



Instabilities of String Vacua and Cosmological Spacetimes

Dhr. L. Aalsma

Samenvatting

Quantumzwaartekracht

Een groot deel van de fysica in de 20^e eeuw stond in het teken van de ontwikkeling van twee theorieën: quantumveldentheorie en de algemene relativiteitstheorie. Deze twee theorieën vormen de basis van de moderne theoretische fysica en beschrijven de vier fundamentele krachten van de natuur. Quantumveldentheorie geeft de wiskundige beschrijving van drie van deze krachten: de elektromagnetische kracht, de zwakke kernkracht en de sterke kernkracht. De vierde kracht, zwaartekracht, past niet in het raamwerk van quantumveldentheorie en wordt in plaats daarvan beschreven door Einsteins algemene relativiteitstheorie.

Deze twee theorieën zijn enorm succesvol gebleken in het beschrijven van een rijk scala aan fenomenen. Recent nog zijn twee belangrijke voorspellingen van beide theorieën bevestigd. In 2012 toonden onderzoekers verbonden aan CERN (het onderzoeksinstituut in Genève dat de Large Hadron Collider herbergt) het bestaan van het Higgsboson aan. Deze meting bevestigde een voorspelling van Brout, Englert en Higgs uit de jaren 60 en was een grote triomf voor quantumveldentheorie. Later, in 2015, werden voor het eerst direct zwaartekrachtsgolven waargenomen door wetenschappers verbonden aan de LIGO/VIRGO experimenten. Het bestaan van deze ‘golven in de ruimtetijd’ werd al door Einstein afgeleid in 1916. Beide ontdekkingen hebben nogmaals de voorspellingen van quantumveldentheorie en de algemene relativiteitstheorie bevestigd en zijn dan ook bekroond met een Nobelprijs.

Een van de vragen die hiermee niet is beantwoord, is hoe deze twee theorieën samengebracht kunnen worden in een overkoepelende beschrijving. Deze vraag is niet alleen interessant vanuit theoretisch oogpunt, maar ook van groot belang voor de beschrijving van systemen wiens zwaartekracht zeer groot is. In dergelijke situaties, die bijvoorbeeld optreden in zwarte gaten en vlak na het ontstaan van het heelal, volstaat de beschrijving van zwaartekracht vanuit de algemene relati-

viteitstheorie niet meer. Om een fysisch correcte beschrijving van deze systemen te geven moet zwaartekracht quantummechanisch worden behandeld en is een zogeheten theorie van quantumzwaartekracht nodig.

Een van de best begrepen en meest succesvolle voorstellen voor zo'n theorie is snaartheorie. Volgens snaartheorie bestaan de elementaire puntdeeltjes (zoals bijvoorbeeld elektronen) uit kleine tweedimensionale snaren. Ook bevat de theorie hogerdimensionale membranen, wiens excitaties net als die van snaren corresponderen met verschillende type deeltjes. In principe zijn de effecten van deze snaren en membranen direct te meten, maar in de praktijk zijn ze zo klein dat dit met de huidige technologie nagenoeg onmogelijk is. Het blijkt echter dat in sommige situaties microscopische quantumzwaartekrachteffecten toch macroscopische gevolgen kunnen hebben. Zo zijn er bijvoorbeeld aanwijzingen dat de conventionele beschrijving van zwarte gaten vanuit de algemene relativiteitstheorie al op de schaal van de horizon moet worden aangepast om consistent te zijn met quantumzwaartekracht. Centraal in dit proefschrift staat daarom de vraag wat de macroscopische voorspellingen van quantumzwaartekracht zijn. In hoofdstuk 2 en 3 focussen we hierbij voornamelijk op algemene quantumeffecten van zwaartekracht en in hoofdstuk 4 duiken we wat dieper in de snaartheorie.

Resultaten van dit proefschrift

In hoofdstuk 2 bestuderen we quantumeffecten in zwaartekracht in de context van extremale zwarte gaten. Deze zwarte gaten hebben naast een massa ook een even grote elektrische lading. Het interessante aan extremale zwarte gaten is dat ze dichtbij de horizon worden beschreven door een tweedimensionaal anti-de Sitter vacuum: een oplossing van Einsteins algemene relativiteitstheorie met een negatieve energiedichtheid. Alhoewel deze geometrie niet direct ons eigen universum beschrijft (dat een positieve energiedichtheid heeft) is zij wel uitermate geschikt om quantumzwaartekracht te bestuderen in een eenvoudige achtergrond. In hoofdstuk 2 laten we zien dat quantumeffecten ervoor zorgen dat in deze achtergrond spontaan deeltjes worden gecreëerd die tot een instabiliteit van het vacuum leiden. Deze instabiliteit hangt niet af van de precieze microscopische beschrijving van anti-de Sitter vacua en lijkt dus een universele voorspelling van quantumzwaartekracht te zijn.

In hoofdstuk 3 verplaatsen we onze aandacht naar quantumeffecten in de Sitter vacua. Dit zijn oplossingen van de algemene relativiteitstheorie die een positieve energiedichtheid hebben en daarmee een goede beschrijving geven van ons uitdijende heelal. We analyseren de verschillende quantumtoestanden die gekozen kunnen worden in een de Sitter vacuum. De keuze voor een bepaalde quantum-

toestand kan worden gezien als het opleggen van specifieke randvoorwaarden die de evolutie van de geometrie bepalen. We identificeren en construeren een nieuwe quantumtoestand die we de Unruh-de Sitter toestand noemen en bepalen zijn karakteristieke eigenschappen. Net als de meer conventioneel gekozen Bunch-Davies toestand lijkt deze toestand een goede beschrijving te geven van het vroege heelal. Een belangrijk verschil met de Bunch-Davies toestand is dat de Unruh-de Sitter toestand minder symmetrieën bewaart en dat de Sitter vacua hierdoor een instabiliteit ontwikkelen. Dit plaatst een fundamentele restrictie op de levensduur van een uitdijend heelal. We beargumenteren dat de Unruh-de Sitter toestand wellicht een meer accurate beschrijving geeft van het vroege universum dan de Bunch-Davies toestand. Verder onderzoek moet uitwijzen of deze toestand ook mogelijk waarneembare eigenschappen heeft waarmee deze kan worden onderscheiden van de Bunch-Davies toestand.

We vervolgen onze discussie in hoofdstuk 4 door de Sitter vacua te bestuderen in snaartheorie. We focussen specifiek op een snaartheoretische constructie van de Sitter vacua die bekend staat als het KKLT scenario. Een van de karakteristieke eigenschappen van deze constructie is dat supersymmetrie (een symmetrie van snaartheorie tussen bosonen en fermionen) wordt gebroken door gebruik te maken van een stapel anti-D3-branen: een van de bouwstenen van snaartheorie. Het breken van supersymmetrie is noodzakelijk aangezien de Sitter vacua door hun positieve energiedichtheid deze symmetrie niet kunnen bewaren. Om wel consistent te zijn met de onderliggende supersymmetrie van snaartheorie moet supersymmetrie gecontroleerd (de technische benaming is ‘spontaan’) worden gebroken in het KKLT scenario. Tot recent was het niet duidelijk of anti-D3-branen supersymmetrie inderdaad spontaan breken, maar in hoofdstuk 4 wordt, voortbouwend op eerder werk, overtuigend aangetoond dat dit wel het geval is. Een universele voorspelling van spontaan gebroken supersymmetrie is de aanwezigheid van een massaloos fermion. Door een matrixmodel op te stellen dat de vrijheidsgraden van de stapel anti-D3-branen beschrijft is dit massaloze fermion expliciet geïdentificeerd. Dit resultaat ondersteunt dus de consistentie van het KKLT scenario wat betreft de breking van supersymmetrie.

Toekomstig onderzoek

De resultaten van dit proefschrift zijn slechts een kleine stap in de goede richting om de eigenschappen van quantumzwaartekracht te ontrafelen. In het bijzonder staat ons begrip van quantumzwaartekracht in de Sitter vacua nog in de kinderschoenen. Momenteel is er een levendige discussie gaande in de literatuur over de consistentie van de verschillende constructies van de Sitter vacua in snaartheorie,

zoals het KKLT scenario, en of snaartheorie überhaupt wel stabiele de Sitter vacua toelaat. Deze discussie is ook zeer relevant in de context van de resultaten gepresenteerd in hoofdstuk 3 waar we een quantumtoestand hebben geïdentificeerd waarin de Sitter vacua een instabiliteit ontwikkelen. Het zou interessant zijn om te begrijpen hoe deze toestand zich manifesteert in snaartheorie en of dit een mogelijke verklaring is voor de spanning die er lijkt te bestaan tussen kosmologische (uitdijende) geometrieën en snaartheorie. Meer algemeen suggereren de resultaten van dit proefschrift dat microscopische quantumzwaartekracht effecten macroscopische gevolgen kunnen hebben. Ondanks het feit dat deze effecten typisch zeer klein zijn biedt dit de hoop dat we in sommige situaties toch universele voorspellingen kunnen afleiden die mogelijk te testen zijn met nauwkeurige observaties van zwarte gaten en het uitdijende heelal.