



*The Entangled Universe*

B. Mosk

---

# Samenvatting

## THE ENTANGLED UNIVERSE

### Context

In het begin van de 20<sup>ste</sup> eeuw veranderden twee fundamenteel nieuwe concepten in de natuurkunde ons begrip van het universum. De eerste revolutie werd ingezet met de komst van Einsteins algemene relativiteitstheorie in 1915, waarmee Newtons universele wet van de zwaartekracht werd vervangen. De algemene relativiteitstheorie veranderde ons begrip van ruimte en tijd. De relativiteitstheorie geeft een goede beschrijving op grote schalen. De tweede revolutie vloeide voort uit de ontdekking van de kwantummechanica. De kwantummechanica geeft een goede beschrijving van de natuurkunde op kleine schalen.

Deze nieuwe ideeën gaven een enorme impuls aan het gebied van de kosmologie en dat van de deeltjesfysica. De algemene relativiteitstheorie gaf inzicht in de beschrijving van de geometrie van ons universum. Het waarnemen van de kosmologische roodverschuiving, in combinatie met het ontdekken van de theoretische beschrijving van een uitdijend heelal met de algemene relativiteitstheorie vormden de basis voor de modellen van de Oerknal en kosmologische inflatie. Het standaardmodel van de deeltjesfysica werd ontwikkeld met behulp van de concepten uit de kwantummechanica en de speciale relativiteitstheorie en resulteerde in de voorspelling en de ontdekking van vele nieuwe deeltjes, zoals recentelijk nog het Higgs boson.

Hoewel het standaardmodel van de deeltjesfysica en de theorie van kosmologische inflatie zeer succesvol zijn in het voorspellen en verklaren van observaties, blijft een aantal vragen onbeantwoord. In de eerste plaats is het verzoenen van de kwantummechanica en de algemene relativiteitstheorie problematisch. Ten tweede zijn er vele modellen van kosmologische inflatie, maar welk model geeft een juiste

beschrijving van ons universum? Daarnaast zijn er nog vele andere open vragen die niet in dit proefschrift worden behandeld, zoals de zoektocht naar de aard en herkomst van donkere materie en donkere energie.

## Motivatie van het onderzoek

### Holografie

Met de ontwikkeling van de snaartheorie is een poging gedaan om de kwantummechanica en de algemene relativiteitstheorie met elkaar te verzoenen; de theorie is als een huwelijk tussen de zwaartekracht en de kwantummechanica. In de snaartheorie kunnen deeltjes worden gezien als trillingen op snaren. Ook al is het twijfelachtig of de snaartheorie de natuurverschijnselen in ons universum verklaart, de theorie bracht een concrete realisatie voort van het concept van holografie; het idee dat de vrijheidsgraden in een volume van ruimte kunnen worden beschreven met een model op een holografisch scherm met één dimensie minder.

Het eigenaardige van holografie is dat het model op het holografische scherm, de “rand”, geen zwaartekracht kent, terwijl de beschrijving van het volume van ruimte, de “bulk”, wél zwaartekracht kent. Dit betekent dat een beschrijving van de zwaartekracht mogelijk is in termen van een quantum mechanisch model zónder zwaartekracht, althans onder bepaalde omstandigheden. Dit opent de deur om de zwaartekracht te bestuderen vanuit een heel ander perspectief: het perspectief van de beschrijving op een “holografisch scherm”.

Holografie geeft een voorbeeld van een dualiteit: een exacte equivalentie van twee modellen in de natuurkunde. In dit geval betreft het de twee modellen van de bulk en de rand. Modellen die dual zijn zien er misschien heel anders uit, maar er is een woordenboek dat de grootheden en natuurwetten in één model vertaald naar grootheden en natuurwetten in het andere model. Het holografische woordenboek is nog incompleet.

Bij een échte dualiteit moet het mogelijk zijn het woordenboek tussen de twee modellen volledig te ontrafelen. *Holografische reconstructie* is het vakgebied van de reconstructie van de bulk fysica, waarbij de natuurwetten en grootheden van het model op de rand gegeven zijn. In deel I van dit proefschrift wordt ingegaan op de beperkingen van de bekende reconstructietechnieken en een eventueel “nieuw woord” in het holografische woordenboek, namelijk de “causale holografische informatie”.

## Kosmologie

Waarnemingen suggereren dat ons universum een fractie na de Oerknal een fase van versnelde uitdijing (inflatie) doormaakte. De kosmische achtergrondstraling kan gezien worden als een voetafdruk van de kosmologische inflatie. Het verklaren van het spectrum van de kosmische achtergrondstraling is dan ook een belangrijke eigenschap waaraan een model van inflatie moet voldoen.

Een model gebaseerd op de klassieke evolutie van de metriek en een scalair veld, genaamd het inflaton-veld, voorziet in een effectieve beschrijving van het mechanisme achter inflatie. Quantum fluctuaties verklaren de vorm van het waargenomen spectrum van de kosmische achtergrondstraling verbazingwekkend goed.

Er zijn verscheidene problemen met de theorie van kosmologische inflatie. Zo zijn er bijvoorbeeld honderden verschillende modellen die inflatie kunnen verklaren. Vele van deze modellen kunnen niet worden uitgesloten op basis van waarnemingen. Desalniettemin zijn die modellen vaak gebaseerd op verschillende aannames. Dit roept de volgende vraag op: hoe kunnen we verschillende modellen met verschillende aannames onderscheiden in de (toekomstige) waarnemingen? En kunnen we op zijn minst deze modellen op een nuttige manier organiseren of ordenen?

## Resultaten

### Holografie

In hoofdstuk 2 werd een aantal bulk-reconstructietechnieken besproken. Bulk-reconstructie technieken maken gebruik van bulk-sondes; dat zijn objecten in de bulk, waarvan we idealiter ook weten wat de representatie is in het model op de rand. Er werden twee verschillende begrippen geïntroduceerd die kwalitatief aangeven wat het vermogen van een bulk-sonde is om de bulk te reconstrueren: de sterke- en zwakke bedekkingseigenschappen. Voor een deelverzameling van bulk-sondes bewezen we een aantal lemma's en stellingen, die inzichtelijk maken hoe "goed" een bulk-sonde is in de context van bulk-reconstructie. Vervolgens illustreerden wij de beperkingen van bulk-sondes door te kijken naar het voorbeeld van de BTZ-metriek, waaruit blijkt dat niet aan de sterke bedekkingseigenschap wordt voldaan. Dit betekent dat we met de bekende bulk-sondes en bulk-reconstructietechnieken niet in staat zijn de bulk op een niet-perturbatieve wijze te reconstrueren. De gebieden waar een niet-perturbatieve reconstructie niet mogelijk is noemen we "schaduw". Zoals hierboven al is beschreven, is het holografische woordenboek onvolledig. Het feit dat men op dit moment niet in staat is de bulk helemaal te reconstrueren, motiveert de zoektocht naar "nieuwe woorden" in het holografische woordenboek.

In hoofdstuk (3) bespraken we eigenschappen van de causale holografische informatie, een bulk-sonde waarvan niet duidelijk is wat het corresponderende object is in het duale model op de rand. Onze belangrijkste bijdrage is dat we hebben ontdekt dat de niet-leidende divergenties van causale holografische informatie in het algemeen niet-lokaal zijn; ze kunnen niet worden uitgedrukt in termen van integralen van lokale grootheden. Ten tweede hebben we laten zien dat de coëfficiënt van de logaritmisches divergerende term (indien aanwezig) universeel is; deze coëfficiënt is niet afhankelijk van de kwantum-toestand, of de procedure waarmee de divergentie wordt gereguleerd. Ten derde hebben we gespeculeerd over de mogelijke kandidaten voor een duale representatie van causale holografische informatie in het model op de rand. Onze voorstellen worden gekenmerkt door het feit dat zij allemaal de Von Neumann entropie van een grofkorrelige dichtheidsmatrix zijn. Volgend op onze initiële suggesties, is er recentelijk een verbeterd voorstel van deze aard gedaan door A. C. Wall en W. R. Kelly.

### **Kosmologie**

In hoofdstuk (5) beschouwden we de hyperbolische sectie van de Sitter ruimtetijd, die als model diende voor een “bubbel universum”. We vergeleken twee verschillende kwantumtoestanden en de bijbehorende spectra. Ook analyseerden we het gedrag van de energie-momentum tensor. Ons belangrijkste resultaat is in de eerste plaats dat het spectrum van het scalaire veld in de Bunch-Davies toestand overeenkomt met het spectrum dat volgt uit de berekening met de gereduceerde dichtheidsmatrix van de Bunch-Davies toestand. In principe is dat logisch, maar in recent werk van S. Kanno werd gesuggereerd dat deze twee berekeningen verschillende resultaten geven. Verder concludeerden we dat de Bunch-Davies toestand en het hyperbolische vacuüm niet resulteren in *waarneembare* verschillen in het spectrum.

Ook presenteerden we een afbeelding tussen de hyperbolische en vlakke secties van de Sitter ruimtetijd. Met deze afbeelding laten we zien dat het natuurlijke hyperbolische vacuüm wordt afgebeeld op de Bunch-Davies toestand van de vlakke sectie. Vervolgens toonden we aan dat het verschil tussen de energie-momentum tensoren in deze toestanden UV-eindig is, maar divergeert nabij de horizon van de hyperbolische sectie.

In hoofdstuk (6) kwamen we terug op het probleem van het grote aantal modellen van kosmologische inflatie. We namen een ander perspectief op de verzameling van inflatiemodellen met één scalar veld, door ze in het niet-minimaal gekoppelde Jordan-raamwerk te bekijken. Ten eerste hebben wij geconcludeerd dat er twee typen modellen *speciaal* zijn vanuit dit perspectief; dat zijn zogenaamde aantrekkingspunten. In de limiet van een vlakke- en steile conforme factor, ofwel de

zwakke- en sterke niet-minimale koppeling, reduceren deze modellen respectievelijk tot de chaotische- en Starobinsky-inflatiemodellen. Ten tweede zagen we dat het fijn-afstelingsprobleem (“fine-tuning”) bij chaotische inflatie kan worden geïnterpreteerd als de vlakke conforme factor limiet. Ten derde toonden we aan dat het Starobinsky-aantrekkingspunt een universeler karakter heeft dan de chaotische aantrekkingspunten, omdat de energie-schaal van inflatie bij het Starobinsky-aantrekkingspunt niet afhangt van de precieze vorm van de conforme factor, zolang aan de steile conforme factor limiet wordt voldaan. Voor de chaotische aantrekkingspunten hangt de schaal van de inflatie wel af van de specifieke vorm van de conforme factor.

## **Vooruitblik**

In de zoektocht naar nieuwe technieken in het veld van de holografische reconstructie zijn recentelijk veelbelovende resultaten verkregen door methoden uit de integraal-geometrie en de kwantuminformatietheorie te gebruiken. We hopen dat we in de toekomst een bijdrage kunnen leveren aan het belichten van mogelijkheden om de holografische schaduwgebieden in de bulk te reconstrueren, door nieuwe bulk-sondes en reconstructietechnieken te identificeren.

Op het gebied van de kosmologie is de interesse in de chaotische aantrekkingspunten afgenomen na een gezamenlijke analyse van de BICEP2/Keck Array en Planck groepen, die wijst op een kleinere tensor-scalar verhouding dan oorspronkelijk geopperd door de BICEP2-groep, wat inconsistent is met chaotische inflatiemodellen. Het Starobinsky-aantrekkingspunt is juist consistent met de waarnemingen van de Planck-satelliet. Meer nauwkeurige metingen van de tensor-scalar verhouding en van de niet-Gaussische afwijkingen in het spectrum van de kosmische microgolf achtergrond zijn cruciaal om tot een juister model van inflatie te komen.