

University of Groningen

## Kac-Moody Symmetries and Gauged Supergravity

Nutma, Teake Aant

**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:*

2010

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

*Citation for published version (APA):*

Nutma, T. A. (2010). *Kac-Moody Symmetries and Gauged Supergravity*. s.n.

### Copyright

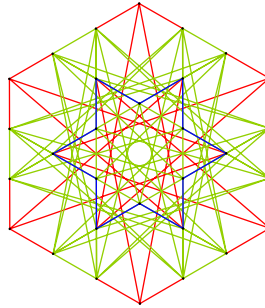
Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

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.



## Nederlandse samenvatting

De twee grote mijlpalen van de natuurkunde in de vorige eeuw zijn Einsteins ontdekking van de Algemene Relativiteitstheorie en de constructie van het Standaard Model van de deeltjesfysica. Voor beide gevallen geldt dat ze tot op zekere hoogte geleid zijn door wat men het principe van symmetrie zou kunnen noemen. Voor Einstein leidde dit tot het inzicht dat de wetten van de natuur hetzelfde zouden moeten zijn voor alle waarnemers, of ze nou rechtop staan of ondersteboven hangen, of stil staan of juist versnellen. Voor het Standaard Model houdt het in dat zijn voorspellingen onveranderd blijven onder de symmetrietransformaties van  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ .

Het grote falen van de natuurkunde in de vorige eeuw was wellicht het onvermogen om de Algemene Relativiteitstheorie en het Standaard Model te combineren. Deze gecombineerde theorie zou idealiter alle vier krachten in de natuur (te weten de sterke en zwakke kernkracht, het elektromagnetisme en de zwaartekracht) samen brengen onder één noemer. Een van de meest veelbelovende kandidaten voor deze allesomvattende theorie is, alhoewel het tot op heden niet in dit doel slaagt, de snaartheorie. Het uitgangspunt van de snaartheorie is om de puntdeeltjes van het Standaard Model te vervangen door eendimensionale objecten, de zogenoemde snaren. Het idee is dat alle bekende elementaire deeltjes overeen komen met verschillende vibraties van de snaren. De kracht van de snaartheorie, naast het feit dat het de oneindigheden van het Standaard Model 'gladwrijft', is dat één van deze vibraties het zwaartekrachtsdeeltje is. De zwaartekracht komt dus op natuurlijke wijze voort uit de snaartheorie.

Men zou misschien verwachten dat er slechts één enkele unieke theorie is die alle krachten van de natuur tegelijk beschrijft. Helaas voor de snaartheorie zijn er maar liefst vijf verschillende consistente snaartheorieën. Deze vijf theorieën worden Type I, Type IIA, Type IIB, Heterotische  $E_8 \times E_8$  en Heterotische  $SO(32)$  snaartheorie genoemd. Ze hebben allemaal een zekere mate van supersymmetrie (een symmetrie tussen krachtdeeltjes en materie), en ‘leven’ allemaal in tien ruimte-tijd dimensies. Dit zag er niet goed uit voor de snaartheorie, totdat de ontdekking werd gedaan dat de vijf verschillende theorieën verbonden zijn door zogenaamde dualiteitssymmetrieën. Daarnaast werd het vermoeden geopperd dat ze allemaal een limiet zijn van een tot op heden onbekende theorie in elf dimensies, M-theorie genaamd. Over M-theorie is vrij weinig bekend. Een van de weinige aanwijzingen die er zijn is de veronderstelde lage energie limiet: de unieke elfdimensionale supersymmetrische zwaartekracht (superzwaartekracht) theorie.

Net als de theorie zelf zijn de mogelijke symmetrieën van M-theorie een raadsel. Maar als ze bekend zouden zijn, dan kan het principe van symmetrie ons helpen in de zoektocht naar een duidelijke omschrijving van M-theorie. Een van de eisen van de symmetrieën van M-theorie is dat ze op zijn minst de dualiteiten tussen de vijf verschillende snaartheorieën moeten bevatten. Een bijkomende aanduiding volgt uit de superzwaartekracht: in bepaalde lage-dimensionale limieten laat de superzwaartekracht een oneindige symmetrie zien. Deze oneindige symmetrieën worden collectief Kac-Moody symmetrieën genoemd. Aangezien ze ook de dualiteitssymmetrieën bevatten, kan men het vermoeden poneren dat ze daadwerkelijk de symmetrie van M-theorie zijn. Echter, dit proefschrift zal geen van dergelijke sterke uitspraken bevatten. Het zal zich toeleggen op de unificerende rol van de Kac-Moody symmetrieën voor de verschillende superzwaartekracht theorieën.

De Kac-Moody symmetrieën laten zich wiskundig beschrijven in een zogenaamde Lie algebra. Het mooie van Lie algebras is dat ze zich kort en bondig laten samenvatten in een object dat hun structuur volledig vastlegt. Dit object wordt de Cartan matrix genoemd, en is niets meer dan een simpele matrix. In de vergelijking met een computerbestand is de Cartan matrix de ingepakte versie van het volledig uitgedrukte bestand. De vergelijking loopt alleen wel scheef doordat de ‘uitgedrukte’ Kac-Moody algebra daadwerkelijk oneindig is en op geen enkele harde schijf zou passen, terwijl de Cartan matrix ruim genoeg heeft aan een enkele kilobyte.

Alhoewel het goed begrepen is hoe het ‘uitpakken’ van de Kac-Moody algebra in zijn werk gaat, is de procedure omslachtig en in de praktijk niet tot in het oneindige door te voeren. Bovendien geeft het weinig inzicht in de volledige structuur van de Kac-Moody algebra, die tot op heden dan ook in nevelen gehuld is. Het beste wat we op dit moment kunnen doen is een klein deel van het oneindige object construeren, en dat vervolgens in stukjes hakken die we wel begrijpen. Dit proces is enigszins analoog aan hoe men een vierdimensionale hyperkubus kan begrijpen door hem te beschrijven in termen van driedimensionale kubussen, net zoals de kubus op zijn

beurt is opgebouwd uit een aantal vierkanten. De Kac-Moody algebras kunnen op vele verschillende manieren in stukjes worden gehakt, maar het interessantst zijn de gevallen waarin de resulterende stukjes overeenkomen met structuren die ook voorkomen in de superzwaartekracht theorieën. Eén enkele Kac-Moody algebra,  $E_{11}$  genaamd, beschrijft op deze manier de symmetrieën van de superzwaartekrachten met de meeste supersymmetrie in drie tot en met elf dimensies.

Bovendien, zo blijkt uit dit proefschrift, lijkt  $E_{11}$  daar bovenop ook nog eens alle mogelijke ijkdeformaties van de superzwaartekrachten te bevatten. Deze ijkdeformaties zijn van fenomenologisch belang doordat ze een deel van de supersymmetrie breken, en ze een effectieve kosmologische constante invoeren. Maar afgezien daarvan introduceren ze vrijheidsgraden die niet af te leiden zijn uit de unieke elfdimensionale superzwaartekracht theorie. Deze vrijheidsgraden zou men kunnen interpreteren als restanten van M-theorie, en in die hoedanigheid lijkt  $E_{11}$  informatie over M-theorie te bevatten.

Alhoewel de Kac-Moody algebras op elegante wijze de verschillende superzwaartekracht theorieën unificeren, zijn er ook een paar punten die niet geheel blijken te werken. Ten eerste voorspellen ze meer beperkingen op de ijkdeformaties dan dat er uit de analyse aan de kant van de superzwaartekracht volgen. Ten tweede komen de bewegingsvergelijkingen die volgen uit de Kac-Moody algebra slechts tot op een bepaalde hoogte overeen met die van de superzwaartekrachten. En tenslotte zijn de Kac-Moody algebras oneindig, wat inhoudt dat ze naast de bekende structuren uit de superzwaartekracht oneindig veel meer exotische structuren bevatten, die niet te relateren zijn aan ons bekende fysische theorieën.

Daarom is het dan ook te voorbarig om te stellen dat  $E_{11}$  daadwerkelijk de symmetrie van M-theorie is, laat staan de fundamentele symmetrie van de natuur. Veel stukjes van de puzzel passen perfect, maar het zijn de resterende niet-passende stukjes die ons doen vermoeden dat de Kac-Moody symmetrie  $E_{11}$  wellicht niet het hele verhaal is.

