



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Higgs dynamics in the early universe

Vis, J.M. van de

Citation

Vis, J. M. van de. (2019, July 2). *Higgs dynamics in the early universe*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/74691>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/74691>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/74691> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Vis, J.M. van de

Title: Higgs dynamics in the early universe

Issue Date: 2019-07-02

Samenvatting

Dit proefschrift gaat over deeltjesfysica en kosmologie. Deeltjesfysica is de wetenschap van de allerkleinste deeltjes waar materie uit is opgebouwd en de interacties tussen deze deeltjes. We beschrijven deeltjesfysica met behulp van het standaardmodel. In de afgelopen tientallen jaren heeft een groot aantal experimenten dit model bevestigd door zorgvuldig de reactieproducten van botsingen in deeltjesversnellers te bestuderen. Het standaardmodel van elementaire deeltjes is een zeer succesvolle theorie; alle deeltjes die de theorie voorspelt zijn daadwerkelijk gedetecteerd en er zijn vooralsnog geen significante afwijkingen gevonden in hun eigenschappen.

Kosmologie is de studie van het universum als geheel. De algemene relativiteitstheorie, de theorie van de zwaartekracht, beschrijft de uitdijning van het heelal. In tegenstelling tot deeltjesfysica, kunnen we kosmologie niet testen door middel van experimenten, maar alleen door de kosmos waar te nemen. Observationale gegevens, zoals de verdeling van sterrenstelsels en de eigenschappen van de kosmische achtergrondstraling, zijn heel belangrijk om de geschiedenis van het universum te reconstrueren.

Op het eerste gezicht lijken deeltjesfysica en kosmologie niet veel met elkaar te maken te hebben. We hebben per slot van rekening geen deeltjesfysica nodig om de beweging van de planeten in het zonnestelsel te beschrijven. Interacties tussen elementaire deeltjes vinden plaats op heel kleine afstanden, dus waarom zouden die belangrijk zijn wanneer we de globale evolutie van het heelal willen beschrijven? Er zijn drie antwoorden op deze vraag:

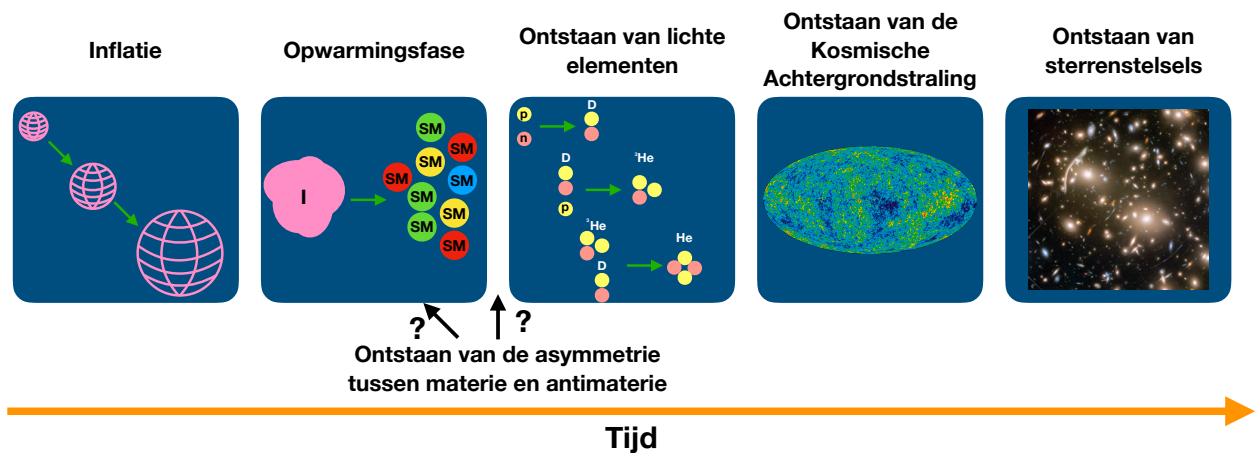
- **De evolutie van het universum wordt bepaald door de deeltjes die het bevat.** Er zijn verschillende bijdragen aan de totale energie in het universum. Voorbeelden zijn straling, massieve deeltjes en donkere energie. De grootste bijdrage aan de totale energie bepaalt de snelheid waarmee het heelal uitdijt. Om de geschiedenis van het heelal te begrijpen, moeten we dus de eigenschappen kennen van alle deeltjes die aanwezig waren in de verschillende fases van de kosmologische evolutie.
- **De geschiedenis van het universum bepaalt de huidige deeltjessamenstelling.** De massa's van de elementaire deeltjes en de sterkte van hun interacties hangen af van de temperatuur van het universum. In het begin zijn alle interacties heel sterk en worden alle deeltjes

steeds in elkaar omgezet. Wanneer de temperatuur daalt, worden bepaalde omzettingen trager dan de uitdijning van het heelal. Daardoor stoppen de reacties van bepaalde deeltjes en blijft hun hoeveelheid vanaf dat moment gelijk. Dit proces heet ‘bevriezing’. De hoeveelheid helium in het heelal en het bestaan van een kosmische achtergrondstraling van neutrino’s zijn het resultaat van bevriezing.

- **Kosmologie kan worden gebruikt om deeltjesfysica te bestuderen bij heel hoge energie.** Er zijn zeer sterke aanwijzingen dat het vroege universum een periode van kosmische ‘inflatie’ doormaakt, waarin het heelal met minstens een factor 10^{78} expandeert. Tijdens deze enorme uitdijning worden de minuscule lengteschalen waarop deeltjesfysica zich afspeelt opgeblazen tot kosmologische afstanden. Met behulp van telescopen kunnen we dus sporen bestuderen van deeltjesfysica in het heel vroege heelal. Dit is ontzettend interessant, omdat we de hoge energien van het vroege heelal in geen enkel experiment in het laboratorium kunnen bereiken.

Er is een behoorlijk sterke consensus onder kosmologen over de geschiedenis van het heelal. Het standaard beeld is dat het heelal eerst een periode van inflatie doormaakt en daarna ‘Hete Oerknal’-evolutie volgt: de evolutie van een hete en dichte deeltjessoep tot het universum met sterren en sterrenstelsels waar we nu in leven. Met dit model, dat wordt samengevat in figuur 1, kunnen de relatieve hoeveelheden van de lichte chemische elementen (waterstof, helium en lithium), en de temperatuur en de eigenschappen van de temperatuurfluctuaties van de kosmische achtergrondstraling nauwkeurig worden voorspeld.

Toch lijkt het er sterk op dat ons begrip van kosmologie en deeltjesfysica niet compleet is. Voorbeelden hiervan zijn de vele experimentele aanwijzingen voor het bestaan van donkere materie en donkere energie, en de asymmetrie tussen materie en antimaterie, het onderwerp van het tweede deel van dit proefschrift. Deze observaties zouden verklaard kunnen worden door het bestaan van nieuwe deeltjes of een aanpassing van de theorie van de zwaartekracht. Het aanpassen van onze bestaande theorieën is geen makkelijke taak, aangezien het standaardmodel en de algemene relativiteitstheorie al veel experimentele tests hebben doorstaan. Aanpassingen van deze theorieën mogen deze correcte voorspellingen niet veranderen.

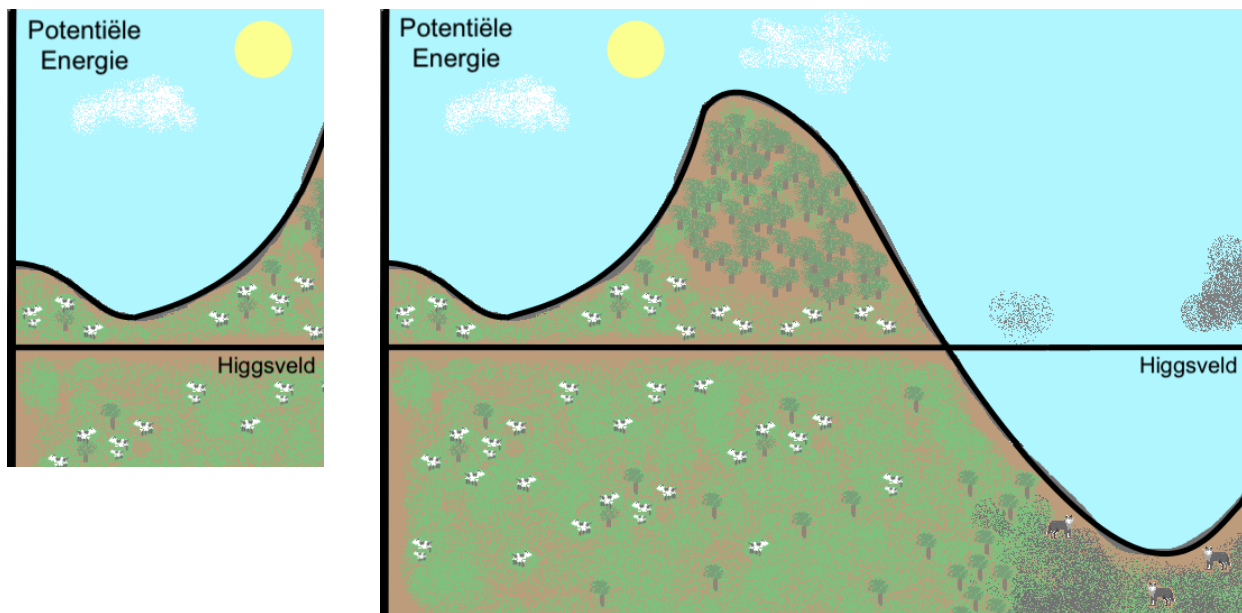


FIGUUR 1: Tijdlijn van het vroege universum. De illustratie laat voornamelijk de volgorde van de gebeurtenissen zien, maar de tijdsintervallen zijn niet op schaal. Het moment waarop de asymmetrie tussen materie en antimaterie is gevormd is niet bekend. We weten dat dit gebeurd moet zijn tussen inflatie en het ontstaan van de lichte chemische elementen.

Het Higgsdeeltje

Het Higgsdeeltje en het bijbehorende Higgsveld spelen een belangrijke rol in dit proefschrift. Het is belangrijk om onderscheid te maken tussen deeltjes en velden. Velden komen overal voor in de natuurkunde. Voorbeelden zijn het zwaartekrachtsveld, dat bepaalt hoe planeten bewegen rondom een ster, en het elektrische veld dat een elektron laat versnellen. We kunnen met elk deeltje van het standaardmodel een veld associëren. De deeltjes, die in deeltjesversnellers worden gedetecteerd, zijn excitaties of 'rimpelingen' in deze velden. Een voorbeeld is het foton, het deeltje dat hoort bij het elektromagnetische veld. Deeltjes zijn gelokaliseerd in een klein stukje ruimte, maar de bijbehorende velden vullen de gehele ruimte (al kan de waarde van de velden ook nul zijn).

De waarden van de velden worden bepaald door de bijbehorende potentiële-energiefunctie. Met potentiële energie zijn we allemaal bekend door onze ervaring met de potentiële energie die hoort bij de zwaartekracht: dit is de energie die je nodig hebt om een berg te beklimmen. Onze ervaring vertelt ons ook dat de natuur potentiële energie probeert te minimaliseren; dit gebeurt bijvoorbeeld wanneer een steen van de helling van een berg afrolt. De potentiële energie van de velden van het standaardmodel is het kleinst wanneer de waarde van de velden nul is, behalve bij het Higgsveld. De potentiaal van het Higgsveld is geschetst in het linker deel van figuur 2. De zwarte lijn geeft de waarde van de potentiële energie aan als een functie van de waarde van het veld. Het minimum bevindt zich op een waarde die niet nul is. De andere deeltjes van het standaardmodel wisselwerken met het Higgsdeeltje, maar ook met de waarde van het veld op de achtergrond. De wisselwerking met de achtergrondwaarde van het Higgsveld geeft die deeltjes massa.



FIGUUR 2:

Links: De potentiaal van het Higgsveld bij lage temperatuur. Het Higgsveld bevindt zich in het dal om de potentiële energie te minimaliseren.

Rechts: Metingen suggereren dat de potentiaal van het Higgsveld een tweede minimum zou kunnen hebben voor een veel grotere waarde van het veld.

Het linker deel van figuur 2 laat de potentiaal zien bij lage temperatuur. Deze situatie is nu van toepassing, maar niet in het vroege heelal. De hoge energiedichtheid in het universum tijdens inflatie en de hoge temperatuur daarna veranderen de vorm van de potentiaal. In het onderzoek in dit proefschrift bevindt het Higgsveld zich nooit in het minimum waarin het zich nu bevindt. We zullen zien dat dit tot interessante dynamica leidt.

Deel I: Opwarming van het heelal na inflatie

In het standaard plaatje van kosmologie begint de evolutie van het universum met een periode van inflatie. Tijdens deze periode dijt het heelal enorm uit. Inflatie wordt aangedreven door het inflatonveld, dat een grote hoeveelheid potentiële energie heeft die het hele heelal domineert. Na een tijd komt inflatie tot een einde. Het inflatonveld draagt dan zijn energie over door deeltjes uit het standaardmodel te produceren. Deze deeltjes vormen de hete en dichte deeltjessoep die zich ontwikkelt volgens het standaard Hete Oerknalmodel. Het overbrengen van de energie van het inflatonveld naar de deeltjes van het standaardmodel heet de ‘opwarmingsfase’.

Stabiliteit van het Higgsveld tijdens de opwarmingsfase

De precieze vorm van de potentiaal van het Higgsveld hangt af van de interacties van het Higgsveld met de andere velden. Als we aannemen dat er geen andere deeltjes zijn dan die uit het standaardmodel, suggereren de resultaten van deeltjesversnellers dat de Higgspotentiaal er uit ziet als het rechter deel van figuur 2, in plaats van het linker deel. Er is een tweede, veel dieper minimum voor een grotere waarde van het Higgsveld. We weten dat het Higgsveld zich nu niet in dat diepe minimum kan bevinden, want dat zou leiden tot een samenklappend heelal. In het huidige universum zorgt de barrière tussen de twee minima dat het Higgsveld zich niet verplaatst van het ondiepe naar het diepe minimum. Aangezien het Higgsveld zich niet in het huidige minimum bevindt in het vroege heelal, moeten we proberen te begrijpen hoe het in het ondiepe minimum terecht is gekomen.

Op het eerste gezicht lijkt het erop dat de energie in het universum tijdens inflatie veel groter is dan de energie die nodig is om over de barrière in de potentiaal te komen; het Higgsveld zou dus terecht komen in het diepe minimum. Gelukkig voorkomt een wisselwerking tussen het Higgsveld en de zwaartekracht dat het Higgsveld deze overgang maakt. Deze interactie vergroot de hoogte van de barrière, waardoor het Higgsveld er niet overheen kan tijdens inflatie.

Maar helaas leidt deze interactie tussen het Higgsveld en zwaartekracht tot problemen tijdens de opwarmingsfase, wanneer het inflaton oscilleert op de bodem van zijn potentiaal waardoor de barrière steeds verdwijnt en opnieuw verschijnt. Dit leidt tot een zeer efficiënte productie van Higgsdeeltjes. In hoofdstuk 3 laten we zien dat het lot van het universum afhangt van de sterkte van de Higgszwaartekrachtinteractie. Als deze interactie sterk is, zorgt de efficiënte productie van Higgsdeeltjes ervoor dat het Higgsveld in het gevaarlijke diepe minimum terecht komt. Als de interactie zwakker is, kunnen we niet vaststellen wat er gebeurt, doordat er geen geschikte methode is om aan te tonen dat het Higgsveld aan de veilige kant van de barrière blijft. De reden hiervoor is dat het erg moeilijk is om niet-statische processen correct te beschrijven.

Welke conclusie moeten we hieruit trekken? Ons bestaan bewijst dat het universum niet in elkaar is gestort tijdens de opwarmingsfase. Betekent dit dat de interactie tussen het Higgsveld en de zwaartekracht niet zo sterk is? Dat is een mogelijkheid. Het is ook mogelijk dat de potentiaal er toch uit ziet zoals het linker deel van figuur 2, bijvoorbeeld door het bestaan van nog onbekende deeltjes.

Opwarming na Higgsinflatie

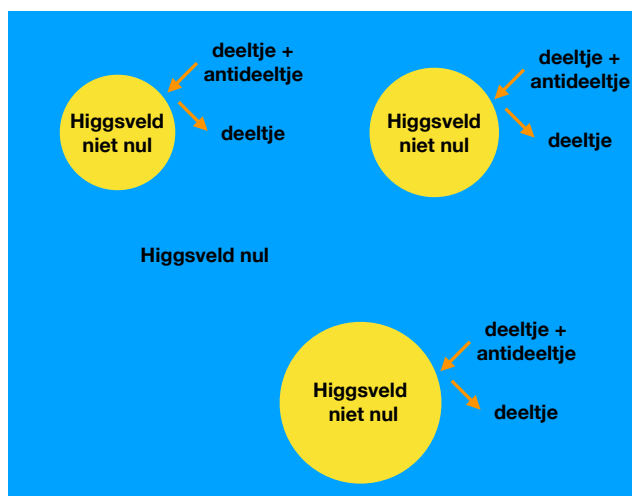
Er zijn veel verschillende modellen voor inflatie. In veel van die modellen wordt inflatie aangedreven door een zogenaamd scalair veld. Aangezien het Higgsveld het enige scalaire veld is dat experimenteel gedetecteerd is, is het een interessante kandidaat voor het inflatonveld. Het Higgsveld kan alleen inflatie veroorzaken als zijn potentiaal erg vlak (en positief) wordt voor heel grote waarden van het veld. Om dit te bewerkstelligen, hebben we weer een interactie nodig tussen het Higgsveld en de zwaartekracht, maar ditmaal nog sterker dan in hoofdstuk 3.

Aangezien de interacties tussen het Higgsveld en de andere velden van het standaardmodel bekend zijn, kunnen we voorspellen hoe de opwarmingsfase verloopt in het geval van Higgsinflatie. In hoofdstuk 4 vinden we dat het verloop van de opwarmingsfase afhangt van de sterkte van de Higgs-zwaartekrachtinteractie. Als die wisselwerking heel sterk is gaat de opwarming ontzettend snel en wordt de energie van het Higgsveld voornamelijk overgebracht naar de ijkbosonen van de electrozwakke interactie. Deze ijkbosonen vervallen op hun beurt in alle andere deeltjes van het standaardmodel. Als de Higgs-zwaartekrachtinteractie minder sterk is, duurt de opwarmingsfase langer. Er worden dan voornamelijk Higgsdeeltjes geproduceerd. De Higgsdeeltjes vervallen ook in de andere deeltjes van het standaardmodel.

Deel II: De asymmetrie tussen materie en antimaterie

Volgens het standaardmodel heeft elk deeltje een bijbehorend antideeltje, met dezelfde massa maar tegengestelde lading. Wanneer een deeltje en een antideeltje op elkaar botsen, annihileren ze elkaar. Alle materie die we om ons heen zien, zowel op aarde als in het universum, is gewone materie, geen antimaterie. Als deeltjesfysica beschreven zou worden door enkel het standaardmodel gedurende de gehele geschiedenis van het heelal, zou er geen asymmetrie zijn tussen materie en antimaterie. Blijkbaar heeft één of ander onbekend deeltje een overvloed aan materie veroorzaakt op een zeker moment in de geschiedenis van het universum. Dit proces heet ‘baryogenese’.

Er zijn twee redenen waarom het standaardmodel geen geschikt proces voor baryogenese kan beschrijven: het maakt geen sterk genoeg onderscheid tussen deeltjes en antideeltjes en het veroorzaakt geen processen die ‘uit evenwicht’ zijn. ‘Uit evenwicht’ betekent dat de snelheid waarmee materie wordt gemaakt niet gelijk is aan de snelheid waarmee materie wordt vernietigd. Als deze snelheden altijd gelijk aan elkaar zijn, kan er geen overschot aan materie ontstaan. Voorbeelden van processen uit evenwicht zijn het bevriezen van interacties, en eerste-orde faseovergangen. Om het overschot aan



FIGUUR 3: Schets van electrozwakke baryogenese. De eerste-orde faseovergang vindt plaats door het vormen van bubbels waarin de waarde van het Higgsveld niet nul is. De deeltjes en antideeltjes in de omgeving reageren met de bubbels. In deze interacties wordt een overschot aan materie opgebouwd. De bubbels nemen dit overschot aan materie op terwijl ze uitdijen om uiteindelijk het gehele universum te vullen.

materie te verklaren, moeten we het standaardmodel dus uitbreiden, bijvoorbeeld door deeltjes toe te voegen die verschillend met materie en antimaterie wisselwerken.

In deel II van dit proefschrift bestuderen we de mogelijkheid om de asymmetrie tussen deeltjes en antideeltjes te maken tijdens de ‘electrozwakke faseovergang’. Figuur 3 laat een schets zien van dit proces. De electrozwakke faseovergang is een gevolg van de temperatuurafhankelijkheid van de Higgspotentiaal. Bij hoge temperatuur heeft de potentiaal alleen een minimum wanneer het veld nul is. Wanneer de temperatuur omlaag gaat, verandert de potentiaal van vorm en verschijnt het minimum dat we zien in figuur 2. De electrozwakke faseovergang is het moment waarop het Higgsveld de overgang maakt van nul naar een waarde die niet nul is. Vanaf dat moment krijgen de andere deeltjes massa. In het standaardmodel is de faseovergang niet eerste orde, maar een geleidelijk, continu proces. Aangezien de aard van de faseovergang afhangt van de vorm van de Higgspotentiaal, moeten we de potentiaal veranderen door één of ander nieuw deeltje toe te voegen.

Modelonafhankelijke beschrijving van baryogenese tijdens de electrozwakke faseovergang

Er zijn veel verschillende deeltjes die je toe zou kunnen voegen om aan de voorwaarden voor baryogenese te voldoen. De toevoeging van deze deeltjes moet uiteraard consistent zijn met experimentele

resultaten. In principe moet je voor elk nieuw model een vergelijking maken met de bestaande metingen en de waarde van de asymmetrie tussen materie en antimaterie uitrekenen.

In hoofdstuk 6 proberen we baryogenese te bestuderen op een manier die niet afhangt van het model voor nieuwe deeltjesfysica. Zolang de nieuwe deeltjes zwaar genoeg zijn, kunnen alle modellen voor nieuwe natuurkunde op dezelfde manier worden geparameteriseerd: we breiden het standaardmodel uit met een set van zogenaamde ‘effectieve operatoren’. Dit zijn nieuwe interacties tussen de deeltjes van het standaardmodel. Hiermee kan aan de voorwaarden voor baryogenese worden voldaan. Deze operatoren kunnen worden vergeleken met experimentele limieten, en hun effect kan worden meegenomen in de berekening van de asymmetrie tussen materie en antimaterie. Zo kunnen alle modellen met nieuwe zware deeltjes in één keer worden bestudeerd.

In hoofdstuk 6 richten we onze aandacht op twee specifieke operatoren: een nieuwe interactie voor het Higgsveld en een interactie die onderscheid maakt tussen topquarks en antitopquarks. Jammer genoeg blijkt dat de methode met effectieve operatoren niet helemaal werkt. Voor de eerste-orde faseovergang zijn relatief lichte deeltjes nodig, wat een parametrisatie met effectieve operatoren onmogelijk maakt. Onze hoop om electrozwakke baryogenese te bestuderen zonder een model te specificeren is daarmee vervlogen.

Het belang van leptonen

De uitkomst van hoofdstuk 6 is niet alleen teleurstellend omdat de aanpak met effectieve operatoren niet goed werkt, maar ook omdat de berekende waarde van de asymmetrie tussen materie en antimaterie veel kleiner is dan de gemeten waarde. De sterkte van de interactie die onderscheid maakt tussen deeltjes en antideeltjes is proportioneel aan de massa van het deeltje. Aangezien de topquark het zwaarste materiedeeltje is, worden de effecten van andere materiedeeltjes meestal verwaarloosd in berekeningen van de asymmetrie tussen materie en antimaterie.

In hoofdstuk 7 laten we zien dat het taulepton, een deeltje dat veel lichter is dan de topquark, een belangrijke rol kan spelen tijdens electrozwakke baryogenese. Zelfs wanneer de nieuwe interactie die onderscheid maakt tussen deeltjes en antideeltjes alleen actief is in de topquarksector, versterkt de bijdrage van tauleptonen nog altijd de asymmetrie. De asymmetrie wordt nog groter wanneer het onderscheid tussen deeltjes en antideeltjes wordt gemaakt in de tauleptonsector. De reden hiervoor is dat de experimentele limieten minder sterk zijn wanneer de nieuwe interactie het taulepton betreft, maar ook dat het taulepton zich makkelijker kan bewegen door het medium tussen de bubbels,

waardoor er meer tijd is om een overschot aan materie te maken. In dit model kan de gemeten waarde van de asymmetrie tussen materie en antimaterie wél worden verklaard.

Vooruitzichten

Het onderzoek uit dit proefschrift houdt hier natuurlijk niet op. Een mogelijke richting voor verder onderzoek is een combinatie van hoofdstuk 3 en 4. Het zou kunnen dat de Higgspotentiaal een tweede, diep minimum heeft, maar ook leidt tot inflatie. Wat zou er in dat geval gebeuren tijdens de opwarmingsfase? Om echt nauwkeurige voorspellingen te doen over de verhittingsfase, moet je eigenlijk zogenaamde roosterberekeningen gebruiken. Een vergelijking tussen resultaten van een rooster en onze resultaten met de methodes van hoofdstuk 4 is in de maak. Nauwkeurige voorspellingen voor de verhittingsfase zijn essentieel wanneer men de data van de kosmische achtergrondstraling wil gebruiken om te bepalen welke modellen voor inflatie mogelijk zijn.

Ook de nauwkeurigheid van berekeningen aan electrozwakke baryogenese kan sterk worden verbeterd. Er zijn verschillende methodes om de asymmetrie tussen materie en antimaterie uit te rekenen, en de relatie tussen deze methodes wordt nog niet goed begrepen. In de toekomst zullen nieuwe deeltjesversnellers en detectoren van zwaartekrachtsgolven meer duidelijkheid geven over de electrozwakke faseovergang en zo, hopelijk, helpen te begrijpen hoe de asymmetrie tussen materie en antimaterie is ontstaan.