

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/19115> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Sousa Sánchez, Kepa

**Title:** Consistent supersymmetric decoupling in cosmology

**Date:** 2012-06-20

---

# Samenvatting

---

De laatste 10–20 jaar is er veel interesse om kosmologische modellen tot stand te brengen binnen de context van de belangrijkste theorieën die de Natuur op zeer hoge energieschalen beschrijven, zoals Algehele Unificatie Theorieën (*Grand Unified Theories*), supersymmetrische theorieën en Snaartheorie.

De voornaamste reden hiervoor is dat de verschijnselen die door deze theorieën beschreven worden, zich afspelen op energieschalen ver boven het bereik van deeltjesversnellers op aarde, zowel de huidige deeltjesversnellers als die in de nabije toekomst. Kosmologie daarentegen biedt een uitstekende mogelijkheid om deze theorieën te testen, dankzij de extreem hoge energieën in het allereerste begin van de evolutie van het heelal.

Het standaard model binnen de kosmologie heet het  $\Lambda$ CDM-model. Dit is vernoemd naar de belangrijkste ingrediënten in het heelal: de kosmologische constante  $\Lambda$ , welke verantwoordelijk is voor de waargenomen versnelde uitdijning van het heelal, en de koude donkere materie (*Cold Dark Matter*), een exotische, nieuwe soort materie die alleen opgemerkt wordt door zijn zwaartekrachtinteractie met overige materie. Het  $\Lambda$ CDM-model geeft een zeer succesvolle verklaring voor onder andere de relatieve aanwezigheid van de lichtste elementen, de vorming van sterrenstelsels, en de verdeling van sterrenstelsels op grote lengteschaal. Veel vragen zijn echter nog onbeantwoord, zoals bijvoorbeeld de microscopische verklaring voor de kosmologische constante, en uit welk soort deeltjes donkere materie bestaat.

Een ander probleem van het  $\Lambda$ CDM-model is gerelateerd aan de beginvoorwaarden van het heelal, waaruit de nu waargenomen verdeling van sterrenstelsels is voortgekomen. In de tegenwoordig geaccepteerde ideeën over de vorming van sterrenstelsels komt de structuur van het heelal op de grootste schaal voort uit

kleine fluctuaties in de energiedichtheid in het zeer jonge heelal. Deze fluctuaties groeiden, met name door de gravitationele invloed van donkere materie, uit tot de huidige kosmische structuur, en kunnen direct waargenomen worden als temperatuursschommelingen in de kosmische microgolf achtergrondstraling (CMB, *Cosmic Microwave Background radiation*). De kleine fluctuaties vinden hun oorsprong in quantumfluctuaties, welke opgerekt werden tot kosmische proporties tijdens een vroege periode van extreem versnelde uitdijing, genaamd inflatie.

Hoewel het temperatuurspectrum van de CMB consistent is met de voorspellingen van inflatie, zijn de fysische processen die inflatie veroorzaken nog onduidelijk. In de simpelste modellen wordt inflatie veroorzaakt door de vacuümenergie van een quantumveld —net zoals in het Higgs-model— dat langzaam naar beneden rolt in een zeer vlakke potentiaal. Zo'n veld wordt het inflaton genoemd. Het ontwikkelen van modellen voor inflatie kan een zeer nuttige informatiebron zijn over het gedrag van de natuur bij zeer hoge energieën. Aan de ene kant verwachten we dat de eigenaardigheden van de theorieën waarbinnen inflatie wordt beschreven, hun sporen nalaten in de CMB, terwijl we aan de andere kant over uiterst precieze metingen beschikken van het spectrum van de CMB. Die metingen komen momenteel van de WMAP-missie, maar nauwkeuriger metingen worden binnenkort verwacht dankzij waarnemingen met de Atacama Cosmology Telescope en de PLANCK-satelliet.

De onderwerpen van dit proefschrift zijn relevant voor kosmologische modellen die gebaseerd zijn op theorieën welke invariant zijn onder supersymmetrie. Supersymmetrie, een symmetrie die bosonen in fermionen transformeert en vice versa, vormt een aantrekkelijk raamwerk dat bijvoorbeeld kan verklaren waarom de zwakke kernkracht zo veel sterker is dan zwaartekracht. In dit proefschrift richten we onszelf met name op superzwaartekracht, een uitbreiding van de Algemene Relativiteitstheorie die invariant is onder supersymmetrie. Superzwaartekracht werd oorspronkelijk voorgesteld om bepaalde divergenties die typisch verschijnen in elke theorie over quantumzwaartekracht, te repareren, maar dat idee bleek onsuccesvol. Tegenwoordig worden supersymmetrie en superzwaartekracht met name gebruikt om de belangrijkste quantumzwaartekrachttheorie, Snaartheorie, te beschrijven bij lage energieën.

De kosmologische modellen binnen Snaartheorie voorspellen typisch een groot aantal deeltjes, terwijl een model zijn voorspelbare kracht verliest naarmate het meer deeltjes bevat. Zodoende wordt in kosmologische modellen aangenomen dat het merendeel van de deeltjes een extreem grote massa heeft, zodat ze tijdens inflatie niet geproduceerd kunnen worden. Dit gebeurt deels om controle te krijgen over de analyse, maar ook omdat het spectrum van fluctuaties in de CMB accuraat voorspeld wordt door modellen van inflatie met slechts één deeltje. Aangezien de zware deeltjes niet voorkomen tijdens inflatie, kunnen we

---

een supersymmetrische theorie bij lage energie gebruiken, waarin inflatie wordt geïmplementeerd met een minimum aantal deeltjes. Bovendien weten we dat supersymmetrie gebroken wordt bij lagere energieën, zowel tijdens inflatie als nu (het spectrum van deeltjes in het Standaard Model is niet consistent met supersymmetrie), waardoor de sector die overblijft bij lage energieën automatisch het mechanisme moet bevatten dat supersymmetrie breekt.

De mogelijke interacties tussen deeltjes in de beschrijving van superzwaartekracht kennen sterke beperkingen, en doordat zwaartekracht door alles wordt gevoeld, is het niet-triviaal om een theorie consistent te beperken tot een enkele sector en tegelijkertijd supersymmetrie te behouden. Bovendien is er geen eenvoudige manier om te garanderen dat de deeltjes die men negeert zwaar blijven, aangezien supersymmetrie gebroken wordt in de overgebleven sector. Als de beperking tot één sector niet op een consistente manier gedaan wordt, kan het voorkomen dat het inflaton koppelt aan de genegeerde deeltjes, waardoor er karakteristieke verschijnselen zichtbaar zijn in het spectrum van de CMB. Door deze effecten te bestuderen, kunnen we belangrijke informatie verkrijgen over de natuur bij hoge energieën.

In dit proefschrift bestuderen we de noodzakelijke eisen om een theorie consistent te beperken tot één sector terwijl tegelijk supersymmetrie wordt behouden. Voor die modellen waarbij aan deze eisen is voldaan, beschouwen we hoe de massa's van de genegeerde deeltjes beïnvloed worden door het breken van supersymmetrie in de sector met lichte deeltjes.

Hoewel inflatie alom geaccepteerd wordt als de belangrijkste oorzaak voor het ontstaan van schommelingen van de energiedichtheid in het vroege heelal, zijn de waarnemingen nog steeds compatibel met kleine bijdragen afkomstig van andere oorzaken, zoals kosmische snaren. Kosmische snaren zijn zeer dunne concentraties van energie, zoals een hele dunne draad, die zich uitstrekken over heel het heelal en die met relativistische snelheden bewegen. Het bestaan van kosmische snaren is een algemene voorspelling van veel veelbelovende kosmologische modellen die gebaseerd zijn op supersymmetrische Algehele Unificatie Theorieën en Snaartheorie.

In het algemeen zijn oplossingen van kosmische snaren in supersymmetrische theorieën niet invariant onder supersymmetrie, oftewel de snaren breken supersymmetrie. Het is echter nog steeds mogelijk om oplossingen te vinden met kosmische snaren die een deel van de supersymmetrie ongebroken laten. Deze noemen we supersymmetrische kosmische snaren.

Supersymmetrische kosmische snaren zijn met name interessant omdat ze, dankzij hun specifieke quantumeigenschappen, informatie kunnen verschaffen over de natuurkundige beschrijving van het universum bij zeer hoge energieën.

Aangezien het heelal heter is en meer energie bevat naarmate de tijd wordt teruggedraaid, kan de studie van supersymmetrische kosmische snaren licht werpen op de kenmerken van het vroege, allereerste stadium in de evolutie van het heelal.

Supersymmetrische theorieën kunnen invariant zijn onder één of meerdere supersymmetrieën en worden als zodanig geklassificeerd middels het aantal supersymmetrieën  $\mathcal{N}$  waaronder ze invariant zijn. Aangezien we geen supersymmetrie waarnemen in de natuur, is het lastiger om contact te maken met de experimentele data naarmate een theorie meer supersymmetrie bevat. Vandaar dat, wat betreft supersymmetrische theorieën, met name de theorieën die invariant zijn onder één enkele supersymmetrie, d.w.z.  $\mathcal{N} = 1$  theorieën, gebruikt worden om de natuur te beschrijven.

Echter, bij het construeren van kosmologische modellen uit Snaartheorie, is het eindresultaat doorgaans een supersymmetrische theorie die invariant is onder meer dan één supersymmetrie,  $\mathcal{N} > 1$ . In dit proefschrift bestuderen we een nieuw type oplossingen van kosmische snaren in  $\mathcal{N} = 2$  superzwaartekracht. Kosmologische modellen die gebaseerd zijn op  $\mathcal{N} = 2$  theorieën zijn vooral interessant, omdat ze als brug gebruikt kunnen worden tussen de meer fenomenologische  $\mathcal{N} = 1$  theorieën en Snaartheorie.

In dit proefschrift presenteren we één van de slechts twee bekende voorbeelden van oplossingen van kosmische snaren in een  $\mathcal{N} = 2$  superzwaartekracht-model. We leiden af dat de breedte van de kosmische snaren kan veranderen zonder dat dat energie kost. Binnen een kosmologische context zijn kosmische snaren gevoelig voor verschillende verstoringen en, doordat het veranderen van de straal van de snaar geen energie kost, kunnen zulke verstoringen ertoe leiden dat de snaren breder worden tot op het punt waarop ze volledig oplossen. Ons werk verkent deze mogelijkheid.