

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/38478> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Atal, Vicente

Title: On multifield inflation, adiabaticity and the speed of sound of the curvature perturbations

Issue Date: 2016-03-08

Samenvatting

Kosmologie van het vroege heelal

Zelfs de meest optimistisch ingestelde wetenschappers en filosofen uit het verleden zouden ons indrukwekkende model voor kosmologie niet voor mogelijk hebben gehouden. Het mag duidelijk zijn dat in alle takken van de natuurwetenschappen baanbrekende ontdekkingen zijn gedaan, maar het is in het bijzonder fascinerend dat we vandaag de dag zo ontzettend veel begrijpen over de kosmos. Het is immers verbluffend dat we iets kunnen leren over een systeem waar we zelf maar een miniscuul deel van uit maken. Om precies te zijn, het heelal is minstens 10^{26} keer groter en 10^8 keer ouder dan dat we zelf zijn¹⁷.

Volgens de algemene relativiteitstheorie wordt de geometrie van het heelal beïnvloed door de energiedichtheid van haar verschillende bestanddelen en vice versa. Deze wederzijdse connectie bepaalt de geschiedenis van het heelal en de tijdsevolutie van haar elementen. Als men de waarnemingen hiermee vergelijkt dan lijkt het erop dat het heelal zo'n 13.8×10^9 jaar geleden is ontstaan vanuit een singulariteit in de ruimtetijd. De geschiedenis van de ontwikkeling van dit theoretische model is natuurlijk langdurig en complex, maar de belangrijkste fundamenten zijn gelegd in de werken van Lemaître en Hubble, waarin voor het eerst is waargenomen dat sterrenstelsels van ons vandaan bewegen. De natuurlijke terughoudende reactie op de implicaties van zo'n model – namelijk een dynamisch heelal en een ruimtetijd singulariteit in het verleden – kon alleen overwonnen worden door de opeenstapeling van massa's overtuigende waarnemingen ondersteund door elegante wiskunde.

Uit het huidige kosmologische model blijkt verder dat het grootste gedeelte van de energiehuishouding uit twee onbekende elementen bestaat: de zogenaamde donkere materie en donkere energie. De lezer, gefascineerd door het feit dat we in staat zijn zo'n oud en enorm heelal te beschrijven, zal zich misschien bedonderd voelen, aangezien we eigenlijk vrij weinig weten over de microscopische eigenschappen van de belangrijkste componenten van het huidige heelal. De reden dat we “kennis binnen onzekerheid” kunnen hebben, komt doordat we slechts een paar getallen nodig hebben om de invloed van deze bestanddelen op de grootste schalen te kunnen beschrijven. Voorbeelden hiervan zijn de toestandsvergelijking (de relatie tussen druk en energiedichtheid) en de energiedichtheid van de betreffende componenten

¹⁷Als een man de maat is van alle dingen, zoals Protagoras zei, dan kunnen we figuurlijk zeggen: een man is zo groot als het heelal!

op de dag van vandaag. Deze vereenvoudiging is iets wat we dagelijks tegenkomen: we hoeven slechts een paar functionele eigenschappen van objecten om ons heen te weten om ze te kunnen gebruiken. Hoewel een oppervlakkige beschrijving van donkere energie en donkere materie goed genoeg blijkt om bepaalde kosmologische waarnemingen te kunnen verklaren, zal een meer diepgaand begrip van de onderliggende microscopische wetten zeker nodig zijn om een compleet en meer bevredigend model van de natuur te hebben.

De aanwezigheid van donkere energie en donkere materie zijn niet de enige onopgeloste mysteriën. Een ander raadsel van het standaard kosmologische model is de homogeniteit van de heelal, meer precies de waarneming dat *voldoende grote schalen* sterrenstelsels gelijkmatig verdeeld zijn over de ruimte¹⁸. Bovendien zijn zelfs de huidige inhomogene kleine regio's (dichtbevolkte clusters met sterrenstelsels versus lege ruimte zonder ook maar een spoor van materie) het resultaat van zeer kleine fluctuaties in een verder homogene begin toestand.

De mate van homogeniteit kan niet alleen worden afgeleid uit de huidige staat van het heelal, maar ook door naar de zogenaamde kosmische achtergrondstraling te kijken. Deze straling is een relikwie van het heelal en zo'n 380.000 jaar na de ruimtetijd 'singulariteit' uitgezonden. Dit komt overeen met 0.001% van de huidige leeftijd van het heelal, en kan daarom gezien worden als een baby foto. De kosmische achtergrondstraling, ook wel de CMB genaamd, is inderdaad één zeer homogene zee van straling (beschreven door één enkele temperatuur), met kleine variaties in de temperatuur van de orde 0.001%.

De homogeniteit van het waarneembare heelal, samen met zijn eindige leeftijd, is een probleem voor kosmologen omdat het een van de belangrijkste principes in natuurkunde schendt, causaliteit. Licht, wat met de hoogste snelheid dat fysisch toegestaan is reist, kan slecht een eindige afstand reizen sinds het ontstaan van het heelal. Dit betekent dat elke waarnemer in het heelal slechts in causaal contact staat met een deel van zijn gehele omgeving. Nu we zien dat de temperatuur van de CMB van alle verschillende plekken van het waarneembare heelal gelijk is, verwachten we dat al deze delen in causaal contact met elkaar geweest moeten zijn. Het probleem is nu dat het huidige kosmologische model voorspelt dat de causale regio's ten tijde van de CMB zeer klein waren¹⁹. Hoe kan het dat al deze

¹⁸Deze *groot genoeg schalen* zijn de schalen die we moeten bestuderen in kosmologie, aangezien ze niet worden beïnvloed door de omgevende lokale krachten (zoals de gravitationele aantrekking tussen sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels) en daarom volgen ze de grootschalige stroming in de ruimtetijd

¹⁹De voorspelde causale regio's hebben een hoekgrootte gelijk aan die van de maan nu

losstaande delen toch precies dezelfde temperatuur hebben, ondanks het feit dat ze nooit informatie hebben kunnen uitwisselen?

In dit proefschrift worden enkele aspecten behandeld van de favoriete oplossing van dit raadsel, het idee van kosmische inflatie. Deze theorie zegt dat het heelal, toen het nog heel jong was, bijna exponentieel snel is uitgezet. Deze eerste explosie van exponentiële expansie maakt dat het heelal voortkomt uit een zeer klein oerstukje waarin alles in causaal contact was voordat de inflatie inzette. Dit lost het homogeniteitsprobleem op. Wat zeer indrukwekkend is, is dat een periode van inflatie niet alleen het heelal homogeen maakt, maar ook kleine dichtheidsvariaties en tensorfluctuaties²⁰ genereert. Aangezien de dichtheidsfluctuaties de zaadjes zijn van de huidige inhomogeniteiten, voorziet de theorie van inflatie ons met een mechanisme dat alles heeft gecreëerd wat we om ons heen zien.

Een geïdealiseerde geschiedenis van de expansie van het heelal is slechts de eerste stap naar de verwezelijking van een levensvatbaar kosmologisch model. We moeten daarnaast ook een verklaring hebben waarom het heelal op deze manier is geëvolueerd. Zoals we al eerder hebben aangegeven, hangt de dynamische ontwikkeling van het universum – d.w.z. of deze uitdijt, krimpt of statisch is – van zijn energie bestanddelen af. Hieruit blijkt dat voor een beginperiode van inflatie, een onbekend ‘materie’ veld nodig is. Dit hypothetische veld wordt het inflaton genoemd.

In de natuurkunde blijkt het handig te zijn om velden te classificeren overeenkomstig hun symmetrieën. Eén mogelijkheid om ze te classificeren is gerelateerd aan de manier waarop ze veranderen als we een rotatie van de ruimtetijd coördinaten uitvoeren. Deze classificatie is erg belangrijk, aangezien de symmetrieën van een veld de structuur van zijn bewegingsvergelijkingen bepaalt. De meest simpele velden die inflatie kunnen teweeg brengen zijn *scalair* velden, welke invariant zijn onder ruimtetijd rotaties²¹. Ondanks het vermoeden dat het inflaton een scalair veld is, maakt dit het nog geen bevredigend model, aangezien dit veld misschien in de natuur niet bestaat! Of het inflaton wel of niet bestaat weten we niet aangezien de juiste beschrijving van de elementaire deeltjes op de energieschaal van het inflaton onbekend is. Het standaard model voor elementaire deeltjes is tot aan de TeV energieschaal gemeten (bij het LHC experiment), maar inflatie zou plaats gevonden hebben op een energieschaal die 10^{13} maal hoger is. Elke theorie hoe de natuurkunde van de elementaire deeltjes werkt op die energieschaal

²⁰Tensorfluctuaties komen overeen met gravitatiegolven.

²¹Een voorbeeld van een scalair veld is het recentelijk ontdekte Higgs veld

is speculatief. Gelukkig houden we ervan te speculeren in de natuurkunde. Idealiter doen we dit volgens de ideeën welke de juiste basisprincipes zijn gebleken om natuurkundige verschijnselen te verklaren. Zoals al eerder genoemd is één van die principes symmetrie. In het bijzonder zien we deeltjes en krachten als representaties van bepaalde symmetrieën. Volgens dit abstracte principe zijn natuurkundigen erin geslaagd om nieuwe deeltjes te voorspellen, welke vervolgens in het lab gemeten zijn. Bovendien is gebleken dat schijnbaar verschillende fenomenen gevolg zijn van dezelfde symmetrie groep.

Dit zou het mogelijk kunnen maken dat alle interacties tussen deeltjes op een meer fundamenteel niveau beschreven kunnen worden door één enkele symmetrie groep. Dit kan belangrijk zijn voor de theorie van inflatie, aangezien één van de eigenschappen van alle ‘unificatie’ modellen is dat ze deeltjes voorspellen op een hoge energieschaal. Dit is precies wat nodig is voor inflatie, aangezien het inflaton waarschijnlijk een deeltje is wat op een hogere energieschaal leeft²². Als we dit idee wat beter bekijken, zien we wel dat dit geen gemakkelijke opgave is.

Aan de ene kant vertelt de statistiek van het CMB ons dat inflatie, als het plaatsgevonden heeft, gedomineerd zou moeten zijn door één enkel veld. Aan de andere kant voorspellen fundamentele theorieën (die, die deeltjes uit symmetrieën voorspellen) héél veel velden. Deze twee voorstellingen zijn met elkaar te verenigen als het spectrum van een theorie met meerdere velden aan specifieke eigenschappen voldoet. Als één veld licht is en de rest heel zwaar²³, dan is de theorie met meerdere velden effectief te reduceren tot een theorie met één enkel, licht deeltje.

De reden dat het mogelijk is om een effectieve theorie te construeren is dat de natuur beschreven kan worden op verschillende niveaus. Op verschillende lengteschalen (ofwel energieschalen) kunnen de vrijheidsgraden, die nodig zijn om het systeem te beschrijven, anders zijn. Een voorbeeld is dat een waterstroompje op grote schalen gezien kan worden als een vloeistof met bepaalde eigenschappen

²²Een mogelijke unificatie van de fundamentele krachten is slechts één van de mogelijke motivaties om het bestaan van nieuwe deeltjes op hogere energieën te beschouwen. Men kan ook meer agnostisch zijn aangezien inflatie niet alle ingredienten van unificatie nodig heeft om mogelijk te zijn. Het Higgs veld kan bijvoorbeeld ook de rol van het inflaton spelen (waarbij wel een extra koppeling tussen het Higgs veld en de zwaartekracht nodig is). Of natuurkundigen zich meer aangetrokken voelen tot een minimaal model waarbij slechts een nieuwe interactie nodig is in het standaard model van de elementaire deeltjes (zoals in Higgs inflatie), of geïnspireerd zijn door een meer ingewikkelde unificatie theorie (die het voordeel hebben om andere open vragen op te lossen), zullen we vanaf nu beschouwen als een eigen voorkeur.

²³Met licht/zwaar bedoelen we deeltjes met massa's veel lichter/zwaarder dan de energieschaal van inflatie (welke gerelateerd is aan de expansie snelheid op dat moment). We kunnen massa en energie met elkaar vergelijken aangezien ze aan elkaar gerelateerd zijn door de beroemde formule van Einstein $E = mc^2$.

zoals dichtheid en viscositeit. Maar als we naar het stroompje kijken op microscopische schaal, dan hebben we moleculen nodig die met elkaar wisselwerken met elektrische krachten. Beide beschrijven hetzelfde systeem, maar op verschillende schalen.

Het belangrijke punt is dat we de microscopische details niet nodig hebben om het systeem te kunnen bestuderen op macroscopische lengteschalen. De macroscopische eigenschappen kunnen immers gemeten worden op dezelfde schaal. In de natuurkunde wordt dit fenomeen *loskoppeling* genoemd, en de systematische manier om dit aan te pakken geeft een raamwerk waarin veel problemen binnen de moderne natuurkunde worden benaderd. Gelukkig maar, nu hoeven we immers niet de natuurkunde van elementaire deeltjes te begrijpen om water te kunnen bestuderen!

Vanuit een ander oogpunt gezien, dit is precies wat ons ervan weerhouden heeft om een succesvol model te vinden voor alle fundamentele krachten. We kunnen niet zomaar versnellers bouwen die de hoogste energieschalen meten. Vandaag de dag kunnen de deeltjesversnellers slechts 0.0000000001% van alle energieschalen meten die we zouden willen meten. Oftewel we hebben herontdekt wat Heraclitus meer dan 2000 jaar geleden heeft gezegd: “De natuur houdt ervan om zich te verstoppen”.

Ondanks dat de natuur zich graag verstoppt, laat het daarbij toch wat sporen na. Namelijk alle macroscopische eigenschappen van een systeem, bijvoorbeeld de viscositeit van water, zijn in principe af te leiden uit de microscopische details. Om de connectie tussen de kleine en de grote schalen te maken, zal lastig zijn, maar als het ons lukt dan kunnen we toch wat leren over de microscopische details door naar de macroscopische eigenschappen te kijken. Dit heeft fantastische gevolgen, namelijk dat we nog steeds iets zouden kunnen leren over fundamentele natuurkunde zonder deeltjesversnellers die deze energieën direct meten.

Terug naar inflatie. We hebben gezegd dat we een effectieve beschrijving kunnen afleiden in het geval dat er naast het inflaton veld nog meerdere zware deeltjes zijn. Wat zijn de gevolgen van deze zware deeltjes in de ‘macroscopische’ beschrijving van inflatie? Dit is precies het onderwerp van mijn proefschrift.

Dit proefschrift

In dit proefschrift hebben we een mogelijkheid bekeken waarin de extra en zeer zware velden een verandering aan kunnen brengen op de ‘propagatie snelheid’ van

de inflaton dichtheidsgolven (vanaf nu de geluidssnelheid genoemd). Dit is een voorbeeld waarbij we de macroscopische variabele (oftewel de geluidssnelheid van de inflaton perturbaties) kunnen relateren aan de microscopische details van de theorie (oftewel de aanwezigheid van de massieve velden).

Aangezien de fluctuaties in het inflaton veld een bron zijn voor de temperatuur variaties in de CMB, kan de geluidssnelheid van de inflaton fluctuaties belangrijke gevolgen hebben voor de statistische eigenschappen van de CMB. Deze effecten hangen af van de tijdsafhankelijkheid van de geluidssnelheid. In dit proefschrift hebben we de gevallen bekeken dat de geluidssnelheid langzaam varieert en snel varieert. Het eerste geval, waarin de geluidssnelheid langzaam varieert, is makkelijk te analyseren. Er zijn geen nieuwe wiskundige of statistische instrumenten nodig om de voorspellingen te maken en te vergelijken met waarnemingen. We moeten er wel bijzeggen dat of de hoog energetische vrijheidsgraden wel of niet een spoor achterlaten in de beschrijving van laag-energetische fenomenen sterk afhangt van hoe de velden met elkaar gekoppeld zijn, waarvoor a priori geen voorkeur bestaat. In dit proefschrift laten we zien dat een klasse van interacties die tot ‘spiraalvormige’ banen in de veldenruimte leidt, meetbare effecten kan veroorzaken. Deze modellen zijn de inspiratie voor de omslag van dit proefschrift.

Het tweede gedeelte van het proefschrift gaat over de studie van een snel variërende geluidssnelheid. In dit geval hebben we meer geavanceerde technieken nodig om de voorspellingen te doen aangezien we geen benaderingen kunnen doen gebaseerd op langzaam variërende variabelen. Om te zien of zulke modellen in overeenstemming zijn met de data moeten we een directe en geavanceerde vergelijking doen met de ruimtelijke verdeling van de CMB. We doen een analyse gebaseerd op het feit dat, in modellen met een lagere geluidssnelheid, er een specifieke correlatie is tussen de twee- en driepuntsfunctie²⁴. Ondanks het feit dat we een hint van zo’n correlatie vinden in de Planck 2013 data van de CMB, lijkt deze correlatie te verdwijnen in de meest recente data (van 2015), een meer geavanceerder analyse van de nieuwe data is nodig, welke we in de toekomst plannen te doen.

Het laatste hoofdstuk van dit proefschrift gaat over de voorspellingen van het zogenaamde ‘natural model’ voor inflatie. Zoals eerder vermeld, om inflatie te laten plaatsvinden, hebben we een licht veld nodig. Alleen kunnen we niet gewoon zeggen dat het zo is en het hierbij laten. Een van de belangrijkste lessen die we geleerd hebben in de moderne natuurkunde is dat de massa’s en ladingen van

²⁴Dit zijn grootheden die de correlaties tussen inflaton perturbaties meten tussen twee of drie punten in de ruimte. Deze grootheden zijn in het bijzonder handig om de statistische eigenschappen van een kaart te beschrijven.

velden niet constant zijn, maar gecorrigeerd worden door quantum effecten van alle deeltjes in de theorie inclusief henzelf. In het geval van inflatie zou het kunnen zijn dat dit de massa van het inflaton veld naar boven drijft waardoor inflatie niet meer kan plaatsvinden. Dit is inderdaad het geval voor een klasse van inflatie modellen, de zogenaamde ‘large-field’ modellen²⁵. De large-field modellen zijn aantrekkelijk aangezien ze veel zwaartekrachtsgolven produceren. De detectie hiervan zou erg belangrijk kunnen zijn om de details van inflatie te begrijpen of om de theorie van inflatie juist onder druk te zetten. Helaas weten we dus niet hoe we deze klasse van modellen op een consistente manier kunnen beschrijven.

Eén van de weinige modellen voor large-field inflatie die deze problemen niet heeft, is ‘natural inflation’. In dit geval is er een symmetrie die de massa van het inflaton veld beschermt. Dit refereert naar de algemene situatie waarin een model voor inflatie meer symmetrieën respecteert als we een versie bekijken waarin het inflaton massaloos is. In dit geval kan men aantonen dat de massa niet gevaarlijk hoge waarden aanneemt. Dit scenario klinkt erg aantrekkelijk als fundamentele theorie, maar helaas is het in strijd met de waarnemingen van de CMB. Deze theorie voorspelt namelijk een verhouding van dichtheidsfluctuaties tot tensorfluctuaties welke te hoog is, en ook een spectrum wat te ‘rood’ is (dit betekent dat de amplitude van de tweepuntsrelatie te hoog is op grote schalen vergeleken met de kleine schalen). In het laatste hoofdstuk herzien we de voorspellingen van natural inflation. In tegenstelling tot het originele model waarin slechts één veld de drijvende kracht is, bekijken we nu een geval waarin er nog een extra veld is waardoor de voorspellingen inderdaad consistent zijn met de waarnemingen.

Conclusies

In dit proefschrift laten we enkele aspecten zien van de kosmologie van het vroege heelal. Onze motivatie is niet alleen de algehele evolutie van het universum te begrijpen maar ook het spectrum van deeltjes en krachten op energieschalen die vandaag onmogelijk zijn om te meten. In het bijzonder laten we zien hoe waarnemingen van de kosmos nieuwe deeltjes aan het licht kan brengen. Wanneer we zulke deeltjes ontdekken zal er een nieuwe deur open gaan om een verborgen sector van de deeltjesfysica te bestuderen. De bijbehorende gevolgen zullen enorm zijn voor het oplossen van vele open vragen binnen de moderne natuurkunde.

²⁵Dit zijn modellen waarin het inflaton een grote afstand aflegt in de veldenruimte. Dit betekent dat het verschil van de begin en eindwaarde van het veld van dezelfde orde van grootte van de Plank massa is.

