



Bulk Locality Breakdown: Burning Black Holes & Precarious Precursors.
L.R. Kabir

Samenvatting

BULK-LOKALITEIT GEBROKEN: GLOEIENDE ZWARTE GATEN & PRECAIRE PRECURSOREN

Deze thesis tracht een overzicht te geven van een deel van het onderzoek dat ik verricht heb tijdens mijn doctoraatsstudies in Amsterdam. Mijn onderzoek spitst zich toe op hoe fundamentele onderwerpen zoals algemene relativiteitstheorie, thermodynamica en kwantummechanica aan elkaar gerelateerd blijken. Er bestaan verschillende connecties, die tot uiting komen in zwarte gaten, holografie, en de AdS/CFT correspondentie in het bijzonder. In deze samenvatting zal ik dan ook proberen een korte valoriserende introductie te geven tot deze onderwerpen, en tegelijkertijd mijn wetenschappelijke bijdrage bondig toe te lichten.

Introductie

In het begin van vorige eeuw werden de fundamentele principes van de kwantummechanica gelegd, een theorie die kleine deeltjes zoals moleculen en atomen beschrijft. Het combineren van de kwantummechanica met de principes van een andere ontdekking uit het begin van vorige eeuw – de speciale relativiteitstheorie – leidde tot een van de grootste triomfen uit de 20^e eeuwse natuurkunde: het standaardmodel van de deeltjesfysica. Deze theorie geeft ons één enkele beschrijving van alle waargenomen fundamentele deeltjes, samen met drie van de vier natuurkrachten: de sterke-, zwakke-, en elektromagnetische kracht. Het standaardmodel werd onderworpen aan verschillende experimenten, en blijkt keer op keer stand te houden, tot op de kleinste afmetingen die waargenomen kunnen worden met behulp van de huidige deeltjesversnellers.

De vierde – en misschien wel bekendste – kracht wordt niet beschreven door het standaardmodel: de zwaartekracht. Deze kracht, die beschreven wordt door Einsteins algemene relativiteitstheorie, is verantwoordelijk voor het beschrijven van grote, massieve deeltjes zoals planeten die rond de zon draaien. Hoewel zwaarte-

kracht niet in het standaardmodel opgenomen is, heeft dit verrassend genoeg nooit tot discrepanties geleid in experimenten met deeltjesversnellers. Dit komt omdat zwaartekracht de zwakste van de vier fundamentele krachten is, zoals iedereen die ooit een paperclip met een magneet optilde, zelf heeft kunnen ondervinden.

Ondanks dat zwaartekracht de zwakste is van de vier, is het de enige kracht die werkt op grote afstanden (van macroscopische tot zelfs kosmologische schaal), en dus alomtegenwoordig is in de typische situaties van ons dagelijkse leven. Daarom is het bestuderen van de zwaartekracht toch uiterst interessant. Een manier om de zwaartekracht te bestuderen, is door te kijken wat er gebeurt als ze zeer sterk is, wat bereikt kan worden door objecten heel zwaar te maken. Wat blijkt dan? Het is niet mogelijk om de dichtheid van een object onbeperkt te laten toenemen. Wanneer een object voldoende massief wordt, stort het in elkaar onder druk van zijn eigen gewicht en vormt het één van de meest fascinerende objecten uit de natuurkunde: zwarte gaten. Merk op dat zwarte gaten niet louter een theoretisch begrip zijn, maar ook door astronomen waargenomen worden in ons universum. Het zijn namelijk de eindproducten van zware, uitdovende sterren wanneer deze op het einde van hun leven in elkaar storten.

Het ontbreken van zwaartekracht in het standaardmodel is niet de enige reden waarom het werk van natuurkundigen nog niet vervolledigd is. Het standaardmodel bevat namelijk verschillende onbepaalde parameters (zoals de massa's van elementaire deeltjes) die niet door de theorie verklaard worden. Bovendien is onze huidige beschrijving van de zwaartekracht – de algemene relativiteitstheorie – onvolledig: in situaties waarin de zwaartekracht heel sterk is (zoals in het centrum van zwarte gaten) of toegepast moet worden op heel kleine (kwantummechanische) afstanden zoals bij het begin van ons universum, loopt de beschrijving helemaal mis. In het wilde weg toepassen van algemene relativiteitstheorie op kleine afstanden is inconsistent. Dit alles blijft theoretisch natuurkundigen motiveren om te zoeken naar een 'betere' theorie: een kwantummechanische theorie van de zwaartekracht, die liefst ook nog de interactie met drie andere fundamentele krachten beschrijft. Zo een goede 'geünificeerde' theorie moet dus zowel het standaardmodel als de algemene relativiteitstheorie bevatten.

Een van de meest veelbelovende kandidaten voor zo'n alomvattende theorie is de snaartheorie. De fundamentele bouwstenen van deze theorie zijn geen deeltjes, maar wel trillende, uitgestrekte objecten: snaren en membranen. De verschillende trillingswijzen van een snaar kunnen worden geïnterpreteerd als fundamentele deeltjes. In het bijzonder kan worden aangetoond dat onder deze deeltjes zich het zogenaamde 'graviton' bevindt, dat de zwaartekracht veroorzaakt. Bovendien kunnen de membranen gebruikt worden om modellen in snaartheorie te bouwen die dezelfde eigenschappen als het standaardmodel vertonen. Dit stemt natuurkundigen

hoopvol dat snaartheorie zowel het standaardmodel, als een kwantumtheorie van de zwaartekracht kan beschrijven.

Het bestuderen van snaartheorie heeft reeds tot ettelijke successen in natuur- en wiskunde geleid. Daarenboven, en bijzonder relevant voor deze thesis, heeft snaartheorie geleid tot een van de meest merkwaardige en krachtige ideeën in de theoretische natuurkunde: de AdS/CFT correspondentie. Hierover wordt verder uitgeweid in de sectie ‘precaire precursoren’.

Gloeïende Zwarte Gaten

Een zwart gat kan voorgesteld worden als een bol, waarbij het oppervlak van de bol overeenkomt met de horizon van het zwarte gat. Eenmaal hier voorbij, is de zwaartekracht zo sterk dat er geen weg meer terug is. Zelfs licht kan niet meer ontsnappen aan de zwaartekracht wanneer het binnen de horizon van het zwarte gat komt, vandaar de naam: *zwart* gat. Eenmaal binnen de horizon eindigt alles onvermijdelijk in het centrum van de bol, waar de ‘singulariteit’ van het zwarte gat zich bevindt: een punt waar de massadichtheid oneindig wordt. In de buurt van de singulariteit is de zwaartekracht zo sterk dat de algemene relativiteitstheorie geen correcte beschrijving meer geeft, en een theorie van kwantumgravitatie noodzakelijk is om te verklaren wat er gebeurt.

In de jaren 70 werd verrassend genoeg duidelijk dat zwarte gaten toch niet zo zwart zijn: Hawking toonde aan dat zwarte gaten een temperatuur hebben, en thermische straling uitzenden. Dit impliceert dat een zwart gat langzaam energie verliest en kleiner wordt: het verdampt. Het gaf aanleiding tot de ‘informatie paradox’: gooi een object in een zwart gat en wacht tot het zwarte gat volledig verdampt is. Het eindresultaat is een hoopje thermische straling die geen enkele informatie meer over dat object bevat. Dit mag banaal lijken, maar signaleert een fundamenteel probleem met tijdsevolutie van de onderliggende theorie.

In 2012 ontstond een nieuwe, gerelateerde paradox. Er werd voor verdampende zwarte gaten pijnlijk aangetoond dat drie fundamentele natuurkundige principes onderling inconsistent zijn. Eerst en vooral is er het equivalentie principe waarop de algemene relativiteitstheorie gebaseerd is. Dit zegt dat een waarnemer in vrije val altijd hetzelfde observeert, ongeacht of hij hier op aarde valt, of hij nu door de horizon van een zwart gat valt. Ten tweede zijn er de wetten van de kwantummechanica, en ten derde het principe van de lokaliteit, wat zegt dat processen die voldoende ver van elkaar verwijderd zijn, elkaar niet kunnen beïnvloeden. Het feit dat deze drie principes inconsistent zouden zijn wanneer toegepast op een verdampend zwart gat, kwam als een shock.

Sommige natuurkundigen besloten dan maar het equivalentie principe op te geven, en concludeerden dat een waarnemer in vrije val nooit de binnenkant van een zwart gat zal zien, maar verbrand wordt op de horizon door een muur van hoge energie deeltjes. Deze paradox werd dan ook toepasselijk de ‘firewall’ paradox gedoopt.

Dit brengt ons naar de inhoud van één van mijn onderzoeken. In hoofdstuk 2 van deze thesis heb ik geprobeerd de firewall paradox te ontcrachten, door te laten zien dat een waarnemer die in een zwart gat valt, onmogelijk alle drie principes kan meten om de paradox te kunnen construeren. Dit heb ik meetkundig aangetoond voor een grote klasse zwarte gaten in verschillende ruimtes en dimensies. Het geeft een pragmatische uitweg voor de paradox: als een waarnemer niet in de mogelijkheid verkeert om alle drie principes te verifiëren, kan deze dus niet tot de conclusie komen dat ze onderling inconsistent zijn. Dit maakt dat er geen reden is om van het equivalentie principe af te stappen, en de waarnemer kan dus zonder problemen door de horizon van een zwart gat vallen.

Echter, dit is geen sluitend bewijs om de firewall paradox voorgoed op te bergen. Hoewel het onderzoek suggereert dat voor een grote klasse zwarte gaten het niet mogelijk is om de paradox waar te nemen, zijn er andere, in het bijzonder holografische (verder hierover meer) argumenten voor firewalls die robuust blijken te zijn tegen de meetkundige argumenten die ik gemaakt heb. Verder onderzoek is nodig, en ik ben ervan overtuigd dat een sluitende resolutie van deze paradox tot diepere inzichten in kwantumgravitatie zal leiden.

Precaire Precursoren

Zwarte gaten zijn thermodynamische objecten; ze worden niet alleen gekarakteriseerd door temperatuur, maar ook door entropie: een grootte die de hoeveelheid informatie meet. Het bijzondere is dat zwarte gaten een entropie hebben die gegeven wordt door hun oppervlakte, en niet door hun volume (zoals men zou verwachten bij een gas of andere familiere vorm van materie). In zekere zin betekent dit dat alle informatie van het zwarte gat, zich op de horizon (de rand) ervan bevindt. Dit fascinerende gegeven kan worden beschouwd als gevolg van het *holografisch principe*, wat stelt dat elke gravitationele theorie in een bepaald volume beschreven kan worden door een andere theorie, die leeft op het oppervlak dat dat volume omsluit. Dit merkwaardig principe wordt door theoretisch natuurkundigen beschouwd als één van de eigenschappen die een kwantummechanische theorie van de zwaartekracht zal hebben.

Al snel werd vermoed dat ook snaartheorie holografisch is, en het onderzoek culmineerde in 1997 met een van de grootste successen uit de snaartheorie: een concrete

realisatie van het holografisch principe, genaamd de Anti-de Sitter/Conforme velden (Field) Theorie correspondentie. AdS is een negatief gekromde ruimte uit de algemene relativiteitstheorie, en CFT een bijzonder symmetrische, kwantummechanische deeltjestheorie. AdS/CFT is een dualiteit (m.a.w. equivalentie) tussen twee totaal verschillende theorieën: enerzijds is er snaartheorie die leeft in AdS, en anderzijds is er de CFT die leeft op de rand van de AdS ruimte. Hiermee wordt nu ook duidelijk waarom dit een voorbeeld van het holografisch principe genoemd wordt: de gravitationele snaartheorie in AdS (ook wel de bulk genoemd), is exact gelijk aan een niet-gravitationele theorie die op de rand leeft!

AdS/CFT is zonder twijfel een van de grootste doorbraken in de theoretische natuurkunde van de afgelopen 20 jaar. De kracht van AdS/CFT zit hem in het feit dat het mogelijk is om een (vaak moeilijk) snaartheorie probleem in AdS te vertalen naar een ander, equivalent probleem in de CFT, dat meestal gemakkelijker op te lossen valt; en omgekeerd natuurlijk ook. Wat ik zelf het meest interessant vind, is dat AdS/CFT ons zo een unieke blik op snaartheorie in AdS biedt, dat toelaat kwantummechanische aspecten van zwaartekracht te bestuderen, door deze te vertalen naar een equivalent probleem in de CFT. Deze vertaling is verre van triviaal, en vraagt als het ware een woordenboek om het ene probleem in het andere om te schrijven. Hoewel zo'n vertaling cruciaal is voor de verdere ontwikkeling van AdS/CFT, zijn nog vele aspecten onbegrepen. Het is dan ook hier dat ik in mijn onderzoek een bijdrage geleverd heb, zoals uiteengezet in hoofdstukken 3, 4 en 5.

Een van mijn favoriete objecten om te bestuderen in AdS/CFT zijn de zogenaamde precursoren: een ingewikkeld en vaak niet-lokaal object in de CFT dat, wanneer het vertaald wordt naar de AdS bulk, eenvoudigweg overeenkomt met één lokaal punt. Net omdat de CFT op de rand van AdS leeft, is het interessant om te onderzoeken hoe verschillende punten in de bulk, die gescheiden leven in deze 'extra' dimensie weg van rand, in de CFT gereconstrueerd worden. Dit vertaalt zich in dat precursoren vaak heel verrassende en zelfs paradoxale eigenschappen hebben, zoals de titel al doet vermoeden. In het bijzonder, indien deze punten in de bulk voldoende ver van elkaar verwijderd zijn, zouden deze niet met elkaar mogen interageren, iets wat lokaliteit in de bulk genoemd wordt. Het bestaan van lokaliteit in de bulk is een, voor mij misschien wel het, mirakel van AdS/CFT, en zonder twijfel een van de minst begrepen maar meest fascinerende aspecten van de correspondentie.

Aangezien alle informatie van een punt in de gravitationele bulk bevat zit in de precursor, heb ik onderzocht hoe en waar in de CFT deze informatie gecodeerd wordt. Ik heb aangetoond dat precursoren niet uniek zijn (d.w.z. meerdere precursoren kunnen met hetzelfde punt in AdS corresponderen), en laat zien dat het gebrek aan uniciteit gebruikt kan worden om informatie in een bepaalde regio van

de CFT te lokaliseren. Vervolgens poneer ik ook een vermoeden dat precursoren die met eenzelfde bulk punt corresponderen, relateert aan de onderliggende symmetrieën in de CFT. Dit is verrassend, aangezien voorheen gedacht werd dat deze symmetrieën (ijksymmetrie in het bijzonder) geen fysische rol spelen in AdS/CFT. Tenslotte stel ik de vraag welke eigenschappen een CFT moet hebben, om ‘goede’, lokale gravitationele theorieën te beschrijven, zoals Einsteins zwaartekrachtstheorie waarin we lijken te leven. Dit is geen eenvoudige vraag, en om vooruitgang te maken heb ik een simpel model van de AdS/CFT correspondentie bestudeerd. Dit liet me toe om de kenmerken bloot te leggen van dergelijke holografische CFTs.

De AdS/CFT correspondentie heeft het bestuderen van kwantumgravitatie fundamenteel veranderd, en maakte van holografie een van de meest waardevolle en interessante ideeën uit de theoretische natuurkunde in de afgelopen 20 jaar. Het onderzoeksveld breidt zich snel uit en focust zich niet enkel op kwantumgravitatie, maar omvat nu ook deelgebieden die holografie (en snaartheorie in het bijzonder) gebruiken om meer te leren over kernfysica en de theorie van gecondenseerde materie zoals supergeleiders en -fluida.