



Emergent Gravity in a Holographic Universe
Dhr. M.R. Visser

SAMENVATTING

Emergente Zwaartekracht in een Holografisch Universum

Zwaartekracht is de belangrijkste kracht in ons universum. Zij veroorzaakt de getijden op aarde, laat alle planeten in een baan om de zon draaien, houdt de sterren in ons Melkwegstelsel bijeen, en zorgt ervoor dat ons heelal versneld uitdijt. Kortom, zonder de zwaartekracht zou het universum zoals wij dat kennen niet bestaan.

Toch is de zwaartekracht de minst begrepen fundamentele kracht van de Natuur. De zwaartekrachtstheorieën van Isaac Newton en Albert Einstein doen goede voorspellingen op aarde en in ons zonnestelsel, maar op *grote* schaal stroken zij niet met de waarnemingen van astronomen en kosmologen. Het is onduidelijk waarom sterren aan de rand van sterrenstelsels zo snel bewegen en bovendien weten we niet waarom het heelal versneld uitdijt. Deze experimentele problemen staan, respectievelijk, bekend als ‘donkere materie’ en ‘donkere energie’. Op *kleine* schaal (lees: subatomair niveau) is het zelfs lastig om überhaupt consistente voorspellingen te doen met de huidige zwaartekrachtstheorieën. Het combineren van quantummechanica (de theorie van het allerkleinste) met de algemene relativiteitstheorie (Einsteins zwaartekrachtstheorie) leidt tot allerlei wiskundige problemen. Dit suggereert dat zwaartekracht op quantumniveau een andere beschrijving nodig heeft dan de andere fundamentele krachten, zoals electromagnetisme, die wél goed door de quantummechanica worden beschreven. Dit proefschrift gaat over *quantum-zwaartekracht* en onderzoekt ook de oorsprong van donkere energie.

Zwaartekracht bestaat niet (op de allerkleinste schaal)

De afgelopen decennia is er een nieuwe kijk op zwaartekracht ontstaan, die ik door middel van mijn onderzoek mede verder heb ontwikkeld: de theorie van *emergente zwaartekracht*. Met emergentie bedoelen we dat er op grote schaal nieuwe eigenschappen voorkomen die op kleine schaal niet aanwezig zijn. Volgens deze kijk bestaat zwaartekracht niet op de allerkleinste schaal (lees: de Planckschaal

10^{-35} m), maar komt zij pas tevoorschijn op grotere schaal. Hetzelfde geldt voor ruimtetijd, omdat volgens Einstein zwaartekracht niets anders is dan de kromming van ruimtetijd. Deze emergente kijk roept de volgende vragen op die ik in mijn proefschrift behandel: wat is de microscopische beschrijving van ruimtetijd? En hoe emergeert zwaartekracht precies op grote schaal uit deze beschrijving?

De belangrijkste aanwijzingen voor de emergentie van ruimtetijd en zwaartekracht zijn theoretisch van aard. Ten eerste ontdekten de fysici Jacob Bekenstein en Stephen Hawking (en anderen) in de jaren zeventig van de vorige eeuw dat zwarte gaten *thermodynamische* objecten zijn, met een temperatuur, energie en entropie. Thermodynamische objecten bestaan typisch uit kleinere bestanddelen, microscopische vrijheidsgraden genoemd. Een gas bestaat bijvoorbeeld uit grofweg 10^{23} individuele atomen. De thermodynamische eigenschappen van zwarte gaten suggereren dus dat zij ook uit microscopische vrijheidsgraden bestaan. Dit vermoeden werd bevestigd in 1995 door een belangrijk resultaat uit de snaartheorie van Andrew Strominger en Cumrun Vafa: zij telden het aantal microtoestanden voor specifieke (supersymmetrische) zwarte gaten en toonden aan dat dit overeenkomt met de Bekenstein-Hawking formule voor de entropie van zwarte gaten in Einsteins zwaartekrachtstheorie. Dit betekent dat de (gekromde ruimte van) zwarte gaten die Strominger and Vafa onderzochten emergeren uit snaartheoretische toestanden.

Ten tweede wijst theoretisch onderzoek uit dat zwaartekracht een *holografisch* fenomeen is. Dat betekent dat zij net zo goed kan worden beschreven door een quantumtheorie zonder zwaartekracht die leeft in een lagerdimensionale ruimte, één dimensie lager dan de ruimte waarin de zwaartekracht werkt. Volgens het holografisch principe is een zwaartekrachtstheorie in een driedimensionale ruimte, zoals ons universum, equivalent aan een quantumtheorie op een tweedimensionaal ‘hologram’. Aangezien de theorie op het hologram quantummechanisch is en geen zwaartekracht bevat, zou zij fundamenteeler kunnen zijn dan de zwaartekrachtstheorie (en dat is ook hoe veel fysici holografie interpreteren). In dat geval emergeert zwaartekracht vanuit een microscopische beschrijving in één dimensie lager.

Thermodynamica van causale diamanten

In dit proefschrift hebben we een nieuw principe voor emergente zwaartekracht onderzocht, dat Ted Jacobson heeft voorgesteld in 2015. Hij leidde de zwaartekrachtvergelijking van Einstein af vanuit een *equilibriumconditie* voor de entropie van kleine causale diamanten. Een *causale diamant* is het grootste gebied in ruimtetijd dat causaal is verbonden met een waarnemer gedurende zijn hele leven. Jacobsons argument is gebaseerd op een aantal aannames, die in dit proefschrift onder de loep worden genomen, zoals het vasthouden van het volume van het maximale constante-tijdoppervlak van de diamant en een hypothese over de modu-

laire Hamiltoniaan van niet-conforme veldentheorieën in kleine vlakke causale diamanten. HOOFDSTUK ÉÉN bevat een introductie tot deze afleiding van Einsteins vergelijking en tot andere concepten die belangrijk zijn voor dit proefschrift, zoals emergente zwaartekracht en holografie.

In HOOFDSTUK TWEE bestuderen we de thermodynamische eigenschappen van causale diamanten in maximaal symmetrische ruimtes. Door een conforme Killing-symmetrie te gebruiken kunnen we een thermodynamische relatie afleiden tussen de temperatuur, energie en entropie van deze diamanten. We beargumenteren dat deze relatie alleen consistent is als de (absolute) temperatuur negatief is, dat wil zeggen een lagere temperatuur dan nul graden Kelvin. We laten verder zien hoe de equilibriumconditie voor entropie volgt uit de thermodynamische relatie (waarin het volume de rol speelt van gravitationele energie). Een ander resultaat is dat deze conditie *equivalent* is aan een equilibriumconditie voor de vrije energie van causale diamanten, die dus evengoed als input kan worden gebruikt in de afleiding van Einsteins vergelijking. Het voordeel van de equilibriumconditie voor vrije energie is dat zij niet is gebaseerd op de aannames over het volume en de modulaire Hamiltoniaan, en dus verdient zij de voorkeur volgens Ockhams scheermes.

In HOOFDSTUK DRIE generaliseren we Jacobsons originele argument naar andere zwaartekrachtstheorieën, die een uitbreiding zijn op Einsteins theorie (in de zin dat de Lagrangiaan extra krommingstermen bevat) en die belangrijk zijn bij hoge energieën. We leiden de zwaartekrachtsvergelijking voor deze theorieën af vanuit een equilibriumprincipe voor entropie. Hiervoor leiden we eerst een thermodynamische relatie af voor causale diamanten in de context van deze theorieën. Het verschil met Jacobsons resultaat is dat voor deze theorieën alleen de gelineariseerde zwaartekrachtsvergelijking kan worden afgeleid, terwijl voor Einsteins theorie de volledige niet-lineaire vergelijking volgt.

Een holografische kijk op het universum

In HOOFDSTUK VIER van het proefschrift hebben we de holografische eigenschappen van causale diamanten onderzocht. We nemen aan dat causale diamanten aan het holografisch principe voldoen, dat wil zeggen dat er een microscopische theorie leeft op de rand van diamanten. Voor diamanten in sferisch symmetrische ruimtes definiëren we drie microscopische grootheden: het aantal vrijheidsgraden, het aantal excitaties en de energie per vrijheidsgraad. We motiveren deze grootheden vanuit de AdS/CFT correspondentie en relateren ze voor non-AdS ruimtes aan lange snaren in symmetrisch-producttheorieën. Aangezien holografie niet goed is begrepen voor non-AdS ruimtes — zoals de ruimte die lijkt op ons universum, genaamd de Sitter ruimte — helpen deze grootheden bij het vinden van de juiste microscopische theorie voor deze ruimtes (en dus ook voor ons universum).