



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Into the darkness : forging a stable path through the gravitational landscape

Papadomanolakis, G.

Citation

Papadomanolakis, G. (2019, September 19). *Into the darkness : forging a stable path through the gravitational landscape*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/78471>

Version: 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/1887/78471>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/78471> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Papadomanolakis, G.

Title: Into the darkness : forging a stable path through the gravitational landscape

Issue Date: 2019-09-19

Samenvatting

De ontdekking van de versnellende expansie van ons universum is één van de grootste in de geschiedenis van de natuurkunde en heeft verregaande gevolgen binnen de kosmologische sector. Samen met de ontdekking van Koude Donkere Materie heeft dit geleid tot de ontwikkeling van hét kosmologische concordantiemodel, Λ CDM. In dit model wordt de kosmische expansie uitgelegd door middel van een Kosmologische Konstante in de uitdrukking van de actie van de Algemene Relativiteitstheorie. Als eerste geïntroduceerd door Albert Einstein, kan deze konstante geïnterpreteerd worden als de energie van het vacuüm. De donkere materie sector wordt gerepresenteerd door middel van een drukloze vloeistof, bestaand uit langzaam bewegende deeltjes, genaamd Koude Donkere Materie (Cold Dark Matter). Tot vandaag blijkt Λ CDM zeer succesvol in het beschrijven van onze kosmologische waarnemingen, een opmerkelijk resultaat gezien de eenvoud van het model.

Echter, Λ CDM is, vanuit een theoretisch oogpunt, problematisch. Om specifiek te zijn, de interpretatie van de Kosmologische Konstante als de energie van het vacuüm gaat gepaard met een fundamenteel probleem. De waargenomen waarde van deze konstante, in termen van de Planck Massa, is van de orde $\Lambda_{obs} \sim (10^{-30} M_{pl})^4$. Wanneer men, via het Standaard Model, de verwachtingswaarde van de Kosmologische Konstante berekent blijkt er een verschil te zijn van 60 ordes van grootte. Dit verschil ligt aan de basis van een intensieve zoektocht naar alternatieven. Dit heeft geresulteerd in een weids landschap van zwaartekracht modellen die de waargenomen kosmische versnelling op allerlei manieren proberen uit te leggen.

De meeste modellen introduceren nieuwe vrijheidsgraden, naast die van de Algemene Relativiteitstheorie, variërend van scalaire velden tot extra tensor velden. Zo is een bijna onbepaalde verzameling theorieën van zwaartekracht ontstaan. Het is onmogelijk al deze theorieën efficiënt met Λ CDM te vergelijken, aangezien elk model individueel met de beschikbare kosmologische data moet worden geconfronteerd. Dit proces kan worden gestroomlijnd door de parameter ruimte in te perken door te eisen dat theoretische instabiliteiten moeten worden vermeden.

In dit proefschrift geef ik een afleiding van een complete verzameling voorwaarden, waar elke uitbreiding van de Algemene Relativiteitstheorie aan moet voldoen om een levensvatbaar kosmologisch model te zijn. En

Samenvatting

vervolgens toets ik mijn resultaat. Ik heb mij beperkt tot de groep van modellen die een extra scalair veld toevoegen aan de Algemene Relativiteitstheorie, aangezien dit de grootste groep is. Een bekend voorbeeld hiervan is de Horndeski theorie die lang als de meest algemene scalaire-tensor theorie met tweedegraads bewegingsvergelijkingen werd gezien. Om ons doel te bereiken heb ik gebruik gemaakt van het verenigend en effectief kader van de “Effective Field Theory of Dark Energy and Modified Gravity” . Dit maakt het mogelijk om de voorwaarden op een modelonafhankelijke en efficiënte wijze te construeren.

De voorwaarden moeten garanderen dat er geen spook-, gradiënt- of tachyon-instabiliteiten ontstaan. De tachyon-instabiliteit is totaal verwaarloosd in de literatuur en krijgt uitgebreid de aandacht. In de eerste drie Hoofdstukken worden de voorwaarden afgeleid in, achtereenvolgens, vacuüm, in het bijzijn van twee dominante materie velden, straling en Koude Donkere Materie, en de De Sitter limiet.

Alhoewel de voorwaarden onder de invloed van materie vanuit een natuurkundig oogpunt de meest interessante zijn is de afleiding daarvan erg ingewikkeld. Daarom wordt meestal de aanname gemaakt dat de materie verwaarloosd kan worden. Ons werk lijdt niet aan deze tekortkoming en geeft ons de mogelijkheid om de invloed ervan te kwantificeren. De voorwaarden om spook- en gradiënt- instabiliteiten te vermijden blijven grotendeels onveranderd. In het geval van het “beyond Horndeski model”, een uitbreiding van het Horndeski model, is wel een afwijking gevonden. De geluidssnelheid van de scalaire vrijheidsgraad verandert onder invloed van een stralings veld. In tegenstelling tot de spook- en gradient-instabiliteiten, is de tachyon instabiliteit wel degelijk sterk afhankelijk van eventuele materie velden. Elk meegenomen materie veld introduceert een extra voorwaarde. Dit is een direct resultaat van de gravitationele interactie tussen de scalaire vrijheidsgraad en de materie velden. Deze, nieuwe, tachyonische voorwaarden zijn het belangrijkste resultaat van dit proefschrift, met mogelijk grote gevolgen voor toekomstig werk.

Na de afleiding van de nieuwe voorwaarden, die de absentie van mogelijke tachyon instabiliteiten garanderen, is het belangrijk om ze te toetsen en hun kracht in het inperken van de parameter ruimte aan te tonen. In Hoofdstuk vijf doen we dit met behulp van EFTCAMB, een patch van de bekende Boltzmann solver, CAMB, waarin de EFTtoDE/MG is toevoegd. Om de stabiliteit van de modellen op alle lengteschalen te garanderen, werden, tot dan, een aantal ad-hoc wiskundige voorwaarden gebruikt die gebaseerd waren op een aantal limiterende aannames. Het praktische doel van mijn onderzoek was om deze wiskundige aannames te vervangen door de nieuwe tachyonische voorwaarden en de resultaten te vergelijken. Daarom hebben wij de invloed van deze voorwaarden op de (μ, Σ) parameter ruimte getest. Deze ruimte encodeert de afwijking van

de Algemene Relativiteitstheorie in, respectievelijk, de Poisson en lens vergelijking. Deze toets laat sterke afwijkingen zien in de niet-minimaal gekoppelde velden, beter bekend onder de naam “Generalised Brans Dicke” (GBD). Aangezien de tachyonische voorwaarden een sterke theoretische fundering hebben, in tegenstelling tot de wiskundige voorwaarden, is het duidelijk dat zij de voorkeur genieten als de voorwaarden die stabiliteit op grote lengteschalen garanderen .

Naast het werk aan de stabiliteits voorwaarden heb ik ook gewerkt aan het formalisme van EFToDE/MG. In het eerste Hoofdstuk heb ik een uitbreiding van het EFToDE/MG formalisme gepresenteerd die het Hořava gravitatiemodel toevoegt. Dit model is interessant omdat het een kandidaat is voor zowel kwantum gravitatie als kosmische versnelling. Vervolgens heb ik een compleet “woordenboek” opgebouwd dat duidelijk maakt hoe individuele modellen in the EFToDE/MG formalisme beschreven kunnen worden. Dit woordenboek geldt voor alle bekende scalaire modellen met uitzondering van de nieuwe DHOST-modellen die nieuwe, niet meegenomen, operatoren vereisen. Tot slot heb ik een nieuwe basis voor de operatoren, geïnspireerd door de “ReParametrized Horndeski” basis, gepresenteerd die de fysische interpretatie van de operatoren duidelijker maakt.

Dit proefschrift vertegenwoordigt een onderzoeksrichting die zijn natuurlijk einde heeft bereikt. Het is nu belangrijk om met de theoretische resultaten aan het werk te gaan. In Hoofdstuk vijf hebben wij hiermee een begin gemaakt door een aantal parameter ruimtes te bestuderen. Deze studies zullen uitgebreid worden en, met behulp van hoge precisie kosmologische data, een leidende rol spelen in het inperken van het weidse gravitationele landschap. Verder is het mogelijk om kosmologische functies te reconstrueren uit de beschikbare data. Deze reconstructies kunnen gebruik maken van de ontwikkelde voorwaarden zodat ze instabiele delen van de parameter ruimte vermijden. Ik hoop dat het onderzoek dat in dit proefschrift is beschreven een belangrijke rol zal spelen in het gouden tijdperk van de kosmologie.

