Universiteit
Leiden
The Netherlands

Conformal invariance and microscopic sensitivity in cosmic inflation

Aalst, T.A.F. van der

Citation

Aalst, T. A. F. van der. (2012, December 19). *Conformal invariance and microscopic sensitivity in cosmic inflation*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from https://hdl.handle.net/1887/20327

Version:	Corrected Publisher's Version
License:	Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden
Downloaded from:	https://hdl.handle.net/1887/20327

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page

Universiteit Leiden

The handle http://hdl.handle.net/1887/20327 holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Aalst, Ted Adrianus Franciscus van der
Title: Conformal invariance and microscopic sensitivity in cosmic inflation
Issue Date: 2012-12-19

Samenvatting

Snaarkosmologie

Het wereldoppervlak van de snaar

De mens is een nieuwsgierig wezen, dat al sinds mensenheugenis zijn omgeving aan het beschouwen, verklaren en voorspellen is. Staande op de schouders van onze voorgangers, hebben we onze kennis van de fundamentele bouwstenen van de natuur en hun onderlinge wisselwerkingen weten te verfijnen tot een tweetal theorieën. De kwantumveldentheorie van het *standaard model* beschrijft de natuur op kleine schaal. De *algemene relativiteitstheorie* geeft een meetkundige beschrijving van zwaartekracht, wat weliswaar een zeer zwakke kracht is en daardoor op kleine schaal nagenoeg verwaarloosbaar, maar die met zijn lange dracht dominant is op grote afstandschalen. De volgende stap is om ook deze twee theorieën samen te voegen tot één theorie, een *kwantumzwaartekrachttheorie*. Op dit moment is *snaartheorie* de beste kandidaat voor een kwantumzwaartekrachttheorie.

In de snaartheorie wordt de natuur beschreven in termen van fundamentele één-dimensionale deeltjes, heel anders dan "elementaire" deeltjes zoals elektronen en quarks, welke nul-dimensionale deeltjes zijn. Terwijl een snaar door de ruimte beweegt, genereert hij een twee-dimensionaal oppervlak —één richting langs de lengte van de snaar en één richting die de beweging van de snaar volgt—, het *wereldoppervlak* van de snaar. Snaartheorie is een twee-dimensionale theorie die beschrijft hoe dit wereldoppervlak is ingebed in de vier-dimensionale ruimte om ons heen.[1] De ruimte waardoor de snaar reist, beïnvloedt de mogelijke bewegingen van de snaar. Deze invloeden komen in de twee-dimensionale wereldoppervlaktheorie voor als parameters van de theorie, net zoals de massa en lading van het elektron als parameters voorkomen in de theorie van elektromagnetisme.

De parameters van snaartheorie zijn echter niet willekeurig, aangezien het voor

[1] Sinds het begin van de 20^{e} eeuw behandelen theoretische natuurkundigen tijd en ruimte op gelijke voet. Voor hen is onze ruimte, met één tijdsrichting en drie ruimtelijke richtingen, daarom vier-dimensionaal.

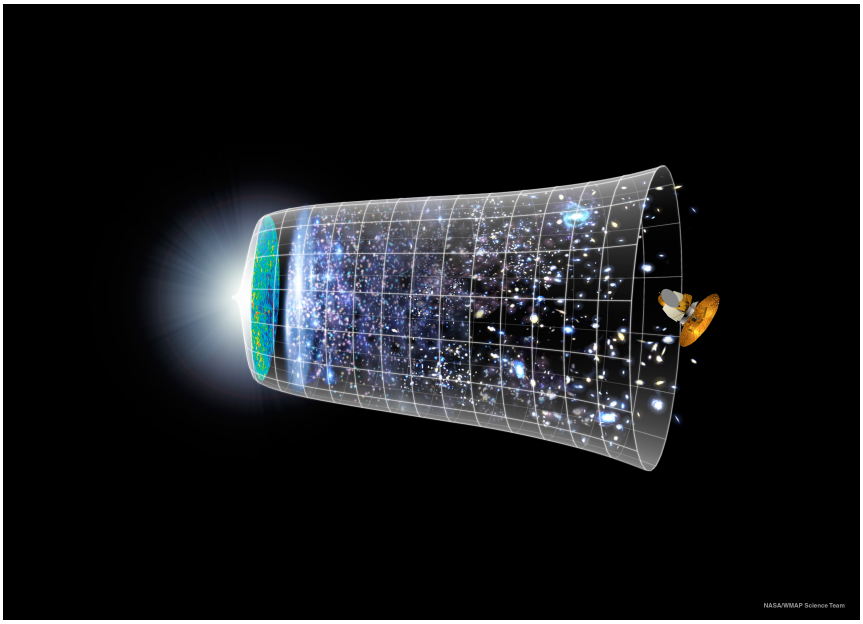
de kwantumconsistentie van snaartheorie cruciaal is dat de wereldoppervlaktheorie invariant is onder lengte veranderende, maar hoekgetrouwe tranformaties. Een theorie die invariant is onder *hoekgetrouwe transformaties*, "conformal transformations", beschrijft een systeem dat onveranderd blijft bij (plaatselijke) herschalingen, zoals bij het inzoomen op de cirkels op de voorkant van dit proefschrift. Aangezien de wereldoppervlaktheorie hoekgetrouw moet zijn, worden de parameters van snaartheorie en daardoor de mogelijke theorieën sterk beperkt. De eis van hoekgetrouwe invariantie van de twee-dimensionale snaartheorie bepaalt zo de vier-dimensionale achtergrondsruimte van de snaar, oftewel de natuur om ons heen. Het bijzondere aan snaartheorie is dat diepere studie van de theorie onthult dat de snaar zelf deze parameters bepaalt. Hoe dit werkt, begrijpen we alleen voor achtergrondsruimten die statisch zijn, d.w.z. niet veranderen met de tijd. De natuur is echter niet statisch. Alles beweegt en zelfs de kosmos dijt uit met de tijd. Hoe tijdsafhankelijke achtergrondsruimten, en in het bijzonder kosmologische achtergronden, beschreven kunnen worden, is één van de grote puzzels binnen de kwantumzwaartekracht.

Kosmische inflatie

Het heelal is dynamisch. Zo'n 13,8 miljard jaar geleden is het heelal ontstaan in een hete, dichtopeengepakte toestand, welke sindsdien uitdijt. De kosmologie onderzoekt de dynamica van het gehele heelal, waaronder het precieze verloop van het allereerste begin, de *oerknal*. We hebben een goed begrip van reeds luttele momenten na de oerknal, maar onze onzekerheid groeit naarmate we dichter en dichter bij dit eerste begin komen. Het vroegst bekende stadium is *kosmische inflatie*, een korte periode waarin het heelal immens versneld is uitgedijd, zie figuur 1.

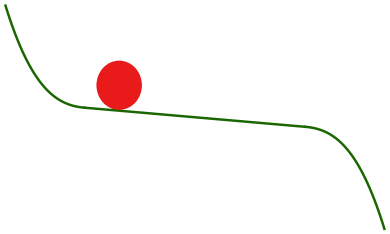
De wiskundige beschrijving van inflatie is verrassend eenvoudig. De dynamica van de versnelde uitdijing van het heelal, is dezelfde als die van een rollende bal in een heuvellandschap, zoals in figuur 2. Het heuvellandschap wordt de *potentiaal* genoemd, de rollende bal het *inflaton*. De uitdijing van het heelal wordt bepaald door de manier waarop het inflaton naar beneden rolt in de potentiaal.

De kosmische dynamica tijdens inflatie, zoals bepaald door de vorm van de potentiaal, kan worden achterhaald aan de hand van de *kosmische microgolf achtergrondstraling*. Deze straling geeft weer hoe het heelal er uitzag tijdens het *recombinatie*-proces waarbij protonen en elektronen stabiele, neutrale atomen vormden, dat zo'n 380 000 jaar na de oerknal heeft plaatsgevonden. Door het licht van de kosmische microgolf achtergrondstraling te detecteren met sattelieten zoals COBE, WMAP en sinds kort PLANCK, krijgen we een afbeelding van de structuur van het jonge heelal, zie figuur 3.

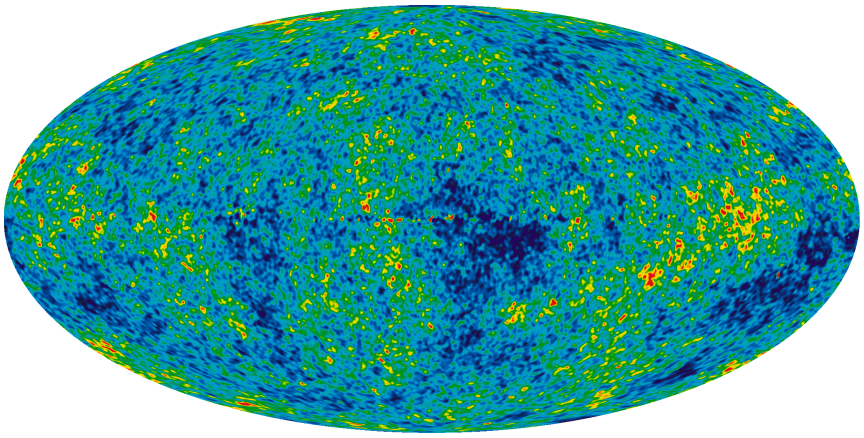


Figuur 1: *Een schematische weergave van de uitdijing van het heelal en structuurvorming gedurende de afgelopen 13,8 miljard jaar. Links in de afbeelding is de oerknal weergegeven. Vrijwel direct erna vindt inflatie plaats, een haast instantane, immense uitdijing van het heelal. Na 380 000 jaar vindt recombinatie plaats, weergegeven met de blauw/groene schijf (zie ook figuur 3), waarvan het licht gedetecteerd kan worden door een satteliet als WMAP (uiterst rechts op de afbeelding). In de periode na recombinatie vindt sterformatie plaats en dijt het heelal geleidelijk verder uit. Recentelijk is de uitdijing weer licht versneld.* Afbeelding afkomstig van NASA/WMAP Science Team.

Hoewel recombinatie veel later heeft plaatsgevonden dan inflatie, weten we hoe we de afdruk van de kosmische microgolf achtergrondstraling, d.w.z figuur 3, wiskundig kunnen terugleiden naar de periode van inflatie. Zo weten we uit het feit dat de temperatuur van de achtergrondstraling maar heel weinig over de ruimte varieert, dat de inflatie-potentiaal zeer vlak moet zijn voor een voldoende lange periode, waarbij inflatie moet hebben plaatsgevonden in een *langzame rol*, “slow-roll inflation”. Bij nauwkeurige meting van de microgolfstraling vinden we kleine variaties in de verder homogene temperatuursverdeling. De statistische eigenschappen van de temperatuurinhomogeniteiten kunnen worden vergeleken met de voorspellingen van inflatie en op die manier kunnen we verschillende scenario’s voor inflatie testen.



Figuur 2: *Inflatie wordt wiskundig beschreven door een potentiaal waarover het inflaton naar beneden rolt. Om in overeenstemming te zijn met de waarnemingen, moet de potentiaal zeer vlak zijn over een lange afstand.*



Figuur 3: *De kosmische microgolf achtergrondstraling heeft een vrijwel homogene temperatuur over de gehele hemel. Kleine temperatuurschommelingen, maximaal* $0,00003\,^{\circ}C$*, zijn zichtbaar en geven inzicht in de oorsprong van het heelal.* Afbeelding afkomstig van NASA/WMAP Science Team.

Het heelal als een vergrootglas

Om snaartheorie beter te kunnen begrijpen, moet de theorie experimenteel onderbouwd worden. Echter, snaartheoretische effecten zijn alleen relevant bij zeer hoge energieën, die maar liefst een biljard (1 000 000 000 000 000) keer zo hoog zijn als de energieën in een deeltjesversneller als de Large Hadron Collider van CERN. Dit gaat onze huidige technologische capaciteiten te boven, en eveneens die van de nabije (en verre) toekomst. Inflatie, op haar beurt, lijkt fenomenologisch weliswaar een goede

weergave te geven van de omstandigheden vlak na de oerknal, maar de oorsprong ervan blijft een mysterie. Voor een gedegen microscopische onderbouwing is het nodig dat inflatie beschreven kan worden binnen een fundamentele kwantumzwaartekrachttheorie.

In snaarkosmologie vormen deze twee problemen in principe elkaars oplossing. De omstandigheden waarin het heelal verkeerde tijdens inflatie waren dusdanig extreem dat kwantumzwaartekrachteffecten een rol hebben gespeeld. De mogelijke potentialen en ook de kandidaten voor het inflaton worden bepaald door snaartheorie, zoals ook andere aspecten van onze vier-dimensionale natuur daarin hun fundamentele beschrijving vinden. Via de statistische eigenschappen van de kosmische microgolf achtergrondstraling kunnen we achterhalen welke potentialen, d.w.z. welke scenario's voor inflatie, een natuurgetrouwe beschrijving geven. Inflatie en haar implicaties in de achtergrondstraling blijken sterk afhankelijk te zijn van de precieze microscopische, snaartheoretische beschrijving. Mits theoretisch begrip en observaties elkaar volledig aanvullen, vormt inflatie de ideale overgang van de zichtbare, hemeloverspannende structuren van de kosmos naar de kleinste, snaartheoretische schalen van de natuur.

Dit proefschrift

Het onderzoek in dit proefschrift draagt bij aan de zoektocht naar het fundamentele begrip van de natuur en van het begin van ons universum, door de snaartheoretische oorsprong van de oerknal te bestuderen. De titel *Conformal invariance and microscopic sensitivity in cosmic inflation*, wat zich laat vertalen als *Hoekgetrouwe invariantie en microscopische afhankelijkheid in kosmische inflatie*[2], verraadt dat we daarbij met name ingaan op de wijze waarop inflatie afhankelijk is van zijn microscopische, snaartheoretische beschrijving en de mate waarin hoekgetrouwe invariantie daarin een leidende rol speelt. Het onderzoek belicht een drietal onafhankelijke methoden om inflatie te beschrijven binnen de snaartheorie, welke in drie verschillende hoofdstukken gepresenteerd worden.

[2] De afbeelding op de voorkant van dit proefschrift verenigt verschillende belangrijke concepten in het onderzoek. Het stelt een snaar voor die afkomstig is uit de oerknal en die aldoende de hoekgetrouw invariante oorsprong van de oerknal onthult. Tegelijkertijd kan de afbeelding worden opgevat als het hoekgetrouwe wereldoppervlak van de snaartheoretische beschrijving van inflatie. De kleuren van de regenboog verwijzen naar het taalgebruik om microscopische afhankelijkheid in een theorie aan te duiden met "ultraviolet" en macroscopische verschijnselen met "infrarood". De uitdijing van inflatie laat de microscopische details van de snaar uitgroeien tot zichtbare verschijnselen aan de hemel en brengt daarmee de kleinste en grootste schalen van ons universum met elkaar in verband.

Inflatie en het standaard model

De uit de snaartheorie afkomstige beschrijving van onze vier-dimensionale natuur is onderhevig aan *supersymmetrie*, een (nog niet waargenomen) symmetrie tussen de elementaire bouwblokken van de natuur, die de theorie sterk beperkt. Omdat deze vier-dimensionale beschrijving zwaartekracht bevat, is het een voorbeeld van een *superzwaartekracht*theorie. In zo'n theorie heeft de inflatie-potentiaal een specifieke vorm, waarmee expliciete berekeningen mogelijk zijn.

In het algemeen zijn er meerdere kandidaten om als inflaton dienst te doen in een superzwaartekrachttheorie. De superzwaartekrachttheorie die volgt uit snaartheorie bevat bijvoorbeeld een volledige beschrijving van de hele natuur, waaronder zowel inflatie als het standaard model. Hierdoor is het onwaarschijnlijk dat inflatie voldoet aan de simpelste beschrijving van een één-dimensionale potentiaal zoals in figuur 2, waarin de bewegingsrichting van het inflaton maar in één richting is. In superzwaartekrachttheorieën met meerdere sectoren, bijvoorbeeld een inflatie-sector en een sector voor het standaard model, beschrijft de potentiaal een meer-dimensionaal landschap —zoals een sneeuwbal van een alpenhelling— en wordt de dynamica ingewikkelder. Echter, wanneer kosmologen zich richten op inflatie, is het vooralsnog te complex om alle informatie op te nemen in het model en daarom wordt het standaard model (voorlopig) buiten beschouwing gelaten in studies van inflatie. De vraag is of deze vereenvoudiging geoorloofd is en hoe realistisch het is dat de verwaarloosde bewegingsrichtingen niet bijdragen aan de dynamica.

In hoofdstuk 4 bekijken we de interactie tussen het standaard model en de inflatie-sector. We richten ons hierbij op het bestaan van langzame-rol inflatie. Al voor een één-dimensionaal inflatie-scenario in superzwaartekracht blijkt het erg lastig, maar wel mogelijk, om te voldoen aan de fenomenologische eis van langzame rol. Het is daarom allerminst vanzelfsprekend dat de daadwerkelijke, complexere beschrijving waarin het standaard model wél zou worden meegenomen, de langzame rol intact laat. Inderdaad is onze conclusie dat er in een beschrijving van standaard model-loze langzame-rol inflatie impliciete aannames zijn gemaakt over het standaard model. Wanneer niet is voldaan aan deze (sterke) aannames, wordt de daadwerkelijke, meer-dimensionale dynamica verstoord tot een niet-langzame rol. Hiermee tonen we aan dat inflatie zeer gevoelig is voor de microscopische details van de *gehele* snaartheoretische beschrijving, zowel de sector waarin men naïef verwacht dat inflatie plaatsvindt als de (onterecht) als irrelevant aangenomen onderdelen van de theorie zoals het standaard model of andere nog onbekende sectoren. Inflatie biedt hierdoor de mogelijkheid om tot de fundamentele kern van de microscopische beschrijving van de gehele natuur door te dringen.

Inflatie vanuit het wereldoppervlak

Zoals uit het voorgaande blijkt, is inflatie afhankelijk van de microscopische details van de gehele theorie. Aangezien we niet, en waarschijnlijk nooit, de volledige natuur kunnen doorgronden, is het in superzwaartekracht onhandig om afhankelijk te zijn van onbekende sectoren. Aan de andere kant opent inflatie de mogelijkheid om meer te weten te komen van de nu nog onbekende structuur van ons universum. Hiervoor is echter wel een formalisme nodig dat een gehele beschrijving van de natuur mogelijk maakt.

In hoofdstuk 5 gaan we daarom terug naar de basis van de snaartheoretische methode om de natuur te beschrijven, de twee-dimensionale wereldoppervlaktheorie. Dit is een hoekgetrouwe theorie, wiens hoekgetrouwe invariantie, zoals gezegd, aanleiding geeft tot de beschrijving van de vier-dimensionale ruimte waar de snaar doorheen beweegt. Het twee-dimensionale wereldoppervlak kan in principe elke (abstracte) hoekgetrouwe theorie zijn, maar aangezien we inflatie willen beschrijven, zal in ieder geval een deel van de twee-dimensionale theorie hiervoor verantwoordelijk moeten zijn. Het andere deel is onbekend, maar het hoekgetrouwe formalisme van het wereldoppervlak stelt ons in staat om de theorie globaal weer te geven in termen van slechts enkele (abstracte) parameters.

De beide delen van de wereldoppervlaktheorie hoeven afzonderlijk niet hoekgetrouw te zijn, zolang de totale theorie dat maar wel is. De wisselwerking tussen beide onderdelen van de theorie kan geanalyseerd worden door de symmetrie van de onbekende sector licht te breken. Het breken van de hoekgetrouwe invariantie van de onbekende sector heeft een reactie in de inflatie-sector tot gevolg om te voorkomen dat de hoekgetrouwe invariantie van de totale theorie verloren gaat. Deze reactie kan worden herkend als de bijdrage van de onbekende sector op de dynamica van inflatie in de vier-dimensionale ruimte. Door het resultaat te vergelijken met langzame-rol inflatie, kunnen we bepalen welke parameters van de onbekende sector, oftewel welk soort abstracte theorieën, mogelijk zijn voor een snaartheoretische beschrijving van langzame-rol inflatie.

De conclusie van deze studie is dat, wanneer men alleen wereldoppervlaktheorieën van vrije snaren in de analyse meeneemt, langzame-rol inflatie onmogelijk is, ongeacht welke theorie er in de onbekende sector beschreven wordt. Een consistente beschrijving van inflatie in de wereldoppervlaktheorie vereist dat men ook botsende snaren beschouwt. Dit is verrassend omdat inflatie een beschrijving is binnen de klassieke algemene relativiteitstheorie, welke reeds door vrije snaren beschreven kan worden. Aan de andere kant benadrukt dit resultaat, vanuit een ander oogpunt, iets dat we al wisten: inflatie is zeer afhankelijk van de microscopische details van de

kwantumzwaartekrachtbeschrijving.

Holografische inflatie

Omdat inflatie zo afhankelijk is van de microscopische details van de beschrijving, is een alternatieve aanpak nodig. In hoofdstuk 6 bestuderen we zo'n aanpak, op het niveau van de eigenschappen van de statistische variaties van de kosmische microgolf achtergrondstraling. De correlaties tussen koude en hete plekken in de achtergrondstraling kunnen worden berekend vanuit het inflatie-scenario. De gevonden uitdrukking vertoont een uitstekende overeenkomst met de waarnemingen —één van de redenen voor ons vertrouwen in dat inflatie een correcte beschrijving van het vroege heelal is—, maar deze berekening verzuimt te verhelderen waaróm het het specifieke antwoord is. Hierdoor blijft de structuur van inflatie een mysterie.

Eén van de bekende eigenschappen van inflatie is dat er een (licht gebroken) driedimensionale hoekgetrouwe symmetrie is op, voor inflatie, late tijden. In het bijzonder zouden de uitdrukkingen ten tijde van recombinatie, 380 000 jaar later, (vrijwel) invariant moeten zijn onder de hoekgetrouwe symmetrie van inflatie. Aangezien in elke hoekgetrouwe theorie de uitdrukkingen voor correlaties volledig kunnen worden bepaald door de symmetrie, is het interessant om te weten of en op welke manier dit ook geldt voor de correlaties die volgen uit de inflatie-berekening. Deze in hoofdstuk 6 gepresenteerde aanpak gaat in op de structuur van inflatie, op een manier die loodrecht staat op de twee eerder besproken methoden, omdat geen gebruik gemaakt wordt van de onbekende delen/sectoren in de theorie maar alleen de symmetrieën van het systeem als leidraad gebruikt worden.

We kunnen veel leren van de manier waarop de drie-dimensionale hoekgetrouwe symmetrie verpakt zit in de correlaties die volgen uit het vier-dimensionale inflatiemodel. Snaartheorie suggereert dat er een, veel algemenere, relatie moet zijn tussen elke zwaartekrachttheorie en een corresponderende theorie zonder zwaartekracht van één dimensie lager. Deze correspondentie wordt *holografie* genoemd, omdat net als in een hologram de d-dimensionale informatie van het systeem volledig opgeslagen kan worden op een $(d-1)$-dimensionaal "scherm". De holografische dualiteit is een ver reikend inzicht afkomstig uit snaartheorie, dat diep geworteld is in de microscopische, snaartheoretische beschrijving van de natuur. Slechts enkele (potentiële) realisaties van deze correspondentie zijn bekend. De bekendste is er evenwel een waarvan de zwaartekrachttheorie een sterke gelijkenis heeft met inflatie en de corresponderende lager dimensionale theorie hoekgetrouw is. In het licht van deze bekende holografische correspondentie bestuderen we de (licht gebroken) hoekgetrouwe symmetrie van de correlaties uit inflatie.

Uit het onderzoek komt naar voren dat de correlaties, d.w.z. de statistische eigenschappen van de fluctuaties in de achtergrondstraling, inderdaad voor een groot deel bepaald zijn door hoekgetrouwe symmetrie, hoewel het vooralsnog te vroeg is om te zeggen of de symmetrie (en de wijze waarop deze gebroken wordt in inflatie) voldoende is om de correlaties volledig te beschrijven. De variaties lijken de onderliggende hoekgetrouwe structuur van inflatie te onthullen, terwijl tegelijkertijd een beter begrip gecreëerd wordt van de holografische correspondentie, die raakt tot in de kern van snaartheorie.

Conclusie

De gevoeligheid van inflatie voor microscopische effecten is zowel een zegen als een vloek. Het is een zegen omdat we via de kosmische microgolf achtergrondstraling toegang hebben tot het onderzoeken van de kleinste schalen in de natuur. Het is een vloek, omdat de afhankelijkheid aanwezig is in heel de beschrijving van inflatie. Zowel in de superzwaartekracht- als in de wereldoppervlakbeschrijving blijkt het zeer lastig te zijn om een consistente microscopische beschrijving te geven van inflatie. Om de structuur van inflatie beter te begrijpen, hebben we ons daarom laten leiden door de hoekgetrouwe symmetrieën, op een manier die ingaat op de holografische oorsprong van inflatie. Als zodanig biedt dit proefschrift nieuwe inzichten in de oorsprong van ons heelal en de kleinste structuur van de natuur.