

Snaartheorie, zwarte gaten en kosmologie

Ben Craps (Vrije Universiteit Brussel en
Internationale Solvay Instituten voor Fysica en Chemie)

EINSTEINS ALGEMENE RELATIVITEITSTHEORIE geeft een heel elegante en nauwkeurige beschrijving van de gravitatiekracht, maar verliest haar geldigheid nabij het centrum van zwarte gaten en vlakbij de oerknal. Snaartheorie is een veelbelovende poging om beter te doen. Wat zijn de basisideeën? Wat hebben we al geleerd en wat hopen we nog te leren? En zijn er mogelijke toepassingen?

CONFLICTRESOLUTIE EN UNIFICATIE

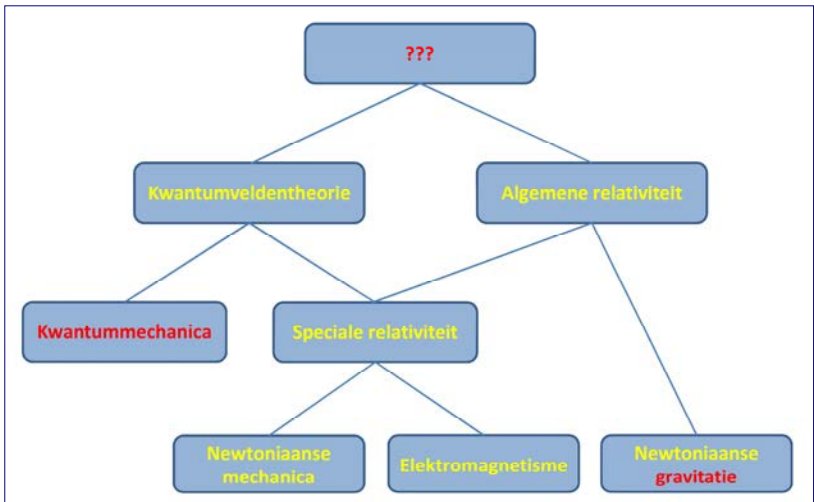
Conflicten tussen theorieën speelden een cruciale rol in de revoluties in de fysica van de 20ste eeuw. Zo had Einstein het inzicht dat de wetten van het elektromagnetisme, waarin een constante lichtsnelheid voorkomt, onverenigbaar zijn met de Newtoniaanse mechanica. Volgens de Newtoniaanse mechanica (en ook volgens onze intuïtie) zou de snelheid van licht namelijk groter moeten zijn als een bron naar ons toe beweegt en kleiner als een bron van ons weg beweegt. Dit conflict werd opgelost door Einsteins ontwikkeling van een overkoepelende theorie, namelijk de speciale relativiteitstheorie. Het elektromagnetisme past perfect in dit nieuwe kader. De Newtoniaanse mechanica is een prima benadering wanneer we objecten bestuderen waarvan de snelheid veel kleiner is dan de lichtsnelheid, maar bij snelheden die de lichtsnelheid benaderen, verliest ze haar geldigheid. Het verenigen van verschillende theorieën (die soms zelfs met elkaar in conflict liggen) in één overkoepelende theorie is wat fysici unificatie noemen.

Een andere steunpilaar van de klassieke fysica is de Newtoniaanse gravitatie (of zwaartekracht). Die stelt dat de gravitationele aantrekkingskracht tussen twee objecten evenredig is met de massa van elk object en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand. (De evenredigheidsfactor is de constante van Newton.) Maar deze theorie impliceert dat de aantrekkingskracht die de Aarde nu voelt, bepaald wordt door de huidige positie van de Zon. Stel dat de Zon plotseling verplaatst zou worden, dan zouden we dat op Aarde meteen merken door een gewijzigde gravitationele aantrekkingskracht. Dit is niet in overeenstemming met de speciale relativiteitstheorie: informatie over wat nu met de Zon gebeurt, kan niet sneller reizen dan met de lichtsnelheid en moet er daarom meer dan 8 minuten over doen om ons te bereiken! Het oplossen van dit conflict heeft Einstein veel meer moeite gekost dan de ontdekking van de speciale relativiteitstheorie, maar het resultaat was absoluut de moeite waard: de algemene relativiteitstheorie. Die stelt dat een zwaar object (bijvoorbeeld de Zon) zorgt voor kromming van de ruimtetijd. In die gekromde ruimtetijd volgen andere objecten (zoals de Aarde) de beste benadering van een recht pad; en dat is de bekende (bijna) ellipsvormige baan rond de Zon.

In het begin van de 20ste eeuw ontstond nog een andere theorie: de kwantummechanica. Die beschrijft materie op atomaire schaal en gaat hard tegen onze intuïtie in. De onzekerheidsrelatie van Heisenberg maakt het onmogelijk aan een deeltje

tegelijk een precieze positie en een precieze snelheid toe te kennen. In contrast met het determinisme van de klassieke fysica, voorspelt de theorie zelfs op het meest fundamentele niveau enkel waarschijnlijkheden. Wel kunnen die waarschijnlijkheden en hun tijdsevolutie uiterst nauwkeurig voorspeld worden en geeft de kwantummechanica op die manier een zeer precieze beschrijving van de natuur. De kwantummechanica zoals oorspronkelijk geformuleerd was niet consistent met de speciale relativiteitstheorie. De unificatie van beide werd bereikt door middel van kwantumveldentheorie, het kader waarbinnen zowel de elektromagnetische kracht als de kernkrachten met ongelooflijke precisie worden beschreven.

Vandaag is het goede nieuws dat we over twee zeer succesvolle theorieën beschikken: de algemene relativiteitstheorie, die de gravitatiekracht beschrijft, en kwantumveldentheorie, die de andere fundamentele krachten beschrijft. Het slechte nieuws is dat de twee theorieën in conflict zijn met elkaar. Als men de methoden van de kwantumveldentheorie toepast op de algemene relativiteitstheorie, vindt men als resultaat van berekeningen vaak oneindig. Dat is op zich geen probleem, want binnen de kwantumveldentheorie zijn er methodes om oneindigheden weg te werken en zinvolle resultaten te vinden voor fysische grootheden. Voor de kwantumveldentheorieën die de andere krachten beschrijven, is het resultaat dat men een aantal parameters experimenteel moet bepalen, waarna de theorie volledig vastligt en alle andere fysische



Figuur 1. De unificatie van fysische theorieën in de 20ste eeuw. Bestaat er een overkoepelende theorie die het plaatje vervolledigt? Snaartheorie is een veelbelovende kandidaat.

grootheden berekend kunnen worden. Voor de algemene relativiteitstheorie zou men echter oneindig veel parameters experimenteel moeten bepalen alvorens de theorie vastligt. Zolang we enkel geïnteresseerd zijn in processen bij relatief lage energie (bijvoorbeeld de energieën die we vandaag in deeltjesversnellers kunnen bereiken), is er geen probleem: bij zulke energieën is het effect van bijna alle parameters verwaarloosbaar. Maar zodra we berekeningen willen doen bij extreem hoge energieën, worden alle parameters belangrijk en verliest de theorie haar voorspellende waarde.

Kunnen kwantumveldentheorie en de algemene relativiteitstheorie verenigd worden in een overkoepelende theorie? Meer algemeen, is een kwantummechanische beschrijving van de zwaartekracht mogelijk?

WAAROM IS KWANTUMGRAVITATIE NODIG?

Men zou kunnen denken dat kwantummechanica en gravitatie weinig met elkaar te maken hebben, omdat de eerste kleine objecten beschrijft en de tweede zware objecten. In aardse omstandigheden is dat inderdaad zo, maar beide zijn essentieel in de extreme omstandigheden van zwarte gaten of de oerknal.

Een zwart gat is een deel van de

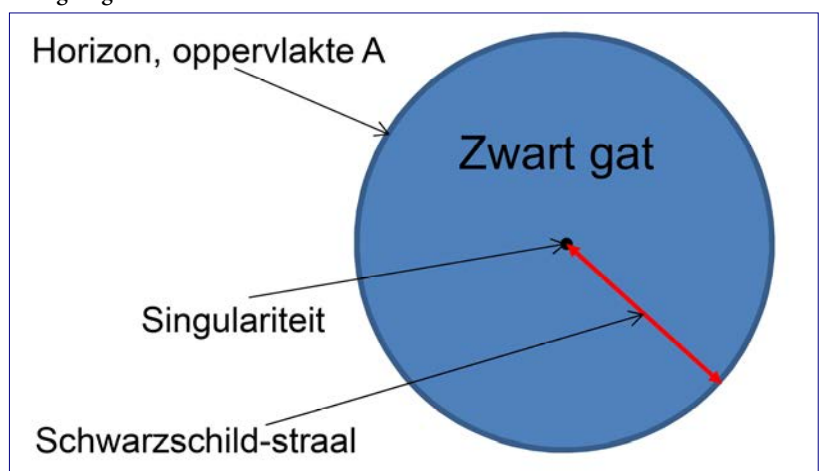
ruimte waar de gravitatiekracht zo sterk is dat niets eruit kan ontsnappen, zelfs licht niet. De grens tussen het zwart gat en de buitenwereld is de 'horizon'. In de algemene relativiteitstheorie kan men berekenen dat een zwart gat ontstaat wanneer een hoeveelheid materie samengeperst wordt in een bol met straal kleiner dan een welbepaalde 'Schwarzschild-straal', die evenredig is met de massa van de samengeperste materie. Zo bedraagt de Schwarzschild-straal van de Zon 3 km en die van de Aarde 1 cm. In het centrum van het zwart gat bevindt zich een singulariteit, waar de krom-

ming van de ruimtetijd oneindig is. Om preciezer te zijn, de kromming is daar zo groot dat de algemene relativiteitstheorie haar geldigheid verliest. Kwantumgravitatie is nodig om het inwendige van zwarte gaten te beschrijven.

Hoewel zwarte gaten theoretisch mogelijk zijn volgens de algemene relativiteitstheorie, kan men zich afvragen of zulke extreme concentraties van materie wel voorkomen in de natuur. Laten we eerst een blik werpen op de mogelijke eindproducten van stervoluitie. Een gewone ster zoals de Zon eindigt haar leven als een witte dwerg, een compacte ster waarvan de verdere instorting verhinderd wordt door een druk uitgeoefend door elektronen. In 1930 berekende Subrahmanyam Chandrasekhar (op 19-jarige leeftijd!) dat een witte dwerg niet zwaarder kan zijn dan 1.4 zonsmassa's. Een witte dwerg die meer massa absorbeert, ondergaat onvermijdelijk een supernova-explosie. Veel zwaardere sterren dan de Zon eindigen na een supernova-explosie als een neutronenster (een nog compactere ster dan een witte dwerg, ondersteund door de druk van neutronen) of een zwart gat. Dit laatste is het geval wanneer de massa zo groot is dat ook neutronen de gravitationele instorting niet kunnen verhinderen.

Instorting tot een zwart gat is een dramatische conclusie en deze werd

Figuur 2. Van binnen de horizon van een zwart gat kan zelfs licht niet ontsnappen. Het centrum van een zwart gat is singulier; de algemene relativiteitstheorie verliest er haar geldigheid.





Figuur 3. In 2012 zag de NuSTAR-telescoop het zwart gat in het centrum van ons Melkwegstelsel een flits van röntgenstralen uitzenden wanneer het een stofwolk opslokte. Figuur: *NASA/JPL-Caltech* (röntgenbeeld van NuSTAR en infraroodbeeld van de Spitzer Space Telescope).

niet zonder slag of stoot aanvaard. Na de ontdekking door Karl Schwarzschild van zwarte gaten in de algemene relativiteitstheorie in 1915, heeft het een halve eeuw geduurd eer er consensus was over het lot van een zeer zware ster. Als reactie op de resultaten van Chandrasekhar in 1930, zei Arthur Eddington, een reus in het vakgebied, "I think there should be a law of Nature to prevent a star from behaving in this absurd way!" Tijdens de Solvay Conferentie van 1958 in Brussel was er een stevige discussie tussen John Archibald Wheeler en Robert Oppenheimer. Wheeler suggereerde dat kwantumgravitatie de vorming van een zwart gat kan vermijden. Oppenheimer antwoordde: "Would not the simplest assumption be that such masses undergo continued gravitational contraction and ultimately cut themselves off more and more from the rest of the Universe?" In de periode 1965-1970 toonde werk van Roger Penrose en Stephen Hawking overtuigend aan

dat gravitationele instorting onvermijdelijk is in de context van de algemene relativiteitstheorie.

Vandaag zijn er sterke observationele aanwijzingen voor het bestaan van zulke zwarte gaten. Een zwart gat kan niet rechtstreeks worden waargenomen, want licht kan er niet uit ontsnappen. Maar een gas dat dicht in de buurt komt van een zwart gat kan gigantisch opgewarmd worden en daardoor röntgenstralen uitzenden, die onze telescopen wel kunnen zien.

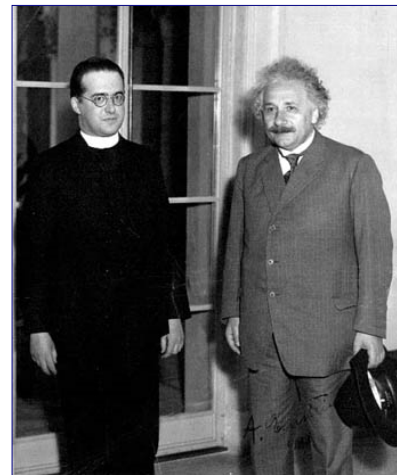
Behalve stellaire zwarte gaten blijken er ook veel zwaardere zwarte gaten te bestaan. Het centrum van de meeste sterrenstelsels (misschien zelfs van alle) bevat een superzwaar zwart gat.

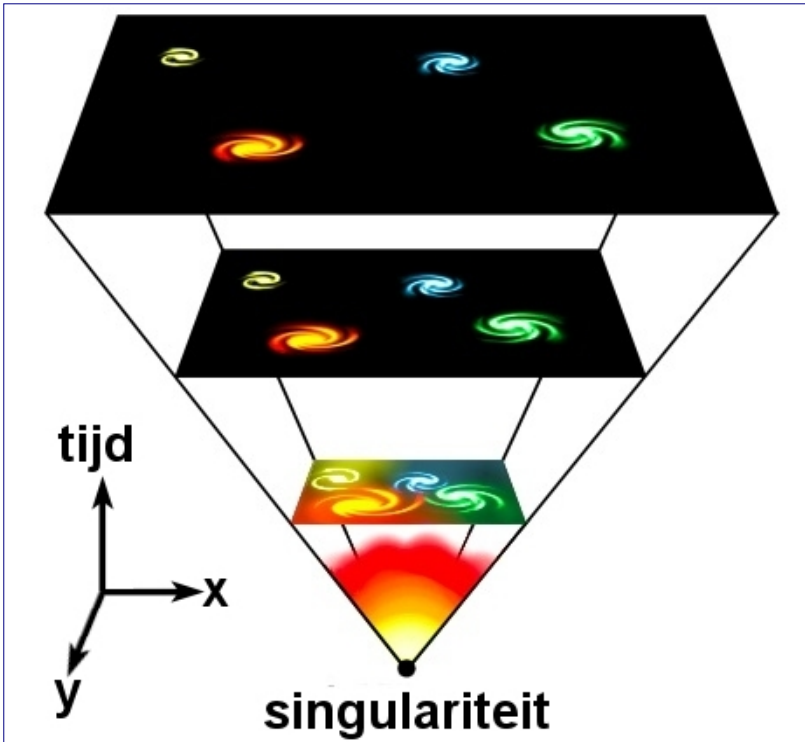
Een andere context waarin de algemene relativiteitstheorie haar geldigheid verliest, is vlakbij de oerknal. Vermits het heelal expandeert, was het vroeger kleiner. In het verleden was de straling en de materie dus meer gecomprimeerd. Volgens de algemene relativiteitstheorie was er in het verleden een tijdstip waarop de dichtheid

oneindig was, een singulariteit. Meer precies betekent dit dat de algemene relativiteitstheorie haar eigen falen voorspelt en dat kwantumgravitatie nodig is.

Het was trouwens de Belg Georges Lemaître die het idee van een expan-

Figuur 4. Albert Einstein en Georges Lemaître in 1933 in Pasadena (Californië).



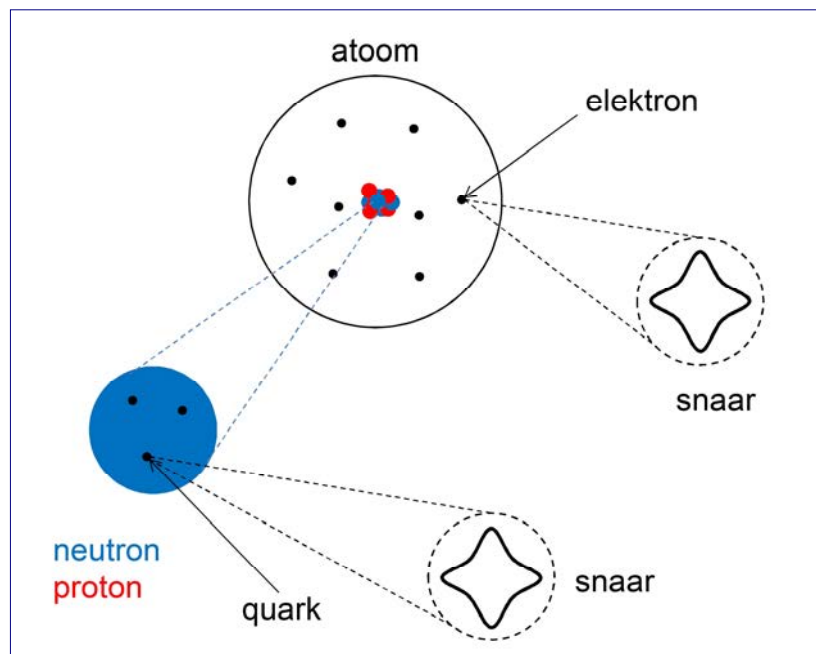


Figuur 5. Volgens de algemene relativiteitstheorie had ons expanderende heelal een singulier begin. Figuur: *Wikipedia*.

derend heelal lanceerde (onafhankelijk van de Rus Alexander Friedmann, die dezelfde conclusie bereikt had). Lemaître was ook de eerste die een singulier begin van het heelal voorstelde: zijn idee van een 'atome primitif' was een voorloper van de moderne oerknaltheorie. Ook deze revolutionaire ideeën werden oorspronkelijk niet zonder slag of stoot aanvaard. Over Lemaîtres voorstel van een expanderend heelal zei Albert Einstein: "Your math is correct, but your physics is abominable." Einstein zelf had een model van een statisch heelal, waarin een extra term die hij toevoegde had aan zijn vergelijking, de zogenaamde 'kosmologische constante', een belangrijke rol speelde. Toen observaties Einstein ertoe dwongen een expanderend heelal te aanvaarden, noemde hij het invoeren van een kosmologische constante de grootste blunder van zijn leven. We zullen echter zien dat die kosmologische constante vandaag weer helemaal op het voorplan staat. Het oerknalidee van Lemaître werd door Eddington

'repugnant' (weezinwekkend) genoemd. Vandaag staat het oerknalmodel boven elke redelijke twijfel en

Figuur 6. Volgens snaartheorie zijn elementaire deeltjes minuscule trillende snaren.

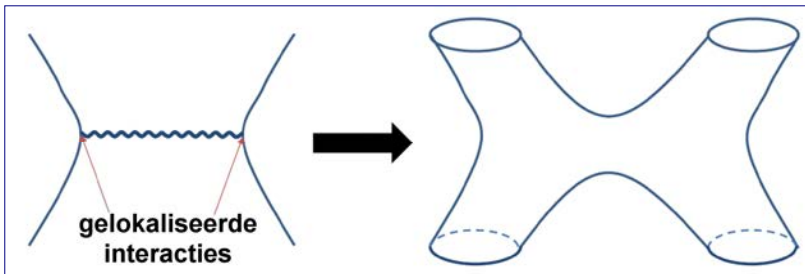


is het een belangrijke uitdaging het singuliere begin beter te begrijpen.

SNAARTHEORIE IS EEN KWANTUMGRAVITATIETHEORIE

Nu we gemotiveerd hebben dat het belangrijk is een theorie van kwantumgravitatie te vinden, zijn we klaar om een veelbelovende kandidaat te introduceren: snaartheorie. Het basis-idee achter die theorie is dat elementaire deeltjes geen puntdeeltjes zijn, maar kleine trillende snaren. Net zoals een vioolsnaar op verschillende manieren kan trillen en zo verschillende tonen kan produceren, komen de verschillende trillingswijzen van een snaar met verschillende deeltjes overeen.

Wij zijn opgebouwd uit atomen. Elk atoom bestaat uit een kern en elektronen die rond de kern bewegen. De kern is opgebouwd uit protonen en neutronen, die op hun beurt uit quarks bestaan. Elektronen en quarks worden in de gevestigde theorieën als elementair beschouwd: hedendaagse experimenten kunnen geen deelstructuren onderscheiden, dus de aanname dat ze puntdeeltjes zijn, is perfect consistent met wat we experimenteel



Figuur 7. Twee deeltjes interageren door uitwisseling van een graviton. Links: in kwantumveldentheorie vinden de interacties in welbepaalde punten plaats. Rechts: in snaartheorie zijn ze uitgesmeerd.

weten. Wat snaartheorie zegt, is dat als we op veel kleinere schaal zouden kijken dan vandaag mogelijk is, we zouden merken dat deze deeltjes toch een interne structuur hebben, namelijk dat het snaartjes zijn. Vandaag weten we niet of dit uitgangspunt correct is, maar we zullen zien dat het fascinerende gevolgen heeft.

Een eerste opmerkelijk feit is dat snaartheorie een theorie is van kwantumgravitatie. Snaartheorie ontstond als een model voor de sterke kernkracht, dat in de jaren 1970 niet succesvol bleek. Een van de problemen was dat een van de trillingswijzen van een snaar onvermijdelijk een massaloos deeltje beschrijft dat absoluut niet past bij de sterke kernkracht. Toen snaartheorie naar de prullenmand dreigde te verhuizen, realiseerden enkelen zich dat dat vervelende deeltje precies van het juiste type was om de gravitatiekracht over te brengen, een 'graviton', net zoals elektromagnetische krachten kunnen worden beschreven door de uitwisseling van 'fotonen' (lichtdeeltjes). Snaartheorie begon toen een nieuw leven als een gravitatietheorie die hopelijk ook alle andere krachten zou beschrijven.

Het gebeurt trouwens wel vaker dat een fysische theorie ontwikkeld wordt om een bepaald probleem op te lossen, daar ongeschikt voor blijkt, maar later zeer succesvol 'gerecycleerd' wordt in een nieuwe context. Zo hadden Robert Brout en François Englert de sterke kernkracht in gedachten toen ze het artikel schreven waarvoor Englert de Nobelprijs kreeg, maar werd de theorie uiteindelijk succesvol toegepast op de zwakke kernkracht.

Hoe slaagt snaartheorie erin de

problemen te vermijden die opduiken wanneer men de algemene relativiteitstheorie kwantummechanisch probeert te beschrijven? Om hiervan een idee te krijgen, bekijken we de interactie tussen twee deeltjes door uitwisseling van een graviton. Dit proces wordt beschreven door een Feynmandiagram (zie figuur 7). Volgens de kwantumveldentheorie wordt het graviton uitgezonden en geabsorbeerd op welbepaalde punten in de ruimtetijd. Het is die precies gelocaliseerde interactie die aanleiding geeft tot oneindigheden, die in het geval van gravitatie niet op een bevredigende manier kunnen worden weggewerkt. In snaartheorie worden de lijnen van een Feynmandiagram vervangen door 'buizen'. Dit heeft als gevolg dat de interacties niet meer in één punt gelocaliseerd zijn, maar uitgesmeerd worden. Het blijkt dat de diagrammen hierdoor eindig worden en snaartheorie een consistente theorie van kwantumgravitatie is.

Een andere opmerkelijke eigenschap van snaartheorie is dat er meer dan drie ruimtelijke dimensies zijn; in de eenvoudigste snaartheoriemodellen zijn er 9 ruimtelijke dimensies en 1 tijdsdimensie. Op het eerste gezicht klinkt dat zorgwekkend, want in onze wereld nemen we slechts drie ruimtelijke dimensies waar. De uitweg is dat de extra dimensies onwaarneembaar klein kunnen zijn. Zelfs als ze onwaarneembaar zijn, spelen de extra dimensies een belangrijke rol in snaartheorie. Net zoals de vorm van een muziekinstrument de mogelijke tonen bepaalt, zo hangen de trillingswijzen van een snaar af van de vorm en afmetingen van de extra dimensies.



Figuur 8. Edward Witten. Foto: *Markus Marcelet / MOMENT*.

Op die manier bepalen de extra dimensies de fysische parameters van de wereld met drie ruimtelijke dimensies die wij waarnemen.

In het midden van de jaren 1990 werd duidelijk dat de structuur van snaartheorie veel rijker is dan oorspronkelijk gedacht. Zo bleken schijnbaar verschillende versies van snaartheorie soms volledig equivalent te zijn – dit noemt men een 'dualiteit'. Edward Witten ontdekte bovendien een onderliggende 11-dimensionale structuur, die hij de naam M-theorie gaf. Eén van de mogelijke woorden waarvoor M kan staan, is 'mystery'. Deze theorie is nog steeds slechts heel gedeeltelijk begrepen. Kort daarna ontdekte Joseph Polchinski dat snaartheorie behalve snaren ook hoger-dimensionale objecten bevat. Hiervoor wordt de naam 'branen' gebruikt, een veralgemening van tweedimensionale membranen.

DE ENTROPIE VAN ZWARTE GATEN

Wat heeft snaartheorie te vertellen over zwarte gaten? Om die vraag te beantwoorden, moeten we eerst teruggaan naar inzichten over zwarte gaten die ontwikkeld werden in de jaren 70 van de vorige eeuw. Toen werd ontdekt dat zwarte gaten volgens de algemene relativiteitstheorie aan wetten voldoen die dezelfde structuur hebben als de wetten van de thermodynamica.

Belangrijke grootheden in de thermodynamica zijn temperatuur en entropie. Entropie kan men intuïtief beschouwen als een graad van wanorde van een systeem. Een intact wijnglas heeft een kleinere entropie dan de scherven die ontstaan wanneer men het wijnglas laat vallen. En een gas heeft een kleinere entropie wanneer alle moleculen zich in een hoek van een kamer bevinden dan wanneer de moleculen zich over de hele kamer verspreid hebben. De tweede wet van de thermodynamica stelt dat in een geïsoleerd systeem de entropie nooit kan afnemen. (Nu zou men kunnen opwerpen dat het toch mogelijk is uit glasscherven wijnglazen te maken, die een lagere entropie hebben. Dat klopt, maar in dat geval zijn de scherven geen geïsoleerd systeem en moet elke vermindering van hun entropie gecompenseerd worden door een minstens even grote vermeerdering van de entropie van de omgeving.) Als we de wetten van de thermodynamica vergelijken met die van zwarte gaten, dan wordt de rol van de temperatuur gespeeld door de oppervlaktegravitatie, ruwweg een analogon voor zwarte gaten van de valversnelling op Aarde. De rol van de entropie wordt gespeeld door de oppervlakte van de horizon. In het bijzonder zegt de algemene relativiteitstheorie dat de oppervlakte van de horizon niet kan afnemen in de tijd. Maar is het verband tussen de wetten van zwarte gaten en die van de thermodynamica enkel een analogie, of kunnen we bijvoorbeeld de oppervlaktegravitatie echt als een fysische temperatuur beschouwen? Vermits lichamen met temperatuur boven het absolute nulpunt thermische straling uitzenden en zwarte gaten volgens de algemene relativiteitstheorie niets kunnen uitzenden, zou men kunnen denken dat het enkel om een analogie gaat. In het midden van de jaren 1970 deed Hawking echter zijn beroemde ontdekking dat als kwantumeffecten in rekening gebracht worden, zwarte gaten wel degelijk thermische straling uitzenden en dus niet helemaal zwart zijn. De fysische temperatuur van een zwart gat blijkt inderdaad evenredig te zijn met de oppervlaktegravi-

$$S_{BH} = \frac{A}{4G_N} = k_B \ln \Omega$$

Figuur 9. De entropie van een zwart gat is gelijk aan de oppervlakte A van de horizon gedeeld door viermaal de constante van Newton, G_N . Snaartheorie verklaart deze entropie als de logaritme van het aantal microscopische toestanden Ω , vermenigvuldigd met de constante van Boltzmann, k_B .

tatie. (Voor astrofysische zwarte gaten is de temperatuur verwaarloosbaar klein, dus in de praktijk blijft het correct dat ze enkel onrechtstreeks kunnen worden waargenomen.) Het feit dat zwarte gaten echt een temperatuur hebben, suggereert sterk dat de oppervlakte van de horizon ook als een echte entropie moet worden geïnterpreteerd, wat Jacob Bekenstein reeds voorgesteld had vóór Hawkings berekening.

Dit geeft aanleiding tot een diepere vraag. In de statistische fysica wordt entropie bepaald door het aantal microscopische toestanden te tellen dat overeenkomt met een gegeven macroscopische toestand. (Meer precies neemt men de logaritme van deze grootheid en vermenigvuldigt men die met de Boltzmann-constante.) Voor een gas worden de macroscopische toestanden beschreven door grootheden als dichtheid, druk en temperatuur. Microscopische toestanden worden bepaald door de posities en snelheden van alle individuele moleculen. Er zijn veel minder microscopische configuraties waarvoor het gas zich in een hoek van de kamer bevindt dan waarvoor het gas zich over de hele kamer verspreid heeft. De vraag is nu: kunnen we de microtoestanden van een zwart gat identificeren en tellen, om zo de Bekenstein-Hawking-entropie te verklaren?

Op het eerste gezicht lijkt dit een hopeloze opdracht: in de algemene relativiteitstheorie worden zwarte gaten volledig bepaald door hun massa, impulsmoment en ladingen. Men zou dus kunnen denken dat elk zwart gat slechts één microtoestand heeft, wat zou betekenen dat de entropie nul is. Deze situatie verandert volledig bin-

nen snaartheorie. Door gebruik te maken van dualiteiten en symmetrie slaagden Andrew Strominger en Cumrun Vafa er in 1996 in binnen snaartheorie de microtoestanden te tellen van bepaalde zwarte gaten en ze vonden precies de Bekenstein-Hawking-entropie! Dit is een zeer belangrijk resultaat en geeft vertrouwen in snaartheorie als een theorie van kwantumgravitatie.

IS DE WERELD EEN HOLOGRAM?

Het feit dat de entropie van een zwart gat evenredig is met de oppervlakte van de horizon is zeer ongewoon. Voor de systemen die men gewoonlijk bestudeert in de thermodynamica is de entropie evenredig met het volume van het systeem, niet met een oppervlakte. Dit suggereert dat de fundamentele vrijheidsgraden van een zwart gat op de horizon leven in plaats van in het inwendige van het zwart gat. De Nederlandse Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft stelde voor dit te vergelijken naar een algemeen principe in kwantumgravitatie, namelijk het holografisch principe. Dat stelt dat de gravitationele fysica in een ruimte equivalent beschreven wordt door een theorie zonder gravitatie op

Figuur 10. Gerard 't Hooft. Foto: *Universiteit Utrecht*.



de rand van de ruimte. Holografie verwijst naar een techniek in de optica waarbij driedimensionale informatie volledig gecodeerd wordt op een tweedimensionale fotografische plaat. Vertrekkend van de tweedimensionale codering kan de driedimensionale informatie gereconstrueerd worden. Hologrammen vindt men bijvoorbeeld ter beveiliging op bankbiljetten terug. In onze context hebben we het over een kwantumgravitatie-theorie in een bepaalde ruimte die volledig 'gecodeerd' wordt in een kwantumveldentheorie op de rand van die ruimte.

Het holografisch principe verscheen op het voorplan van de theoretische fysica toen Juan Maldacena ontdekte dat snaartheorie precieze realisaties biedt van dit principe. Kwantumgravitatie in bepaalde gekromde ruimten blijkt equivalent te zijn met bepaalde kwantumveldentheorieën op de rand van die ruimten. Dit is een dualiteit (twee schijnbaar verschillende theorieën die toch equivalent blijken te zijn) die zeer krachtig is. Door relatief eenvoudige gravitatieberekeningen kan men inzicht krijgen in moeilijke problemen in kwantumveldentheorie. En via kwantumveldentheorie kan men iets leren over kwantumgravitatie, bijvoorbeeld over de mysteries van zwarte gaten (die nog steeds in het middelpunt van de belangstelling staan).

Op welke problemen in kwantumveldentheorie kunnen we holografie toepassen? Uiteraard zijn we vooral geïnteresseerd in problemen die we niet met de gebruikelijke methoden in kwantumveldentheorie kunnen oplossen. In de fysica zijn er niet veel realistische systemen die exact kunnen worden opgelost. Wat wel vaak voorkomt, is dat een gegeven systeem beschouwd kan worden als een kleine modificatie van een exact oplosbaar systeem. In dat geval kan men opeenvolgende benaderingen maken die dichter en dichter bij het echte antwoord zullen liggen. Technisch spreekt men van storingstheorie in een kleine expansieparameter (of koppelingsconstante), waarbij de expansieparameter aangeeft hoe sterk het echte systeem verschilt van het exact

oplosbare systeem. Maar wat gebeurt er wanneer we geen kleine expansieparameter hebben, met andere woorden wanneer het echte systeem niet goed benaderd kan worden door een exact oplosbaar systeem? Dan spreekt men van een sterk gekoppeld systeem en dan zijn berekeningen veel moeilijker of zelfs praktisch onmogelijk. Het is in zulke gevallen dat holografie soms een uitweg biedt. De reden is dat via holografie sterk gekoppelde kwantumveldentheorieën overeenkomen met zwak gekoppelde gravitatie-theorieën, waarin men wel berekeningen kan doen. Op die manier heeft men veelbelovende modellen gemaakt voor verschillende interessante fysische systemen. Enkele tientallen microseconden na de oerknal was het heelal gevuld door een plasma van quarks en gluonen, die interageren via de sterke kernkracht. Vandaag creëert men een soortgelijk plasma in deeltjesversnellers en bepaalde eigenschappen van dat plasma worden via holografie bestudeerd. Het is ironisch dat snaartheorie, ooit gebuisd als theorie van de sterke kernkrachten, vandaag via een grote omweg toch nuttig blijkt om meer te leren over deze krachten. Andere fysische systemen waarvoor holografische modellen ontwikkeld werden, zijn materialen die supergeleidend zijn bij relatief hoge temperatuur.

KOSMOLOGISCHE UITDAGINGEN

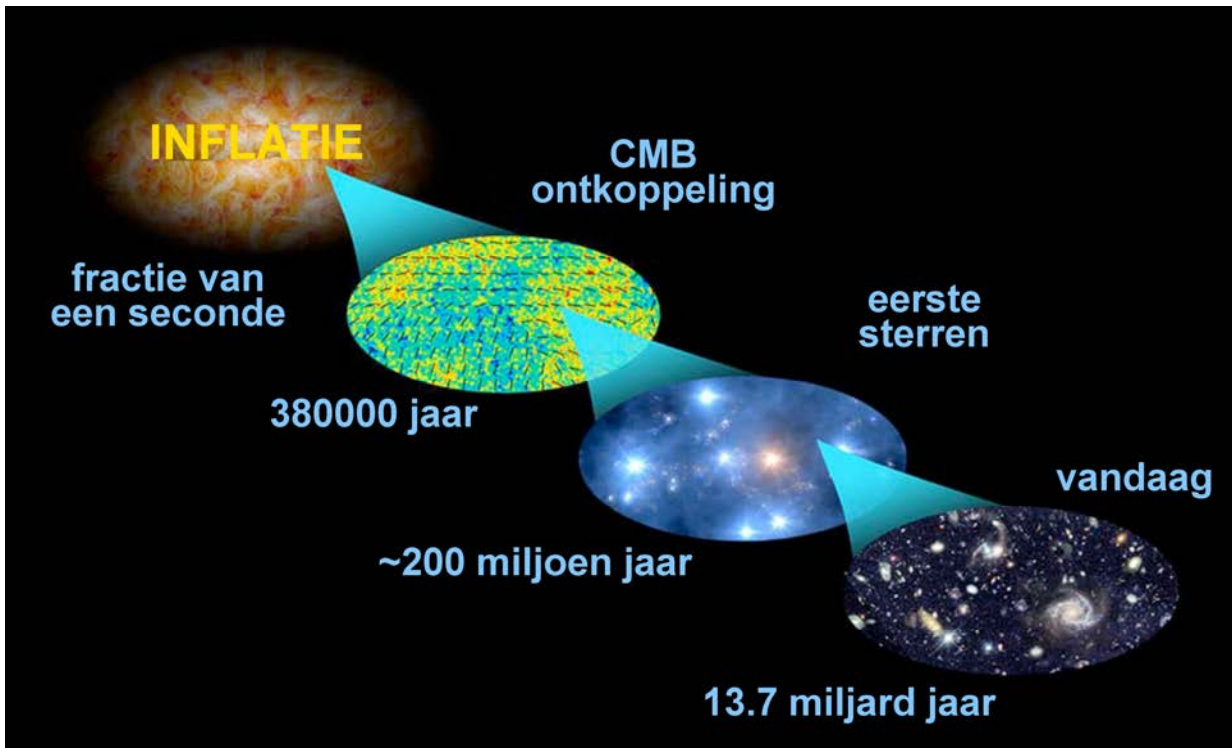
We hebben kwantumgravitatie geïntroduceerd en snaartheorie geïntroduceerd. We hebben gezien dat snaartheorie belangrijke resultaten opgeleverd heeft in verband met zwarte gaten en dat het holografisch principe toelaat snaartheorietechnieken te gebruiken om inzicht te verwerven in sterk gekoppelde systemen. Een laatste onderwerp dat we willen aansnijden, is hoe de kosmologie snaartheorie voor belangrijke uitdagingen stelt.

De populairste theorie voor het heel vroege heelal is inflatie. Het idee is dat tijdens een eerste minuscule fractie van een seconde na de oerknal het heelal een versnelde expansie onderging. De voorspellingen van inflatie

komen prima overeen met waarnemingen. (In maart 2014 beweerde een team kosmologen dat ze de definitieve bevestiging gezien hadden, namelijk door bepaalde effecten van gravitatiegolven te detecteren; zie *Heelal* mei 2014, blz.144. Die bewering blijkt intussen voorbarig te zijn geweest, maar de eerdere observationele aanwijzingen blijven de inflatietheorie sterk steunen.)

Een theoretische moeilijkheid met inflatie is dat de theorie vaak gevoelig blijkt voor 'kleine' kwantumgravitatie-effecten. Schijnbaar kleine correcties waarmee kosmologen vaak geen rekening houden omdat ze heel moeilijk te berekenen zijn, kunnen dramatische gevolgen hebben. Bijvoorbeeld kunnen ze ervoor zorgen dat inflatie toch niet plaatsvindt in een gegeven model. In snaartheorie zijn inflatiemodellen voorgesteld waarin kwantumgravitatie-effecten wel degelijk berekend kunnen worden. Voor deze modellen zijn echter heel veel ingrediënten nodig en er is nog geen consensus over de vraag of die inderdaad allemaal combineerbaar zijn.

Binnen snaartheorie worden ook andere diepe kosmologische vragen bestudeerd. Waarom heeft ons heelal drie grote ruimtelijke dimensies? Modellen zijn voorgesteld waarin het heelal begint met negen kleine ruimtelijke dimensies en waarbij er een natuurlijk mechanisme is waardoor drie (en niet meer) van die dimensies macroscopisch groot worden. Betrouwbare berekeningen zijn echter moeilijk. Kunnen we de oerknalsingulariteit begrijpen? De verwachting is dat de singulariteiten van de algemene relativiteitstheorie in kwantumgravitatie 'opgelost' worden, vervangen door iets wat wel zinvolle, eindige resultaten geeft. Vele interessante ideeën circuleren, maar de oplossing van de oerknalsingulariteit blijft voorlopig een onopgelost probleem. Een gerelateerde vraag is of er iets was vóór de oerknal. Sommige kosmologische modellen gaan uit van een contraherend heelal dat via een oerknalsingulariteit overgaat in ons expanderend heelal. Het lot van zulke modellen hangt af van een beter begrip van de oerknal in



Figuur 11. Volgens de inflatietheorie onderging het heelal gedurende een kleine fractie van een seconde na de oerknal een enorme versnelde expansie. Figuur: *Task Force On Cosmic Microwave Background Research*, National Academies, 2005.

kwantumgravitatie modellen zoals snaartheorie. Tenslotte is er een belangrijke open vraag over het heelal vandaag. Omdat de gravitatiekracht aantrekkend is, zou men verwachten dat de expansie van het heelal vertraagt. Op het einde van de vorige eeuw ontdekten kosmologen echter tot hun verbazing dat de expansie van het heelal versnelt. De vraag is waarom dit het geval is, met andere woorden wat die expansie aandrijft. Een mogelijke verklaring is de kosmologische constante, de term die Einstein aan zijn vergelijkingen toevoegde, die de gravitatiekracht een afstotende component geeft. Maar de kosmologische constante zou minuscule moeten zijn om de waarnemingen te verklaren, veel kleiner dan men op theoretische gronden zou verwachten. Vele fysici hopen een fundamentele verklaring hiervoor te kunnen vinden, maar dat is nog niet gelukt. Anderen hebben gesuggereerd dat er wellicht geen fundamenteel antwoord bestaat. Hun voorstel is dat er heel veel heelal bestaan met heel veel verschillende

waarden voor de kosmologische constante. De verklaring waarom wij ons bevinden in een heelal met een minuscule kosmologische constante, is volgens hen dat in de heelal met grotere kosmologische constante de vorming van sterrenstelsels onmogelijk is, waardoor intelligent leven zich niet kan ontwikkelen zoals het in ons heelal gebeurd is. In die andere heelal is er dus vermoedelijk niemand om ze waar te nemen. De voorvechters van deze ideeën gebruiken elementen van inflatie en van snaartheorie om ze te onderbouwen, maar zowel de ideeën als de voorgestelde onderbouwing blijven controversieel. De hoop van velen blijft dat een jonge fysicus met een nieuw idee zal komen dat een fundamentele verklaring mogelijk maakt.

Wat de uiteindelijke theorie van kwantumgravitatie ook zal blijken te zijn, ze zal zeker zwarte gaten moeten beschrijven. De inzichten die snaartheorie in die context opgeleverd heeft, in het bijzonder het tellen van microtoestanden, zijn veelbelovend,

hoewel het laatste woord over zwarte gaten zeker nog niet is gezegd. Een ander inzicht waarvan verwacht wordt dat het zal overleven, zelfs mocht snaartheorie niet het ultieme antwoord blijken te zijn, is het holografisch principe, dat in snaartheorie zeer concreet gemaakt is en aan uitvoerige theoretische tests onderworpen. Van de kosmologische snaartheorie modellen is het op dit moment minder duidelijk welke uiteindelijk belangrijk zullen blijken te zijn. Hopelijk kan een combinatie van nieuwe observationele data en theoretische modellen ook hier voor een doorbraak zorgen.

Ben Craps is hoogleraar aan de Vrije Universiteit Brussel en ook verbonden aan de Internationale Solvay Instituten voor Fysica en Chemie. Zijn onderzoek situeert zich in de snaartheorie en heeft bijzondere aandacht voor holografie en voor kosmologische aspecten. Hij dankt Jean-Pierre De Greve en Alexander Sevrin voor feedback en suggesties bij het schrijven van deze tekst.