
SAMENVATTING

In de laatste decennia is ons begrip van de kosmologie sterk toegenomen. Wij hebben tegenwoordig een fenomenologisch intrinsiek consistent model, bekend als het "Cosmological Standard Model" of " Λ CDM", dat erin slaagt de enorme hoeveelheid waarnemingen te interpreteren met slechts een paar vrije parameters. Hedendaags kosmologisch onderzoek is voornamelijk gericht op de studie naar de mogelijke uitbreiding van of alternatieven voor dit standaardmodel. Dit wordt in eerste instantie gemotiveerd door enkele theoretische problemen in het Kosmologisch Standaard Model. Hoewel we inderdaad de waarnemingen effectief kunnen beschrijven, ontbreekt nog steeds een consistent theoretisch beeld van de zogenaamde donkere sector, d.w.z. de donkere energie die de huidige kosmische versnelling aandrijft en de donkere materie die verantwoordelijk is voor de vorming van de grote-schaalstructuur van het universum.

Zelfs als we deze belangrijke problemen negeren, met de veronderstelling dat ze te ingewikkeld zijn om met onze huidige kennis aangepakt te worden, is de studie van alternatieve kosmologische modellen belangrijk gezien het feit dat de kwaliteit van kosmologische gegevens voortdurend beter wordt. Deze ontwikkeling geeft ons een kans om veel van onze huidige theoretische ideeën te testen en nieuwe richtingen te vinden om naartoe te werken. Een informatief voorbeeld is de studie van de zwaartekracht. Kosmologische waarnemingen kunnen ons veel leren over de onderliggende theorie van de zwaartekracht, en mogelijk kunnen we op kosmologische schalen afwijkingen vinden van de algemene relativiteitstheorie. Daarom is dergelijk onderzoek van alternatieve zwaartekrachttheorieën, hoewel grotendeels

gemotiveerd met het oog op een verklaring voor kosmische versnelling, ook onafhankelijk van dit vraagstuk van belang.

Het onderwerp van dit proefschrift is, met dit bredere beeld in het achterhoofd, het onderzoek van fenomenen voorbij het kosmologische standaardmodel in verschillende interessante richtingen. Hieronder geven we een korte samenvatting van de inhoud van het proefschrift.

- Hoofdstuk 1 biedt een inleiding op het proefschrift. In dit hoofdstuk zullen we de belangrijkste concepten van de moderne kosmologie introduceren. We presenteren een beknopt overzicht van de kosmologische storingstheorie en bespreken de essentiële waarnemingen. We geven ook korte inleidingen op de onderwerpen van dynamische donkere energie/kwintessens, modificaties van zwaartekracht en afschermingsmechanismen.
- Hoofdstuk 2 is gewijd aan de bestudering van een nieuwe klasse van inflatoire modellen bekend als kosmologische α -attractoren. We brengen deze modellen naar voren als een gemeenschappelijk kader voor de beschrijving van zowel inflatie als donkere energie. Wij construeren en bestuderen een aantal fenomenologisch rijke modellen die compatibel zijn met de huidige waarnemingen. In de eenvoudigste modellen, met een kosmologische constante Λ naar nul, heeft men de *tensor-to-scalar ratio* $r = \frac{12\alpha}{N^2}$, waarbij N het aantal e-foldings is tot het einde van de inflatie, en de asymptotische toestandsvergelijking van donkere energie $w = -1 + \frac{2}{9\alpha}$. Bijvoorbeeld, voor een theoretisch interessant model gegeven door $\alpha = 7/3$ vindt men $r \sim 10^{-2}$ en de asymptotische toestandsvergelijking is $w \sim -0.9$. Toekomstige waarnemingen, inclusief zowel opnamen van de grote-schaalstructuur als experimenten betreffende de B-mode polarisatie van de kosmische achtergrondstraling, zullen deze testen, evenals meer algemene modellen die hier worden gepresenteerd. Wij bespreken ook de gravitationele verhitting in modellen van kwintessentiële inflatie en stellen

dat het onderzoek daarvan interessant kan zijn vanuit het oogpunt van inflatoire kosmologie. Dergelijke modellen vereisen een veel groter aantal e-foldings en voorspellen daarom een spectraalindex n_s die de waarde in meer conventionele modellen van inflatoire α -attractoren kan overtreffen met ongeveer 0.006. Dit suggereert een manier om de modellen van kwintessentiële inflatie te onderscheiden van de conventionele inflatoire modellen, zelfs als de eerstgenoemde $w = -1$ voorspelt. Dit hoofdstuk is gebaseerd op Ref. [64].

- Het onderwerp van hoofdstuk 3 is de theorie van "massive bigravity" waar twee dynamische tensorvrijheidsgraden aanwezig zijn. We beschouwen een interessante uitbreiding waarbij beide metrieken gekoppeld zijn aan de materie-sector die bekend staat als "doubly-coupled bigravity". Het voornaamste doel van dit hoofdstuk is de bestudering van de voortplanting van zwaartekrachtsgolven in deze theorie. We tonen aan dat de snelheidsgrenzen van de zwaartekrachtsgolven opgelegd door de recente detectie van zwaartekrachtsgolven uitgestraald door een tweetal samenvoegende neutronensterren en hun elektromagnetische tegenhanger, gebeurtenissen GW₁₇₀₈₁₇ en GRB_{170817A}, de mogelijke oplossingsruimte van de dubbelgekoppelde modellen aanzienlijk verkleinen. We hebben laten zien dat deze snelheidsgrenzen ofwel de twee metrieken dwingen evenredig te zijn op het achtergrondniveau ofwel de modellen om enkelvoudig gekoppeld te worden (d.w.z. alleen één van de metrieken is gekoppeld aan de materie-sector). Ook is aangetoond dat de genoemde proportionele oplossingen stabiele kosmologieën bieden die fenomenologisch gelijk zijn aan de oplossing van Λ CDM op het niveau van de achtergrond en het niveau van lineaire verstoringen. Aan de andere kant zullen de niet-lineariteiten naar verwachting afwijkingen van Λ CDM vertonen. Dit hoofdstuk is gebaseerd op Ref. [65].

- In hoofdstuk 4 bestuderen we de eerste kosmologische implicaties van een nieuwe zwaartekrachttheorie, recent voorgesteld door Chamseddine en Mukhanov, bekend als de "mimetic theory of massive gravity". Dit is een theorie van "ghost"-vrije massieve zwaartekracht, die bovendien een zogenaamde mimetische donkere materie component bevat. Net als in andere gemodificeerde zwaartekrachttheorieën zijn er zelfversnellende oplossingen die een "ghost"-instabiliteit bevatten. In het "ghost"-vrije gebied van de parameterruimte komt het effect van de gravitonmassa op de geschiedenis van de kosmische expansie overeen met een effectieve negatieve kosmologische constante, een stralingscomponent, en een negatieve krommingsterm. Hiermee kunnen we grenzen opleggen aan de modelparameters, met name de gravitonmassa, door te eisen dat de effectieve stralings- en kromtetermen binnen waarnemingsgrenzen liggen. De kosmische versnelling moet worden verklaard door een afzonderlijke positieve kosmologische constante of een andere donkere energiesector. Door lineaire stabiliteit te eisen leggen we op het niveau van verstoringen verdere beperkingen op. Met het oog op huidige en toekomstige opnamen van de grote-schaalstructuur bespreken we ook de mogelijkheid om deze theorie te onderscheiden van Λ CDM. Dit hoofdstuk is gebaseerd op Ref. [66].
- Hoofdstuk 5, het laatste, is gewijd aan de studie van de effecten van afschermingsmechanismen in gemodificeerde zwaartekrachttheorie en op de dynamiek van de sferische instorting van donkere materie. We onderzoeken in het bijzonder de zogenoemde "splashback scale" in "symmetron modified gravity". De "splashback"-straal r_{sp} is in kosmologische N -body simulaties vastgesteld als een belangrijke schaal geassocieerd met zwaartekrachtinstorting en de faseruimteverdeling van recent samengetrokken materie (accretie). We maken gebruik van een semi-analytische benadering, namelijk het kader van de zelfgeli-

jkvormige sferische instorting, om de sferische instorting van donkere materiehalo's in symmetrongravitatie te bestuderen. Wij bieden voor het eerst inzicht in hoe de fenomenologie van "splashback" wordt beïnvloed door gemodificeerde zwaartekracht. De symmetron is een scalar-tensor theorie die een afschermingsmechanisme vertoont waarbij gebieden met hogere dichtheid worden afgeschermd van de effecten van een vijfde kracht. In dit model vinden we dat als overdichtheden groeien in de kosmische tijd, het binnengebied zwaar afgeschermd wordt. In het bijzonder identificeren we een sector van de parameter-ruimte waarvoor materie die momenteel op de "splashback"-straal zit tijdens de instorting de vorming van dit afgeschermd gebied gevolgd heeft. Daarbij hebben wij ontdekt dat voor dit deel van de parameter-ruimte de "splashback"-straal maximaal beïnvloed is door de symmetronkracht, en we voorspellen veranderingen in r_{sp} tot ongeveer 10% in vergelijking met zijn algemene relativiteitswaarde. Aangezien deze marge binnen de precisie van huidige "splashback"-experimenten valt, verwachten we dat deze straal binnenkort randvoorwaarden zal bieden voor symmetrongravitatie op voorheen onontgonnen schalen. Dit hoofdstuk is gebaseerd op Ref. [67].