

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/67091> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Welling, Y.M.

Title: Spectroscopy of two-field Inflation

Issue Date: 2018-11-27

Samenvatting

Ik heb enorme mazzel dat ik natuurkundige ben, want puzzelen is één van mijn favoriete bezigheden. Samen met mijn kosmollega's bewandelen we duizenden wegen om een nieuw inzicht te vinden en soms is het raak. Dit is één van de meest vervullende gevoelens die ik ken, nog beter dan de kick die je krijgt als je drie uur lang een berg opfietst.

Uiteindelijk doen we dit werk natuurlijk ook om bij te dragen aan de Grote Speurtocht naar kennis en begrip van de bouwstenen waaruit wij en alles om ons heen zijn opgebouwd. Wie weet kan één van onze inzichten ooit gebruikt worden voor een grote stap voorwaarts in ons begrip van de fundamentele natuurkunde. Dat zou fantastisch zijn. Maar goed, voordat het zover is, moeten we eerst nog een hoop mini-puzzels oplossen. Verderop zal ik bespreken aan welke puzzels ik heb gewerkt.

Voordat ik dat doe, wil ik een gedachte delen die voor mij nog steeds verbluffend is: we gebruiken het allergrootste, de kosmos of het heelal waarvan de omvang nauwelijks te bevatten is, om iets te weten te komen over het allerkleinste, de elementaire deeltjes. We zijn in staat waarnemingen op kosmische schaal te relateren aan de deeltjessoep van het heelal, toen het nog jonger dan een miljardste van een miljardste van een miljardste seconde oud was. Best indrukwekkend!

Waar we nu staan is het resultaat van eeuwenlange inspanningen van sterrenkundigen, kosmologen, en theoretische natuurkundigen. Een zeer recente ontdekking is het bestaan van zwaartekrachtsgolven. Die kunnen we waarnemen wanneer twee zware objecten (veel zwaarder dan de aarde) met elkaar versmelten en een enorme hoeveelheid energie uitstoten. Tijdens de laatste fase van de versmelting is de zwaartekracht zo sterk dat we dit experiment onmogelijk kunnen nabootsen in een aards laboratorium. De kosmos leert ons zo meer over het gedrag van materie en krachten in extreme omstandigheden. Wij kunnen vervolgens onze fundamentele deeltjestheorieën hieraan toetsen

om tot een betere beschrijving te komen. Eenzelfde idee geldt voor de theorie van inflatie, waarmee ik me voornamelijk heb beziggehouden tijdens mijn promotieonderzoek. Hier ga ik verder op in op het einde van deze samenvatting, nadat ik eerst een paar belangrijke ideeën zal schetsen die aan mijn onderzoeksgebied ten grondslag liggen.

Inflatie

Waar komen we vandaan? Leven we op een speciale plek? Ik gok dat iedereen weleens op de één of andere manier over deze filosofische kwesties heeft nagedacht. In de kosmologie worden dit soort vragen ook gesteld, maar om een eenduidig antwoord te krijgen, moeten we deze filosofische gedachten eerst in een toetsbaar vraagstuk omzetten. We kunnen bijvoorbeeld de tweede vraag formuleren als: is het *Kosmologische Principe* correct? Het Kosmologische Principe zegt dat het heelal statistisch gezien homogeen en isotroop is op grote schaal. Dit betekent niet alleen dat wij niet op een speciale plek leven, maar ook dat er überhaupt geen speciale plekken bestaan in het heelal. Sinds Copernicus weten we dat de aarde niet het centrum van ons zonnestelsel is, en dat de zon meebeweegt met de ‘dans der sterren’. In hoeverre kunnen we het Kosmologische Principe verder testen? Gemeten kan worden (en is) hoeveel sterrenstelsels zich om ons heen bevinden en hoe ver die van ons verwijderd zijn. Het blijkt dat statistisch gezien de verdeling van waargenomen sterrenstelsels op grote schaal uniform is. Hiermee voldoet ons waarneembare heelal aan het Kosmologische Principe. Wat dat betreft leven we dus niet op een speciale plek, en buitenaards leven evenmin.

Het Kosmologische Principe is één van de belangrijkste hoekstenen van de kosmologie, omdat we hiermee experimenten kunnen herhalen door het waarneembare heelal op te delen in kleinere stukken. We gaan er bijvoorbeeld vanuit dat de onderlinge locaties van sterrenstelsels een bepaalde kansverdeling volgen. In ons heelal zijn de locaties van sterrenstelsels vastgelegd, en daarom vormt het heelal slechts één realisatie van die kansverdeling. Volgens het Kosmologische Principe kunnen we het heelal echter opdelen in kleinere delen die allemaal een betrouwbare steekproef bieden van dezelfde onderliggende kansverdeling. Het heelal fungeert daarom als een laboratorium waarin we metingen op diverse locaties kunnen opvatten als een ensemble van realisaties van (sub)heelallen.

Een ander vraagstuk dat een belangrijke rol heeft gespeeld in de ontwikkeling van de kosmologie is of het heelal krimpt, even groot blijft, of uitdijt.

We zouden ons het heelal voor kunnen stellen als een ballon met daarop vastgeplakte stukjes papier: de sterrenstelsels. Aangenomen dat de sterrenstelsels zichzelf niet over de ballon verplaatsen, wordt de afstand tussen hen groter of kleiner als je de ballon verder opblaast of juist een beetje leeg laat lopen. Als ons melkwegstelsel één van die papiertjes is, dan zien we de andere sterrenstelsels dus allemaal van ons vandaan bewegen of allemaal op ons afkomen. Om de snelheid van de verwegelegen sterrenstelsels in onze kijkrichting te bepalen, maken astronomen gebruik van het verschijnsel *kosmische roodverschuiving*. Net zoals de verandering in de toonhoogte die je hoort als er een ambulance voorbij scheurt (Doppler effect), verschuift de waargenomen kleur van een sterrenstelsel naar het rood als het heelal uitzet, danwel naar het blauw als het heelal inkrimpt. Het gevolg van de rood(blauw)verschuiving is een af(toe)name in de helderheid van het sterrenstelsel.

Zonder de meting te doen, hebben we al een aanwijzing voor het juiste antwoord op de vraag of de grootte van het heelal verandert. Laten we aannemen dat het heelal ontzettend groot is en lang genoeg bestaat, en dat alle sterren uniform verdeeld zijn over het heelal. Als er dan geen roodverschuiving plaatsvindt, is er in elke kijkrichting wel een ster te vinden met min of meer dezelfde helderheid. Oftewel, we hebben geen verschil tussen dag en nacht (en we verbranden allemaal, maar dat terzijde.) Dit is de paradox van Olbers. Een voor de hand liggende oplossing is dat het heelal uitzet, en er dus kosmische roodverschuiving plaatsvindt, waardoor de helderheden van sterren afnemen met de afstand. Een andere mogelijke uitweg is dat het heelal nog maar kort bestaat en we nog niet al het licht van ver verwijderde sterren hebben kunnen ontvangen. Inmiddels hebben astronomen de kosmische roodverschuiving van miljoenen sterrenstelsels waargenomen, en daarmee is de uitdijning van het heelal een feit.

Stel dat we teruggaan in de tijd zodat het heelal juist inkrimpt. Er treedt dan blauwverschuiving op van alle straling. Oftewel, hoe jonger het heelal is, des te dichter en heter het is. Bij temperaturen hoger dan zo'n $3000K$ is het te heet voor de elektronen om zich te binden aan de atoomkernen. Licht (fotonen) gaat dan voortdurend interacties aan met de vrije elektronen. Het vroege universum was een ondoorzichtige soep van deeltjes tot op het moment dat neutraal waterstof gevormd kon worden en het licht overal in de ruimte vrij kon reizen. Uit deze gedachtengang voorspelden Alpher en Hermann dat we nu nog steeds een gloed zouden moeten zien van het moment dat het heelal doorzichtig werd. De temperatuur was toen $3000K$, ongeveer de helft van de oppervlaktetemperatuur van de zon. Inmiddels is het heelal zo'n duizendmaal

groter¹⁴ en kouder geworden en zouden we nu van alle kanten straling moeten ontvangen met een temperatuur van ongeveer $3K$. Deze straling is inderdaad in 1965 door Penzias en Wilson voor het eerst waargenomen en staat nu bekend als de *kosmische achtergrondstraling*.

De kosmische achtergrondstraling is in feite een babyfoto van het heelal. Het heelal was toen nog maar 380.000 jaar oud, slechts een fractie van zijn huidige leeftijd van 13,8 miljard jaar. Rond die tijd waren er nog geen moleculen, laat staan sterrenstelsels. Nog verder terug in de tijd, toen het heelal nog maar een seconde oud was en een temperatuur had van tien miljard Kelvin, waren er de perfecte omstandigheden om een aantal lichte, chemische isotopen (onder andere van waterstof en helium) te vormen, de *nucleosynthese*. De verhouding waarmee de verschillende isotopen volgens berekeningen van Gamow gevormd konden worden, klopt zeer goed met de huidige verdeling in de sterrenstelsels. De ontdekking van de kosmische achtergrondstraling en de juiste voorspelling van de nucleosynthese waren een grote triomf voor de zogenaamde *hete oerknaltheorie*.

Maar met de nauwkeurigere meting van de kosmische achtergrondstraling kwam er iets gekks aan het licht: de temperatuur van de straling is wel héél uniform verdeeld! Ten tijde van het doorzichtig worden was het heelal nog zo jong dat er zo'n duizend delen aan te wijzen waren die niet met elkaar in causaal contact stonden. Dat wil zeggen dat die delen vanwege onderlinge afstand en de eindigheid van de lichtsnelheid nooit via uitwisseling van hitte een thermisch evenwicht konden bereiken. Hoe kan het dan dat deze delen allemaal ongeveer even heet blijken te zijn geweest? Simpelweg aannemen dat de begincondities van alle afzonderlijke delen van het heelal nou eenmaal hetzelfde waren, is niet echt bevredigend. Als wetenschappers zoeken we liever naar een verklaring. Uiteindelijk stelde Guth voor dat het vroege heelal een periode van exponentieel snelle uitdijning heeft gekend, een periode van *inflatie*. Hiermee faalt de eerdere berekening van de grootte van de causale delen, ze zijn namelijk exponentieel groter. Het heelal dat we nu kunnen zien bevindt zich in één opgeblazen deel.

De vraag is nu wat voor een soort materie we nodig hebben om inflatie op gang te brengen. Kunnen we misschien materie gebruiken die we al kennen vanuit de deeltjesfysica? Of spelen nog onbekende deeltjes een rol? De energieën van deeltjes in het vroege heelal liggen ver voorbij het bereik van deeltjesversnellers zoals de LHC van CERN. Inflatie biedt een enorme kans om

¹⁴Preciezer gezegd is het heelal duizendmaal groter geworden in elke ruimtelijke richting, dus het volume is met een factor miljard gegroeid.

nieuwe deeltjes te ontdekken en hun gedrag te beschrijven en daarmee meer kennis over de fundamentele natuurkunde te vergaren!

De onbekende materie die inflatie veroorzaakt, noemen we de *inflaton*. De inflaton fungeert als een klok, bij elke slag van de wijzer verdubbelt het heelal in grootte. Dit gaat door tot het einde van inflatie. Vanwege kwantumeffecten is er een kleine onzekerheid in de klok waardoor sommige delen van het heelal iets later en andere delen juist iets eerder de periode van inflatie verlaten. Dit resulteert in minuscule dichtheidsvariaties van materie in het heelal. Door de zwaartekracht bundelen deze kleine materiehoopjes zich tot alsmaar grotere structuren, en vormen uiteindelijk de sterrenstelsels en het netwerk van donkere materie daaromheen. Inflatie creëert dus de zaadjes van alles wat we om ons heen zien! Omdat de vorming van deze zaadjes een kansproces is dat de wetten van de kwantummechanica volgt, kunnen we alleen statistische voorspellingen maken. Gegeven de eigenschappen van de inflaton, kunnen we bijvoorbeeld de verdeling van sterrenstelsels voorspellen. Inflatie voorspelt verder ook kleine temperatuurvariaties in de kosmische achtergrondstraling van éénduizendste procent. Deze zijn inmiddels met grote precisie vastgelegd en de voorspelde eigenschappen van de bijbehorende kansverdeling zijn ook daadwerkelijk waargenomen. De volgende hint waar iedereen op hoopt zijn kleine afwijkingen in de kansverdeling die ons iets kunnen vertellen over de gedetailleerde eigenschappen van de inflaton en zijn interactie met andere deeltjes.

Zo zie je dus dat het heelal op de allergrootste schaal (verdeling van sterrenstelsels en kosmische achtergrondstraling) informatie bevat over de periode van inflatie, en daarmee gekoppeld is aan de allerkleinste schaal (elementaire deeltjes).

Dit proefschrift

Tijdens mijn promotieonderzoek heb ik nagedacht over inflatiemodellen waarin de inflaton interacties aangaat met een ander deeltje zonder spin. Dit is gemotiveerd vanuit de snaartheorie, die de aanwezigheid van veel van dat soort deeltjes voorspelt. De uiteindelijke voorspellingen hangen onder andere af van de massa van het nieuwe deeltje en de koppelingsconstante tussen de inflaton en het nieuwe deeltje. Theoretisch gezien is een belangrijke vraag of je met typische ingrediënten uit de snaartheorie een werkend model voor inflatie krijgt, en of bovendien de voorspellingen overeenstemmen met de waarnemingen tot nu toe. Aan de andere kant is het voor een experimentalist interessanter om te bepalen welke observabelen ons mogelijk iets kunnen vertellen over de aan-

wezigheid, en zo ja, de massa en koppelingsconstante van nieuwe deeltjes. In dit proefschrift heb ik me met beide vraagstukken beziggehouden.

Exacte modellen

In Hoofdstuk 2 en 3 construeren we inflatiemodellen waarin we de koppelingsconstante en massa van het nieuwe deeltje precies kunnen kiezen zoals we willen. In inflatie is dit niet op een heel eenvoudige manier te realiseren, en naar ons weten is dit nooit eerder gedaan.

Allereerst levert dit nieuwe inzichten op over ‘toegestane structuren’ in het deeltjesmodel van inflatie. In het bijzonder blijkt de combinatie kleine massa en grote koppelingsconstante (efficiënte overdracht van energie) ook compatibel met de waarnemingen. Dit opent mogelijk nieuwe wegen om inflatie te beschrijven in snaartheorie. We laten zien welke vorm van de ‘potentiaal’ nodig is om de juiste combinatie van parameters te garanderen. Als snaartheoretici een model vinden dat hierop lijkt, dan weten we of de voorspellingen consistent zijn met de data. Ten tweede kunnen we met deze exacte modellen onze analytische voorspellingen toetsen, aangezien we het model nu ook in kunnen voeren in de computer. We vinden dat de massa bepaalt hoe de ‘spectrale richtingscoëfficiënt’ afhangt van de koppelingsconstante als de energieoverdracht voldoende efficiënt is. Deze observabele zou daarom kunnen helpen om de massa van het andere deeltje te bepalen.

Universaliteit door hyperbolische kromming

In hoofdstuk 4 bestuderen we het effect van een veelvoorkomend element uit de snaartheorie, namelijk een hyperbolisch gekromde veldenruimte. Het komt erop neer dat hoe vroeger we ons in de periode van inflatie bevinden, des te meer de beweging van de deeltjes geremd wordt.

We vinden dat deze remming zowel de koppelingsconstante als de massa van het andere deeltje beïnvloedt en dat de voorspellingen niet meer afhangen van de vorm van de potentiaal. Er treedt universeel gedrag op zolang de hyperbolische kromming sterk genoeg is. Een hyperbolisch gekromde veldenruimte zou daarom een belangrijke rol kunnen spelen in het realiseren van inflatie binnen de snaartheorie.

Zware deeltjes

In Hoofdstuk 5 illustreren we de impact van zware deeltjes als ze interacties aangaan met de inflaton met een simpele aanpassing van drie inflatiemodellen. Het belangrijkste waarneembare effect is dat de 'tensor-to-scalar-ratio' kleiner wordt.

Driehoeksmetingen

Ten slotte onderzoeken we in Hoofdstuk 6 of we bepaalde interacties van de inflaton met een ander deeltje kunnen meten in de volgende generatie experimenten die sterrenstelsels in kaart brengen. Deze experimenten noemen we ook wel surveys van het kosmische web. Het blijkt dat, vanaf een bepaalde grootte van de massa van het andere deeltje, sterrenstelsels een voorkeur hebben om patronen te vormen die opgebouwd zijn uit gelijkzijdige driehoeken. Bij kleine massa van het andere deeltje, zullen ze juist gelijkbenige driehoeken willen vormen waarbij de derde zijde vele malen korter is dan de gelijke zijden. Door hier een statistische analyse op los te laten kunnen we zien hoe goed dit te onderscheiden is van de driehoeken die de zwaartekracht zelf al neigt te vormen tijdens het formatieproces van alle structuren op kosmische schalen. Dit resulteert uiteindelijk in een verwachting van de grootte van de foutenmarges die we met de foutenmarges van de kosmische achtergrondstraling kunnen vergelijken.

We vinden dat het type interactie dat geassocieerd is met gelijkzijdige driehoeken nauwkeuriger bepaald kan worden met behulp van de kosmische achtergrondstraling dan met de verdeling van sterrenstelsels. De volgende generatie surveys van het kosmische web zal helaas de huidige foutenmarges niet kunnen verkleinen. De mate waarin we het andere type interactie kunnen bepalen is veelbelovend, maar zal uiteindelijk met een andere techniek makkelijker gemeten kunnen worden. In een voorgaand onderzoek hebben we een theoretische methode van het formatieproces van grote structuren verder ontwikkeld. In dit hoofdstuk laten we verder zien dat deze methode de foutenmarges met een factor drie vermindert.