektrozwakke kracht magnetische monopolen als oplossingen toelieten.

Voorts schreef 't Hooft het boek 'De bouwstenen van de schepping', waarin hij de recente ontwikkelingen in de hoge-energie fysica voor een groot publiek toegankelijk maakt.

Hij houdt zich nu al geruime tijd bezig met het onderzoek van zwarte gaten.

*Waarom zijn zwarte gaten zo interessant in de hoge-energie fysica?*

"We zijn de periode van de hele grote ontdekkingen in de deeltjesfysica een beetje gepasseerd. Het standaardmodel werkt buitengewoon goed. Er zijn nog wel vragen maar die zijn erg moeilijk te onderzoeken.

"De voor een theoreticus bij uitstek intrigerende vraag is nu hoe de natuur eruit ziet bij veel kleinere afstandsschaal dan waar de gewone deeltjesfysica mee werkt. Er heerst grote onzekerheid en onbegrip over hoe de zaak daar aangepakt moet worden. Helaas zijn directe experimenten op dit

gebied absoluut onmogelijk, zodat die belangrijke steun voor dit onderzoeksterrein weggevallen is. We moeten het helemaal doen met onze intellectuele capaciteiten en die zijn wat grillig, vandaar dat het vak er vaak een beetje raar uitziet.

"Zwarte gaten moeten in de natuurkunde bij de Planckschaal op de een of andere manier een heel essentiële rol spelen. In de quantummechanica weet je dat alle vormen van materie tijdelijk als virtuele deeltjes voor kunnen komen. Ze kunnen worden gecreëerd en geannihileerd en op die manier beschrijf je de interacties. Dat zou ook zo moeten zijn voor dingen die je zwarte gaten zou kunnen noemen. Op kleine afstandschaal zouden die virtueel moeten kunnen worden gemaakt en weer vernietigd. Als je gaat schatten waar in de natuurkunde virtuele zwarte gaten een rol zouden

---

### Vragen over zwarte gaten zijn daarom heel wezenlijke vragen over hoe de natuur in elkaar zit.

---

kunnen spelen dan is dat altijd bij de formulering van de natuurwetten op de Planckschaal. Het blijkt dat je hierbij op heel fundamentele problemen stuit. En die problemen worden alleen maar erger als je naar grotere zwarte gaten kijkt.

"Vragen over zwarte gaten zijn daarom heel wezenlijke vragen over hoe de natuur in elkaar zit. Als je maar een staartje van een antwoord te pakken zou kunnen krijgen, dan kun je misschien een hele nieuwe theorie boven water halen.

"De situatie is niet onvergelykbaar met de situatie aan het begin van deze eeuw. Toen stelde men zich in de statistische fysica vragen over de straling

uitgezonden door verhitte lichamen. Einstein vroeg zich af wat een waarnemer ziet die zittend op een lichtgolf meebeweegt met het licht. De standaardtheorie gaf steeds een antwoord dat om logische redenen niet goed kon zijn. Door maar door te vragen en gedachtenexperimenten te doen, kwam men er uiteindelijk toch uit en de verstrekkende gevolgen zijn bekend. De situatie waarin we nu verkeren is daarmee wellicht goed vergelijkbaar.”

*Wat is nu het probleem?*

“Je zou het proces van een zich vormend zwart gat dat vervolgens straling gaat uitzenden quantummechanisch willen beschrijven. Daarvoor heb je een Hilbertruimte van toestanden nodig waarin het zwarte gat mag verkeren. Die ruimte wil je specificeren en je wilt weten hoeveel vrijheidsgraden een zwart gat heeft. Maar je komt tot tegenstrijdige antwoorden. Reken je het op manier A uit dan krijg je oneindig, reken je het op manier B uit dan zegt het gezonde verstand dat er een eindig getal uit moet komen. De theorie die we nu hebben geeft dus geen eensluidend antwoord. Dat mag niet verbazen want we hebben geen echt goede theorieën.”

*Is dit het probleem van informatieverlies?*

“Ja. Alles wat in een zwart gat valt is voorgoed verdwenen, het is zelfs niet meer te reconstrueren uit de gedragingen van het zwarte gat. Dat althans is de visie van Stephen Hawking. Maar deze wordt erg bestreden. Ik geloof er ook niet zo in. Het standaardantwoord is afgeleid met de beperkte theoretische middelen die we nu hebben en waarvan we weten dat ze niet helemaal goed zijn. Maar het is heel erg moeilijk een alternatieve theorie op te stellen.”

---

---

### **Dat mag niet verbazen want we hebben geen echt goede theorieën.**

---

---

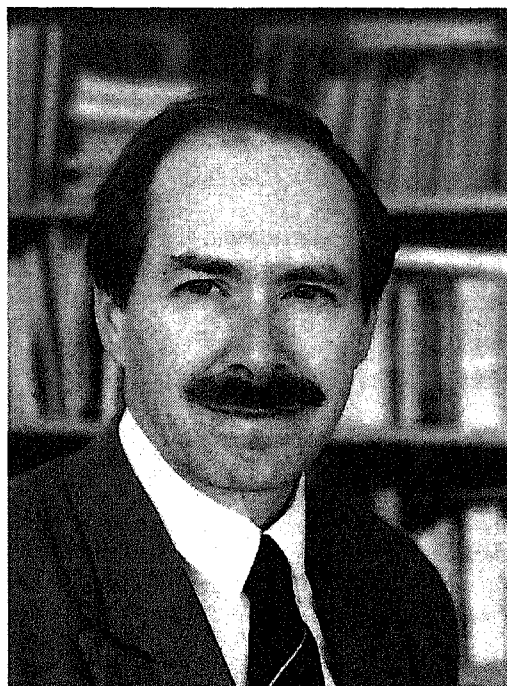
*Kunt u het verschil in standpunt tussen u en Hawking iets nader toelichten?*

“Hawking zegt dat het zwarte gat in zijn geheel niet quantummechanisch te beschrijven is. Het is niet zonder meer mogelijk voor een zwart gat een schrödingervergelijking op te stellen. Hij zegt dat dat komt omdat er nog een heelal achter dat zwarte gat zit waar informatie naar toe kan sijpelen. Je maakt een fout als je in je berekeningen vergeet

dat heelal mee te nemen, wat je normaliter doet omdat je niets van dat andere heelal ziet. Hawking neemt daarom een vergelijking waarin de dichtheidsmatrix in plaats van de golf functie centraal staat.

“Maar dan zijn er ineens een heleboel nieuwe vragen waarop je geen of een onduidelijk antwoord krijgt. Voor zwarte gaten zou de wet van behoud van energie moeten gelden, met name ook voor hele kleine zwarte gaten, maar bij zo'n vergelijking als die van Hawking zie je dat helemaal niet meer. Je kunt ook niet begrijpen waarom de energie stabiel is. Alle objecten die energie hebben, hebben positieve energie. Je kunt geen objecten maken met negatieve energie. In Hawkings theorie is er geen bodem meer in het energiebudget en dat vind ik raar. Daarom heb ik zo m'n twijfels over die theorie.

“Volgens mij zou een zwart gat in z'n geheel, zonder te praten over andere ruimtes, wel aan een schrödingervergelijking moeten voldoen. Dat levert een extra eis op, die radicaal in strijd lijkt te zijn met alles wat je probeert uit te rekenen. Je zou zeggen dat dat niet kan. Maar er is nog zoveel onbekend op dit terrein, misschien heeft de natuur een uitweg gevonden om dit toch zo te realiseren.”



Gerard 't Hooft. (foto: Chiel Postma)

*Een zwart gat dat in z'n geheel voldoet aan een schrödingervergelijking, dat betekent dat een zwart gat vergelijkbaar is met een elementair deeltje. Waarom denkt u dat een klein zwart gat op te vatten is als een elementair deeltje?*

“Het is een kwestie van woorden of je een zwart gat een elementair deeltje noemt of niet. Het is natuurlijk a priori iets heel anders, maar ik denk dat er geen scherp onderscheid is tussen die twee zaken. Je hebt hele zware elementaire deeltjes en je hebt hele lichte zwarte gaten. Misschien praat je dan gewoon over hetzelfde.”

*Is er enig idee hoe zo'n klein zwart gat waargenomen zou kunnen worden?*

“Het is erg dubieus of het ooit waarneembaar zal zijn. Je kunt er geen maken. Daar zou je een versneller voor nodig hebben van vele lichtjaren groot. Er zijn ook geen processen bekend in de natuur waarbij kleine zwarte gaten ontstaan. Wel kunnen grote zwarte gaten verdampen, maar dat proces duurt veel te lang. Alleen tijdens de Big Bang waren de processen zo energetisch en de fluctuaties zo groot, dat er kleine zwarte gaatjes kunnen zijn ontstaan. Misschien zweeft er zo nu en dan een in onze buurt rond. Maar waarnemen kun je dat nauwelijks. Ze hebben een massa die ligt tussen die van een planeetoïde en een grote meteoriet. Planeetoïden zijn heel moeilijk waar te nemen en de gravitatie-effecten ervan al helemaal niet. Wat je wel zou kunnen waarnemen is het verdampen van zo'n ding, er wordt dan een hoeveelheid massa van een paar bergen in een keer in energie omgezet. Dat levert een stevige klap die je op enige lichtjaren afstand zou moeten kunnen waarnemen. Astronomen nemen iets waar dat lijkt op explosies van zwarte gaten, de zogenaamde gammabursts. Maar je kunt voor die gammabursts ook allerlei andere verklaringen bedenken, neutronsterren die ineens opvlammen of zo.”

*Wat vindt u van de snaartheorie?*

“Ik heb altijd m'n aarzelingen over de snaartheorie gehad. Met name omdat de theorie op een heel indirecte manier geformuleerd is, zodat je bij berekeningen een heleboel intuïtie en ad hoc redeneringen moet gebruiken. Ik heb de snaartheorie nog nooit op een echt consistente manier geformuleerd gezien. In de snaartheorie gooi je de begrippen ruimte en tijd helemaal om en het begrip

causaliteit verliest zijn betekenis. De theorie is ontstaan uit een aantal postulaten waarvan ik niet kan zien waarom die goed zouden moeten zijn. Het idee bijvoorbeeld dat deeltjes touwtjes zijn. Heel erg mooi, maar waar haal je dat vandaan? Ik zie er geen fysisch principe achter.

“Je loopt op de feiten vooruit als je zegt dat het een theorie is die alle problemen oplost, die alle krachten unificeert. Het is veiliger te zeggen dat het een theorie is die potentieel de mogelijkheid heeft alle krachten onder een noemer te brengen. Het is een verzameling ideeën die heel ambitieus is en dat mag in de natuurkunde, dat vind ik prima.”

---

### Maar er is in de quantummechanica geen plaats voor paranormale verschijnselen.

---

Maar ik heb het sterke gevoel dat de theorie zoals zij nu geformuleerd is, in wezen een benadering is van iets anders. Ik denk dat gedachtenexperimenten met zwarte gaten realistischer zijn en je iets meer met de voeten op de grond houden dan de wazige formulering van de snaartheorie. In de benadering waarbij je zwarte gaten centraal stelt, weet je beter wat voor soort fysische vragen je moet stellen.”

*Wat zijn uw ideeën over een 'Theorie van Alles'?*

“Er is in de samenleving een grote weerstand tegen een Theorie van Alles. Die weerstand deel ik niet. Ik vind het heel goed denkbaar dat er een universele vergelijking bestaat waar alles aan voldoet. Ik denk niet dat we die in de nabije toekomst zullen vinden, volgens mij zitten we er nog mijlenver vanaf. Maar onmogelijk acht ik het niet. Zo een theorie zal natuurlijk nooit een vervanging kunnen zijn van andere wetenschappen zoals de scheikunde of de biologie, die vakgebieden blijven zoals ze zijn, en zelfs de kernfysica en grote gebieden van de theoretische fysica zouden nauwelijks beïnvloed worden door zo'n theorie. Op hele kleine schaal zouden de vergelijkingen exact geformuleerd kunnen worden maar in de gewone dagelijkse praktijk zou dat weinig betekenis hebben. Het zou wel van groot intellectueel belang zijn als zo iets gevonden zou worden, onze ideeën over de werkelijkheid zouden er wel door beïnvloed worden.”

*U schrijft in uw boek dat u hoopt dat als de 'Theorie van Alles' gevonden wordt men zal inzien dat er op deze wereld geen plaats is voor allerlei metafysische zaken. Wat bedoelt u daarmee?*

"Misschien is pseudo-fysica een beter woord dan metafysica. Ik ben er tegen als men occulte argumenten gaat hanteren om de bevindingen van de gewone natuurkunde in twijfel te trekken. Met name mensen die met paranormale verschijnselen bezig zijn doen beweringen die volgens de natuurkunde absoluut onmogelijk zijn. De overdracht van informatie is een heel belangrijk punt in de natuurkunde. Informatie kan niet worden overgevoerd van iemand die al is overleden, of van de toekomst terug naar het verleden, of van een ander continent naar hier zonder een gewoon radiografisch signaal. Daar is de natuurkunde vrij pertinent over.

"De quantummechanica laat nogal wat ruimte voor mystiek, de interpretatie van de golf functie is niet eenduidig. Mensen zien daar ruimte om te zeggen: dat wordt niet door de natuurkunde voorspeld, hier komen wij! Je kunt je daar als natuurkundige vrij moeilijk tegen te weer stellen

omdat de beweringen zo wazig zijn dat het moeilijk is er grip op te krijgen. Maar je wilt de zaken ook niet verdoezelen. Er vinden binnen de natuurkunde discussies plaats over de golf functie in de quantummechanica, je moet toegeven dat er zoiets bestaat als statistiek en afwijkingen en fluctuaties en dan kan er iemand komen die zegt: 'ik kan u wel wat vertellen over fluctuaties want ik geloof dat het mijn kant op fluctueert'. De quantummechanica wordt vaak misbruikt. Maar er is in de quantummechanica geen plaats voor paranormale verschijnselen. Als er een theorie komt die beter zegt wat de quantummechanica is dan kunnen we ons misschien beter te weer stellen. De meeste wetenschappers bemoeien zich er niet mee en denken: we laten ze gewoon maar. Ik vind dat je als natuurkundige ook wel eens je mond open mag doen over bepaalde dingen."

*Waarom denkt u dat achter de quantummechanica een mechanisch model schuilt?*

"Daar steek ik een beetje mijn nek mee uit, er zijn een heleboel mensen die zeggen dat dat niet kan; men spreekt dan van een 'no-go'-theorem, ofwel

#### **Hawkingstraling en het verlies van informatie**

Zwarte gaten zijn objecten met zeer hoge dichtheid. Hierdoor hebben ze een zo sterk zwaartekrachtsveld dat zelfs licht er niet uit kan ontsnappen. Zwarte gaten kunnen op twee manieren ontstaan. In de eerste plaats kan een ster met een massa boven de Chandrasekhar-limiet in zijn eindfase instorten tot een zwart gat. Er zijn een aantal sterren waargenomen, bijvoorbeeld Cygnus-X1, die om een onzichtbare partner heendraaien en daarbij materie verliezen. Men veronderstelt dat de onzichtbare partner een zwart gat is. Ten tweede kunnen tijdens de Big Bang hele kleine zwarte gaten zijn ontstaan. Een zwart gat wordt door drie parameters volledig gekarakteriseerd: de massa, de lading en de draai-impuls. Hoe verschillend de ontstaansgeschiedenis ook is, zwarte gaten met dezelfde massa, lading en draai-impuls zijn ononderscheidbaar.

Als men de wetten van de quantummechanica loslaat op zwarte gaten dan blijkt dat zwarte gaten straling uitzenden: de zogenaamde Hawkingstraling. Men kan zich dit als volgt voorstellen: aan de horizon van een zwart gat worden, zoals overal, door vacuümfluctuaties virtuele deeltje-antideeltjes paren gecreëerd. Normaal annihileren deze paren direct weer. Het deeltje met de negatieve energie kan echter in het zwarte gat vallen, waardoor het andere deeltje uit de buurt van het zwarte gat kan ontsnappen.

Men kan de toestand van alle atomen van een ster in principe precies weten; men spreekt dan van een zuivere quantumtoestand. Nadat een ster is ingestort tot een zwart gat, begint het te stralen en na verloop van tijd 'verdamp't het volledig. Er is alleen thermische straling overgebleven, maar die correspondeert met een gemengde quantumtoestand. De informatie die bevat was in de zuivere quantumtoestand is dus verdwenen, en hierdoor is ook de quantum coherentie verloren. Anders geformuleerd: uit de thermische straling die uiteindelijk overblijft valt niet te reconstrueren hoe de toestand was voordat het zwarte gat gevormd werd. Dit wordt wel het probleem van informatieverlies genoemd. Als dit ook speelt bij hele kleine zwarte gaten dan is het probleem nog groter. Er is onder fysici onenigheid over de vraag of het informatieverlies principieel is of dat de theorie gewoon nog niet goed genoeg is begrepen.

een 'gaat-niet-stelling'. Nou, als je zo'n stelling hebt betekent dat meestal slechts dat iets niet kan op de manier die men gedacht had, maar dat het misschien wel op een andere manier kan. Waarschijnlijkheden kunnen op allerlei manieren door een achterdeur komen binnensluipen. Zelfs in een volkomen mechanisch model van botsende deeltjes ga je op een gegeven moment statistische methoden toepassen omdat het anders ondoenlijk wordt. Misschien zijn er mechanische wetten die heel goed werken op op Planckse schaal maar krijg je op een grotere schaal met zoveel vrijheidsgraden te doen dat een exacte behandeling niet meer mogelijk is. Dan moet je je toevlucht nemen tot statistische methoden. De vraag is of die statistische methoden ooit kunnen gaan lijken op wat we nu quantummechanica noemen. Mijn filosofie is dat dat inderdaad mogelijk is. Mijn ideeën over

---

**Het idee bijvoorbeeld dat deeltjes  
touwjes zijn. Heel erg mooi, maar  
waar haal je dat vandaan?**

---

waar het quantummechanische gedrag vandaan kan komen kan ik alleen niet zodanig formuleren dat ze bruikbaar en toetsbaar zijn. En zolang dat niet het geval is kan ik ook niet echt hard maken wat ik vermoed."

*Hoe is uw interesse voor de natuurkunde ontstaan?*

"Van heel jongs af aan was ik geïnteresseerd in de materie om me heen. Als ik het begreep vond ik het leuk, als ik het niet begreep wat minder. Zo vond ik biologie leuk zolang het over bacteriën en virussen ging, dat was nog aantrekkelijk simpel. Maar menselijke wezens en koeien vond ik zo ingewikkeld, om die te kunnen begrijpen zou je zoveel moeten doen, dat is onbegonnen werk. Daar snapte ik niks van. Ik dacht: als ik de wereld om me heen wil begrijpen dan moet ik met de eenvoudige dingen beginnen.

"Natuurkunde zat ook een beetje in de familie. Ik hoorde de verhalen van de grote ontdekkingen aan het begin van deze eeuw en hoe dat de hele samenleving op zijn kop heeft gezet. Een oom van mij, Van Kampen, die ook natuurkundige is, kwam vaak op bezoek. Op een dag zat hij op een

---

**Ik vind dat je als natuurkundige  
ook wel eens je mond open mag  
doen over bepaalde dingen.**

---

papiertje te rekenen; hij zat letters bij elkaar op te tellen. Nou had ik op school wel geleerd hoe je getallen kunt optellen en vermenigvuldigen, maar letters, dat intrigeerde me. Ik vroeg wat hij precies deed en hij zei dat het groepentheorie was. Hij pakte een luciferdoosje en liet zien dat je het zo en zo kan draaien maar ook omgekeerd en dat je dan wat anders krijgt. Ik vroeg: 'hoe kan je nou twee draaiingen vermenigvuldigen met elkaar?' Ik snapte niks van wat hij zei. Ik vond het vreselijk mysterieus en dacht: daar moet ik meer van weten. Ik vond natuurkunde een heel leuk vak en wiskunde ook. Op school zat ik te rekenen en kwam erachter dat ik  $\frac{1}{2}!$  kon uitrekenen. Later zou ik leren dat dit de gamma functie van  $\frac{3}{2}$  is. Ik had de gamma functie dus herontdekt."

*Wat is uw recept voor een goed fysicus?*

"Je moet als natuurkundige proberen tot de kern van zaken door te dringen. Het is ook belangrijk dat als je iets gevonden hebt dat je dat goed kunt verwoorden, maar dat geldt dan vooral voor theoretici. Voor een experimentator gelden nog een heleboel andere kwaliteiten. Die moet bijvoorbeeld ook commercieel ingesteld zijn en weten waar goede apparaten te koop zijn. Je moet als fysicus echter vooral gedreven zijn. En je moet jong beginnen, want je hebt veel energie nodig."