

University of Groningen

## M-theory and gauged supergravities

Roest, Diederik

**IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.**

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2004

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Roest, D. (2004). *M-theory and gauged supergravities*. s.n.

### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

### Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

*Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.*

# Samenvatting

Dit proefschrift behandelt verschillende gekijkte supergravitaties die een rol spelen binnen de snaartheorie en haar uitbreiding, de M-theorie. Om deze wellicht raadselachtige zaken te verduidelijken geven we eerst een historisch overzicht van de deeltjes- en hoge-energiefysica.

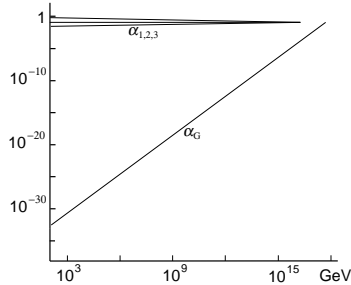
De deeltjesfysica kwam in 1897 tot leven met Thompson's ontdekking van het elektron, om vervolgens in de twintigste eeuw te volgroeien. Inmiddels weten we dat de elementaire deeltjes van de natuur zijn onderverdeeld in bosonen en fermionen, die sterk van elkaar verschillen. De fermionen vormen de bouwstenen van alle materie, en zijn opgesplitst in drie families, die ieder twee quarks, een elektron en een neutrino tellen. De verschillende materiedeeltjes beïnvloeden elkaar door het uitwisselen van bosonen, die als krachtdeeltjes of boodschappers fungeren. De elektromagnetische, zwakke en sterke krachten worden doorgegeven door respectievelijk fotonen,  $W_{\pm}$  en  $Z_0$  vector bosonen en gluonen.

Deze bosonen en fermionen zijn elegant vervat in het Standaard Model (SM) van de deeltjesfysica, dat werd vervolmaakt in de 1970'er jaren. Het SM is een zogenaamde quantumveldentheorie (QVT) en omvat derhalve de quantummechanica en de speciale relativiteitsleer, beiden stammend uit het begin van de 20e eeuw. Dergelijke QVTen worden vaak geplaagd door onzinnige oneindigheden in bepaalde berekeningen, waardoor zij onbruikbaar zijn; in deze gevallen wordt een theorie niet-renormaliseerbaar genoemd. Het werk van 't Hooft en Veltman bewees dat dit niet het geval was voor een bepaalde klasse van QVTen, waarvan de interacties op ijk-symmetrieën zijn gebaseerd. Het succesvolle SM is hiervan een voorbeeld, met de specifieke ijkgroep  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ .

Het Standaard Model beschrijft drie van de fundamentele krachten. Er is echter nog een vierde kracht, de zwaartekracht, die niet opgenomen is in het SM. Voor situaties met lagere energieën is dit een bijzonder goede benadering, aangezien de drie SM-krachten in dit regime veel sterker zijn dan gravitatie. Dit is geïllustreerd in figuur B.1, waar de sterktes van de verschillende krachten als functie van de gebruikte energie worden weergegeven.

De experimentele bevestiging van het SM tot energieën van  $10^2$  GeV is uitmuntend. Echter, het zogeheten Higgs-deeltje, dat verantwoordelijk is voor de massa's van alle andere deeltjes, is nog niet experimenteel aangetoond. Daarnaast is er een aantal theoretische argumenten om het SM niet als de ultieme theorie te zien. Ten eerste verwacht men in een dergelijke theorie niet al te veel parameters aan te treffen, terwijl het SM er negentien heeft.

Bovendien valt in figuur B.1 te zien dat de sterktes van de drie krachten min of meer samenkomen bij een energie van ongeveer  $10^{14}$  GeV, wat een gemeenschappelijke afkomst suggereert; dit is echter in het SM niet exact het geval. Wellicht het belangrijkste bezwaar tegen het SM, vanuit ons oogpunt, is dat het een beschrijving is van slechts drie krachten, terwijl de zwaartekracht buitenspel staat.



**Figuur B.1:** Een schets van de verschillende sterktes  $\alpha_{1,2,3}$  van de drie SM-krachten en  $\alpha_G$  van gravitatie bij verschillende energieën. Uit [3].

Men kan het Standaard Model uitbreiden met een bepaald soort symmetrie, genaamd supersymmetrie (waarop we later nog terugkomen). Het invoeren van supersymmetrie zorgt onder andere voor een perfect samenkomen van  $\alpha_{1,2,3}$  in figuur B.1. Echter, het brengt ook een aantal nieuwe deeltjes met zich mee: de supersymmetrische partners van de deeltjes van het SM. Als supersymmetrie inderdaad bestaat moet het in een zogeheten gebroken fase zijn, waardoor de extra deeltjes zwaarder zijn dan die van het SM. Er bestaat sterke hoop dat deze zullen worden ontdekt in de LHC-versneller van het CERN te Genève, die naar verwachting in 2006 van start zal gaan.

Naast de ontwikkeling van de QVT en het SM in de deeltjesfysica is in de 20e eeuw ook een beschrijving van de zwaartekracht opgesteld: Einstein publiceerde zijn Algemene Relativiteitstheorie (ART) in 1914. Deze theorie beschrijft gravitatie door de kromming van ruimte en tijd en is van toepassing op kosmologische processen, waarbij de zwaartekracht de drie krachten van het SM domineert.

Ook de experimentele confirmatie van de ART is uitstekend. Naast andere testen heeft zij de verandering van de baan van Mercurius en de afbuiging van licht door bijvoorbeeld de zon nauwkeurig voorspeld. Toch kan Einstein met de ART niet het laatste theoretische woord hebben. De ART is een klassieke theorie en kan niet worden ingepast binnen een QVT: de theorie is niet-renormaliseerbaar.

Door haar niet-renormaliseerbaarheid is de ART slechts toepasbaar bij lagere energieën. Men hoopt dat er een modificatie van de ART bestaat die geldig is voor alle energieën. Deze langgezochte theorie van quantumgravitatie is derhalve slechts vereist voor extreme situaties, die zich echter voordoen in het universum. De ART voorspelt bijvoorbeeld het bestaan van zogeheten zwarte gaten, waarbij het zwaartekrachtsveld oneindig sterk wordt. Hierdoor is

de benadering van het SM niet meer geldig. Dit is het geval voor deeltjes met een energie van  $10^{19}$  GeV, wat de Planck-energie wordt genoemd. De bijbehorende lengteschaal is de Planck-lengte van ongeveer  $10^{-33}$  cm. Omdat dergelijke energieën ook voorkwamen in het erg jonge heelal (zo'n  $10^{-43}$  seconden na de Big Bang), is een theorie van quantumgravitatie van groot belang voor de kosmologie.

Naast grote verschillen zijn er ook veel overeenkomsten tussen het Standaard Model en de Algemene Relativiteitstheorie. Een belangrijke overeenkomst is dat beiden zijn gebaseerd op ijk-symmetrieën: in het geval van het SM zijn dit de interne symmetrieën  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ , terwijl dit voor de ART de symmetrie onder coördinantentransformaties is. Beide symmetrieën transformeren bosonen naar bosonen en fermionen naar fermionen, maar mengen de twee soorten niet. De bovengenoemde supersymmetrie is een interessante uitbreiding: deze symmetrie relateert bosonen en fermionen via

$$\delta(\text{boson}) = \text{fermion}, \quad \delta(\text{fermion}) = d(\text{boson}), \quad (\text{B.43})$$

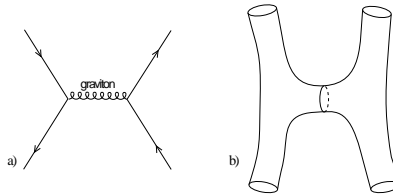
waar  $d$  de translatieoperator is. Aangezien de laatste geen veld onberoerd laat, transformeren alle velden onder supersymmetrie; om deze reden vereist supersymmetrie gelijke aantallen bosonen en fermionen.

Gelet op de grote successen van ijktheorieën als het SM en de ART lijkt het logisch om ook theorieën met locale supersymmetrie te beschouwen. Aangezien deze aanleiding geeft tot locale translaties, zie (B.43), zal ook de zwaartekracht worden meegenomen; om deze reden worden ze supergravitatie-theorieën genoemd, waarvan de eerste in 1976 werd opgesteld. Aanvankelijk was er groot enthousiasme toen bleek dat supersymmetrie bepaalde oneindigheden ophief. Inmiddels is het geloof in de renormaliseerbaarheid van supergravitatie weggeëbd: met ziet geen reden om aan te nemen dat bepaalde funeste termen zullen wegvallen.

Op het moment wordt de snaartheorie als de meest veelbelovende kandidaat voor het verenigen van de QVT en de ART gezien. In de snaartheorie worden elementaire objecten niet als puntdeeltjes gezien maar als kleine snaren, van de Planck-grootte. Door hun kleine omvang zien wij deze snaren als deeltjes. Er is echter een groot verschil: een snaar kan op verschillende manieren trillen. De verschillende trillingstoestanden worden waargenomen als verschillende elementaire deeltjes. Eén van de massaloze trillingstoestanden is een graviton, dat het krachtdeeltje van de zwaartekracht is: de snaartheorie omvat gravitatie. Ook zijn er verschillende vector bosonen en een oneindig aantal massieve deeltjes met een massa van de Planck-orde.

Door de aanwezigheid van het graviton werd de snaartheorie als veelbelovend gezien. De eerste constructie had echter ook een aantal nadelen, waaronder een tachyonisch deeltje. Daarom werden al snel supersymmetrische versies van de snaartheorie opgesteld. In deze supersnaartheorieën wordt het graviton vergezeld door een voltallig supergravitatiemultiplet (naast de massieve deeltjes). In de laagenergetische benadering verschijnt inderdaad supergravitatie als effectieve theorie. Snaartheorie kan dus worden gezien als een modificatie van supergravitatie bij hoge energieën, zoals geïllustreerd in figuur B.2. Een andere opvallende

eigenschap van de supersnaartheorie is het feit dat zij slechts in negen, in plaats van de gebruikelijke drie, ruimtelijke dimensies kan bestaan. De zes extra dimensies worden erg klein gekozen en hebben om die reden ontdekking ontlopen.

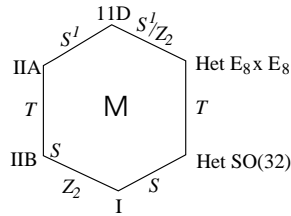


**Figuur B.2:** De interacties van a) supergravitatie en b) snaartheorie: de uitwisseling van een graviton in het linker diagram kan worden gezien als de laagenergetische benadering van het samensmelten en opsplitsen van de snaren in het rechter diagram. Uit [3].

Na de eerste toepassing van snaartheorie als theorie van quantumzwaartekracht door Scherk en Schwarz in 1974 zijn er twee periodes in het bijzonder geweest waarin veel ontdekkingen werden gedaan. De eerste vond plaats in 1984-85, waarin belangrijke eigenschappen van de supersnaren werden ontdekt. Na deze periode wist men dat er vijf verschillende theorieën zijn, die type I, IIA, IIB, Het  $SO(32)$  en Het  $E_8 \times E_8$  worden genoemd. Deze vijfvoudige mogelijkheid voor de veronderstelde unieke en allesomvattende theorie werd als teleurstellend ervaren. Daarnaast beschikte men slechts over perturbatieve beschrijvingen, analoog aan de eerste quantisatie van een quantummechanisch deeltje in een klassieke achtergrond.

Deze situatie veranderde tijdens de tweede opleving in het midden van de jaren '90. De verschillende snaartheorieën bleken gerelateerd door middel van zogeheten dualiteiten. De kern van dit idee is dat twee theorieën op verschillende achtergronden gelijke fysica kunnen opleveren (zogeheten T-dualiteit). Hetzelfde geldt voor twee theorieën met verschillende koppelingsconstanten (zogeheten S-dualiteit). Uiteindelijk bleken alle vijf theorieën gerelateerd aan een unieke elfdimensionale theorie, die tot M-theorie werd omgedoopt. De betekenis van M kan variëren van Matrix of Membraan tot zelfs Moeder of Mysterie. In dit plaatje zijn de verschillende snaartheorieën perturbatieve expansies in verschillende parametergebieden van de onderliggende M-theorie, zoals aangegeven in figuur B.3.

De afgelopen jaren hebben dus een verbeterd begrip van de verschillende snaartheorieën en de opkomst van M-theorie laten zien. Desalniettemin blijft er een aantal open vragen. Een van de belangrijkste hiervan is de relatie met de experimenteel getoetste theorieën: is het mogelijk om bv. het SM uit te leggen aan de hand van M-theorie? Een andere onderzoeksrichting betreft de kosmologie. Zoals eerder aangegeven speelt de quantumgravitatie een belangrijke rol in het vroege universum, en de snaartheorie zal daarom voorspellingen kunnen doen aangaande inflatie, de expansie van het universum en de versnelling van deze uitdijning (mits recente astronomische waarnemingen bestand blijken tegen de tand des tijds). Derhalve hebben de kosmologische implicaties van M-theorie de laatste tijd veel aan belang-



**Figuur B.3:** *M*-theorie en de verschillende hoeken in de parameterruimte. Meer gedetailleerde informatie over de verschillende symbolen wordt in sectie 2.3 gegeven.

stelling gewonnen.

Bij deze onderzoeksvragen blijft de effectieve beschrijving van snaar- en *M*-theorie bij lage energieën, supergravitatie, een belangrijk instrument. Veel van de cruciale eigenschappen zoals de dualiteiten van snaartheorie zijn ook aanwezig in de supergravitatielimiet. In het bijzonder kan supergravitatie goed worden gebruikt voor het construeren van verschillende lagerdimensionale effectieve theorieën. Deze worden verkregen door zogeheten dimensionale reducties, waarbij een aantal van de ruimtelijke dimensies als een compacte en interne variëteit wordt gezien. Door deze reducties op verschillende manieren uit te voeren worden verschillende effectieve beschrijvingen verkregen.

In sommige gevallen zijn deze beschrijvingen zogeheten geijkte supergravitaties. Ongeijkte supergravitatie theorieën hebben een globale symmetriegroep, welke een gevolg is van de *S*- en *T*-dualiteiten van de onderliggende snaartheorieën. In geijkte supergravitatie wordt een subgroep van deze globale symmetrie lokaal gemaakt: door het invoeren van een extra parameter ontstaan de vereiste structuren, zoals covariante afgeleiden, voor de extra ijksymmetrie. Daarnaast leidt de combinatie van lokale supersymmetrie en de extra ijksymmetrie tot een nieuw ingrediënt: een potentiële energie voor de scalaire velden van de theorie.

Deze zogeheten scalaire potentiaal geeft aanleiding tot interessante eigenschappen van de geijkte supergravitatie. Het zorgt er bijvoorbeeld voor dat de vlakke Minkowski-metrick niet langer een oplossing is: afhankelijk van de potentiaal wordt de ruimtetijd nu gegeven door Anti-de Sitter, een domeinvlak of een kosmologische oplossing. Deze spelen een belangrijke rol in de zogeheten AdS/CFT equivalentie van Maldacena, haar DW/QFT generalisatie en modellen voor het versneld uitdijende universum. Een classificatie van geijkte supergravitatie theorieën zou daarom vanuit verschillende perspectieven van grote waarde zijn.

We zijn echter alleen geïnteresseerd in geijkte supergravitaties die te verkrijgen zijn uit snaar- of *M*-theorie. De procedure van dimensionale reductie biedt een nuttig instrument hiervoor: verschillende geijkte supergravitaties kunnen vanuit de achterliggende theorieën worden afgeleid. Onze aanpak bestaat uit het dimensionaal reduceren van 11D en 10D maximale supergravitatie tot lagerdimensionale geijkte maximale supergravitatie (met maximaal wordt het aantal superladingen bedoeld, te weten 32). Hierbij hebben we gebruik gemaakt van verschillende reducties, die allemaal supersymmetrie behouden. Het merendeel hiervan

is gebaseerd op het gebruik van symmetrieën, zoals door Scherk en Schwarz gepropageerd is. We bespreken ook de zogeheten cosetreducties, die niet op een symmetrie gebaseerd zijn.

De opbouw van deze dissertatie is als volgt. Als inleiding wordt in hoofdstuk 1 de historische achtergrond geschetst. Hoofdstuk 2 bestaat uit een inleiding in de snaar- en M-theorie, gevolgd door een uitvoeriger behandeling van de verschillende supergravitaties en hun relaties in hoofdstuk 3. Vervolgens worden in hoofdstuk 4 de verschillende dimensionele reducties uit de doeken gedaan, waarbij we ons beperken tot procedures die supersymmetrie behouden. In het bijzonder besteden we in secties 4.3-4.5 aandacht aan de zogeheten reducties met een twist, over een groepvariëteit en over een cosetvariëteit, respectievelijk. Sectie 4.6 is gewijd aan de mogelijkheid dat bewegingsvergelijkingen worden verkregen die niet uit een actieprincipe volgen. Dit besluit het algemenere gedeelte van dit proefschrift.

In hoofdstuk 5 worden bovengenoemde reducties toegepast bij de constructie van geijkte maximale supergravitaties in diverse dimensies. Primair worden in secties 5.3 en 5.4 de verschillende ijkingen in respectievelijk negen en acht dimensies onderzocht, die tot stand komen door reducties met een twist of over een groepvariëteit. Het blijkt dat de reducties tot negen dimensies met een  $SL(2, \mathbb{R})$ -twist aanleiding geven tot drie verschillende geijkte theorieën, wiens ééndimensionale ijkgroepen de subgroepen van  $SL(2, \mathbb{R})$  zijn. Daarnaast construeren we een vierde geijkte supergravitatie in negen dimensies, waarvan de bewegingsvergelijkingen niet uit een actieprincipe volgen. Deze theorie heeft een tweedimensionale niet-Abelse ijkgroep. In acht dimensies vallen de verschillende ijkingen in de Bianchi classificatie van driedimensionale Lie groepen. We stellen vijf verschillende theorieën op met driedimensionale ijkgroepen die binnen  $SL(3, \mathbb{R})$  liggen. Verder vinden we vijf geijkte theorieën die niet uit een Lagrangiaan volgen, waarvan de driedimensionale ijkgroepen binnen  $GL(3, \mathbb{R})$  liggen. Secundair komen in sectie 5.5 de zogeheten  $CSO$ -ijkingen in verschillende dimensies en hun relatie tot M- of snaartheorie aan bod. Deze worden verkregen door reducties over coset- of andere variëteiten. De nadruk wordt gelegd op de sector van deze theorieën met het graviton en de verschillende scalairen; in het bijzonder bespreken we de relatie tussen de dimensionele reductie en de scalaire potentiaal.

Daarnaast worden de domeinvlak-oplossingen van de geijkte theorieën geconstrueerd in hoofdstuk 6. Het D8-braan bijt het spits af in sectie 6.1, waarbij brontermen worden behandeld en de relatie met type I' snaartheorie duidelijk wordt gemaakt. Vervolgens construeren we de domeinvlakken van  $CSO$ -geijkte theorieën in sectie 6.2. Hierbij wordt de nadruk wordt gelegd op de relatie tussen geijkte supergravitaties en de verschillende branen van M- en snaartheorie. Het blijkt dat de dimensionele oxidatie van veel  $CSO$ -domeinvlakken bestaat uit distributies van M- of D-branen. In secties 6.3 en 6.4 wordt dieper ingegaan op de bijzondere eigenschappen van de domeinvlakken in negen en acht dimensies en de corresponderende distributies. Tot besluit worden intersecties van domeinvlakken, snaren en deeltjes in zowel tien als negen dimensies beschouwd in sectie 6.5.