

University of Groningen

## Dualities of strings and branes

Janssen, Bert

**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:*

1998

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

*Citation for published version (APA):*

Janssen, B. (1998). *Dualities of strings and branes*. 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

Elementaire deeltjesfysica, of hoge-energiefysica, is de tak van de natuurkunde die zich bezighoudt met het bestuderen van de elementaire deeltjes en hun wisselwerkingen. Aangezien de materie rondom ons is opgebouwd uit deze deeltjes, geeft de studie van elementaire deeltjes ons een idee van hoe de natuur in elkaar zit. In die zin behoort hoge-energiefysica tot het fundamenteel onderzoek: men zoekt niet direct naar bruikbare toepassingen, maar wil inzicht krijgen in hoe de wereld om ons heen functioneert en waarom hij zo functioneert.

In het algemeen is het zo: hoe kleiner de beschouwde structuren zijn waarnaar we kijken, hoe hogere energieën we nodig hebben om die structuren te zien. Dit komt doordat we, om het gedrag en de samenstelling van elementaire deeltjes te zien, andere (test)deeltjes erop moeten afschieten en kijken hoe die twee deeltjes onderling wisselwerken. Als we de testdeeltjes met steeds hogere energie afschieten (dit wil ruwweg zeggen: met steeds hogere snelheid), dringen ze steeds dieper door in het te bestuderen object en kunnen eventuele substructuren zichtbaar worden gemaakt.

Zo weten we bijvoorbeeld, dat atomen (waarvan men vroeger dacht dat het de elementaire bouwstenen van de materie waren) in feite bestaan uit een elektronenwolk die een hele kleine kern omringt. Die kern blijkt dan weer te zijn opgebouwd uit twee soorten deeltjes, die protonen en neutronen genoemd worden, en die op hun beurt weer opgebouwd zijn uit quarks. Voor zover we nu weten, hebben quarks en elektronen geen verdere substructuur meer en kunnen ze daarom “elementair” genoemd worden. Maar zoals inmiddels blijkt, is de term “elementair” een tijdsafhankelijk begrip en zal hij misschien in de toekomst niet meer van toepassing zijn op datgene wat er tegenwoordig mee wordt aangeduid.

Er zijn twee manieren om het gedrag van deze elementaire deeltjes te bestuderen: men kan ofwel experimenten doen waarbij de deeltjes met hoge energie op elkaar worden geschoten, vervolgens kijkt men dan hoe de deeltjes zich gedragen en probeert daaruit een theorie op te stellen die dit gedrag verklaart. Of men kan uitgaan van een centraal idee, hier rond een goede theorie bouwen en dan kijken of deze theorie experimentele toetsen kan doorstaan. In dit proefschrift houden wij ons bezig met de laatste werkwijze: de theoretische hoge-energiefysica.

Zo'n centraal idee kan bijvoorbeeld symmetrie zijn. Symmetrie is een eigenschap van een theorie die zegt dat de vorm van de theorie niet verandert als we er een bepaalde operatie, een symmetrietransformatie, op uitvoeren. Zo verandert een theorie die translatiesymmetrie heeft, niet als we het coördinatenstelsel verschuiven van één punt in de ruimte naar een ander punt. Fysisch betekent dit dat de wetten van de natuurkunde in de hele ruimte dezelfde zijn. Theorieën met veel symmetrie zijn ook gemakkelijker om mee te werken, omdat de symmetrie het probleem vereenvoudigt. In een theorie met translatiesymmetrie bijvoorbeeld hoef je een resultaat maar voor één punt te berekenen, de resultaten in de rest van de ruimte zijn dezelfde. Ook mogen er geen expliciete positie-afhankelijkheden in de formulering van de theorie voorkomen, omdat anders de translatiesymmetrie gebroken wordt. De symmetrie beperkt dus ook de mogelijke

formuleringen van de theorie.

De op dit moment algemeen aanvaarde theorie voor elementaire deeltjes is het zogenaamde Standaardmodel, dat zowel een classificatie van de deeltjes geeft als een beschrijving van hun wisselwerkingen onder drie fundamentele interacties: de sterke, de zwakke en de elektromagnetische interactie. Het Standaardmodel gaat uit van het centrale idee van ijkinvariantie. Ijkinvariantie is een interne symmetrie die stelt dat deeltjes in families (multipletten) verdeeld kunnen worden en dat de verschillende leden van zo'n multiplet zich symmetrisch moeten gedragen. Verder worden de interacties verklaard door de uitwisseling van zogenaamde ijkdeeltjes, die ook weer in multipletten voorkomen. Dit alles beperkt de mogelijke interacties heel sterk. Experimenteel gezien is het Standaardmodel een erg succesvolle theorie: de resultaten stemmen tot op heel hoge precisie overeen met de experimenten en de theorie was in staat om voorspellingen te doen die later experimenteel bevestigd werden.

Er is echter nog een vierde fundamentele interactie in de natuur waarmee het Standaardmodel helemaal geen rekening houdt, namelijk de zwaartekracht. De zwaartekracht wordt verklaard in een andere theorie: de algemene relativiteitstheorie (ART). Deze gaat uit van het principe dat de natuurwetten dezelfde moeten zijn voor alle waarnemers en beschrijft zwaartekracht als een vervorming van de ruimte door de aanwezige materie. Ook de ART is vanuit experimenteel oogpunt een succesvolle theorie: zij kan fenomenen beter verklaren dan de traditionele theorie van Newton en meerdere voorspellingen zijn experimenteel bevestigd.

Het feit dat deze twee theorieën, elk op hun eigen gebied, het zo goed doen, komt omdat de invloed van het ene verschijnsel op het andere erg klein is: in versnellerexperimenten is de zwaartekracht tussen de elementaire deeltjes veel te zwak om er iets van te merken, terwijl men de ART meestal gebruikt voor de bewegingen van hemellichamen, waarbij krachten tussen elementaire deeltjes niet van belang zijn.

Toch blijft het vreemd dat we twee totaal onafhankelijke theorieën hebben, die allebei dezelfde natuur proberen te beschrijven. Als beide theorieën uitgaan van zulke centrale principes, zou het dan niet meer voor de hand liggen als deze principes in beide theorieën zouden voorkomen? Met andere woorden: zou het niet logischer zijn als we een geïntegreerde theorie hadden, die zowel het gedrag van elementaire deeltjes als de effecten van zwaartekracht beschrijft?

Zoals gezegd, op experimentele gronden is er niets aan de hand, omdat beide theorieën binnen hun eigen bereik erg succesvol zijn. Maar op theoretische gronden kan men zien dat er vroeg of laat problemen ontstaan. Immers, als we in botsingsexperimenten de energie maar blijven opdrijven, zou de zwaartekracht alsnog sterker worden, aangezien deze net zozeer aan massa als aan energie koppelt. Vanaf een bepaalde schaal (de Planck-energie of de Planckmassa) zou de invloed van de zwaartekracht zelfs net zo groot worden als die van andere krachten in het Standaardmodel, en zou geen van de twee theorieën meer een goede beschrijving kunnen geven van de experimenten. Deze energieschalen liggen weliswaar ver buiten het bereik van de huidige deeltjesversnellers, maar het (theoretische) probleem is gesteld.

Het vinden van een geünificeerde beschrijving van elementaire deeltjesfysica en zwaar-

tekracht is één van de grote uitdagingen van de moderne hoge-energiefysica. Dit is zo moeilijk omdat men bij pogingen om de typische quantum-effecten van elementaire deeltjesfysica te incorporeren in ART (die niet-quantummechanisch is), steeds tegen grote wiskundige problemen oploopt.

Eén van de veelbelovende kandidaten voor een theorie van quantum-zwaartekracht is de stringtheorie. Deze gaat uit van het idee dat de elementaire deeltjes niet puntvormig zijn, zoals we ons die intuïtief voorstellen, maar ééndimensionale objecten, snaartjes (Engels: strings). Deze snaren kunnen, net als de snaren van een gitaar, trillen en de verschillende trillingswijzen (die bij een gitaar overeenkomen met verschillende toonhoogtes) corresponderen hier met verschillende deeltjes, onder andere ook die van het Standaardmodel. Het feit dat er nog niets gemerkt is van de snaarstructuur van deeltjes, komt volgens de theorie doordat de afmeting van de snaartjes zo klein is, dat ze vanaf “grote” afstanden (afstanden te vergelijken met structuren zoals in het Standaardmodel) puntvormig lijken. Maar dit houdt tegelijkertijd in, dat om deze snaarstructuur te detecteren zulke hoge energieën nodig zijn, dat de eerstvolgende generaties versnellers nog volkomen ontoereikend zullen zijn.

Ondanks het grote gebrek aan experimentele gegevens blijkt de stringtheorie toch erg interessant te zijn. Immers, één van de deeltjes die in de stringtheorie voorkomen, blijkt het graviton te zijn, het ijkdeeltje van zwaartekracht. Dit betekent dat zwaartekracht al automatisch in de stringtheorie ingebouwd zit en dat we ART als speciale limiet kunnen terugvinden. Verder vinden we nog allerlei symmetriestructuren, die lijken op de iksymmetrieën van het Standaardmodel, zodat dit inderdaad wijst in de goede richting.

Toch is er nog veel werk aan de winkel: de stringtheorie is namelijk nog alles behalve volledig. De tot voor kort gebruikte formulering is gebaseerd op storingstheorie, waarbij wordt uitgegaan van de eenvoudige situatie dat de snaren onderling geen wisselwerking hebben: de interacties worden dan gezien als een storing op deze ideale situatie. Zo'n benadering is relatief goed zolang de storing (de koppeling tussen de snaren) klein blijft, want zolang kunnen technieken (storingsrekening) gebruikt worden om resultaten te berekenen. In principe kan men dan weer storingen op deze storingen gaan berekenen, enz., maar in de praktijk houdt het snel op, omdat de berekeningen al snel te groot worden. Bovendien is de benadering alleen maar houdbaar als de storingen klein blijven. Bij sterke interacties tussen de snaren (meestal juist de interessantste situatie) is deze methode echter niet meer te betrouwen: men heeft op deze manier namelijk geen idee van wat er gebeurt in zogenaamde niet-storingseffecten.

Ten tweede is het problematisch om het Standaardmodel terug te vinden als lage-energie-benadering van de stringtheorie. Uit consistentie-eisen blijkt dat de snaren zich in een tiendimensionale ruimte-tijd moeten voortbewegen, terwijl de ons bekende wereld van ART en van het Standaardmodel vierdimensionaal is (de drie ruimte-dimensies en de tijd). De verklaring daarvoor is dat zes van die tien dimensies zo klein zijn (van de orde van de snaar zelf) dat ze bij lage energieën niet te zien zijn en er bestaat een techniek (dimensionele reductie) die resultaten van de tiendimensionale ruimte kan vertalen naar een effectieve vierdimensionale ruimte. Afhankelijk van hoe de dimensionele reductie gedaan wordt, kunnen allerlei symmetriegroepen verschijnen, waarvan sommige zelf erg

veel op die van het Standaardmodel lijken. Maar er zijn nog vele andere mogelijkheden en er is niets dat wijst op een goede reden waarom nu precies die ene reductie verkozen moet worden boven alle andere.

Een derde probleem, misschien wel het meest vervelende, is dat er niet één versie van de stringtheorie bekend is, maar vijf verschillende, met elk hun eigen deeltjes en storingsbenadering. Dit is natuurlijk geen aantrekkelijk idee voor een unificerende theorie. Tot voor kort meende men dan ook dat vroeg of laat sommige van die theorieën inconsistent en/of equivalent zouden blijken te zijn en dat er (hopelijk) uiteindelijk één zou overblijven.

In de laatste paar jaren is er echter in korte tijd veel vooruitgang geboekt. Zoveel zelfs dat er sprake is van een heuse stringrevolutie. Deze ontwikkelingen hebben het idee van dualiteiten geïntroduceerd, een soort symmetrie die zegt dat verschillende formuleringen van een theorie aan elkaar gerelateerd kunnen worden (dual zijn), hetgeen hen in feite equivalent maakt. Resultaten van de ene formulering kunnen via de dualiteitstransformaties vertaald worden naar de andere formulering. Binnen de groep van stringtheoretici wordt veel verwacht van deze dualiteiten; het zou zelfs één van de fundamentele principes kunnen zijn, nodig om de theorie te begrijpen.

Zo blijkt bijvoorbeeld dat een theorie gereduceerd op een groot volume dual is aan dezelfde theorie gereduceerd op een klein volume. De dualiteitstransformatie die daar voor zorgt, heet  $T$ -dualiteit en relateert dus op een verrassende manier grote en kleine lengteschalen. Maar het verschil tussen formuleringen op een groot en een klein volume is precies het verschil tussen twee manieren om een theorie dimensioneel te reduceren (van tien naar vier dimensies bijvoorbeeld).  $T$ -dualiteit stelt dus dat verschillende reducties equivalent kunnen zijn en verdeelt de verschillende mogelijke compactificaties in equivalentieklassen. Hoewel we daarmee nog niet het probleem hebben opgelost welke reductie verkozen moet worden boven andere, is het tenminste significant gereduceerd.

$S$ -dualiteit is een dualiteit die inzicht kan geven in het gebied dat verder ligt dan de storingstheorie. Zoals gezegd is het erg moeilijk om betrouwbare resultaten te krijgen als de koppeling (de interacties tussen de snaren) erg sterk wordt, omdat storingsrekening dan niet meer toereikend is.  $S$ -dualiteit, ook wel sterke/zwakke-koppelingsdualiteit genoemd, stelt dat als de koppeling erg groot wordt, er een duale formulering gevonden kan worden waarin de snaren weer zwak gekoppeld zijn. In deze duale formulering kunnen we dan weer gewoon storingsrekening gebruiken. En omgekeerd: het sterke-koppelingsgebied van de duale formulering komt weer overeen met het zwakke-koppelingsgebied van de originele theorie. Op die manier zijn niet-storingsresultaten toch vrij gemakkelijk te verkrijgen uit storingsrekening.

Niet alleen binnen eenzelfde theorie blijken verschillende formuleringen dual te zijn, maar ook hele theorieën kunnen via dualiteiten aan elkaar gerelateerd worden. Zo kan één theorie op een klein volume precies dezelfde blijken te zijn als een andere theorie op een groot volume, of kan het sterke-koppelingsgebied van de ene overeenkomen met het zwakke-koppelingsgebied van de andere.  $T$ - en  $S$ -dualiteit spannen dus een heel net op van dualiteitsrelaties tussen de vijf stringtheorieën. Deze zijn dan misschien op het eerste gezicht (in het storingsgebied) erg verschillend, maar, met niet-storingseffecten

in rekening gebracht, in feite equivalent.

Samen met de ontdekking van dit dualiteitsnet is ook het idee ontstaan dat de vijf stringtheorieën misschien niet de finale theorieën zijn waarnaar we op zoek zijn, maar eigenlijk verschillende benaderingen van een nog niet ontdekte, onderliggende theorie. De dualiteitstransformaties relateren dan deze benaderingen met elkaar. Die onderliggende theorie, wordt meestal  $M$ -theorie genoemd, al weet niemand precies waarvoor die “ $M$ ” staat (Moeder, Membraan, Mysterie, ...). Ook is het nog helemaal niet duidelijk hoe  $M$ -theorie eruit ziet en of snaren uiteindelijk nog wel de elementaire bouwstenen van de theorie zijn.

Immers, een andere bijdrage van de dualiteiten aan de stringtheorie is dat, naast snaren, ook andere objecten voorkomen: puntdeeltjes, membranen, drie-, vier-, en nog hoger-dimensionale objecten. Deze worden  $p$ -branen genoemd, (in analogie met membranen) waar  $p$  het aantal dimensies is van het object. De dualiteitstransformaties spannen een web tussen al deze objecten, net zoals ze dat doen tussen de theorieën: sommige  $p$ -branen kunnen via  $T$ -dualiteit gerelateerd worden aan  $(p+1)$ - of  $(p-1)$ -branen, dus aan objecten die net één dimensie groter of kleiner zijn. Sterke/zwakke-koppelingsdualiteit zegt dan bijvoorbeeld weer dat een sterk gekoppelde snaar equivalent is aan een zwak gekoppelde 5-braan. We hadden dus net zo goed van een “5-branentheorie” kunnen uitgaan als van een stringtheorie. In feite is een string net zo veel of zo weinig fundamenteel als elke andere  $p$ -braan. En dit maakt het er natuurlijk niet gemakkelijker op om een goede formulering van  $M$ -theorie te vinden.

We zien dus dat dualiteiten en  $M$ -theorie een heel ander beeld geven van (wat vroeger bekend stond als) de stringtheorie dan datgene wat we tot voor kort hadden. En ondanks het feit dat het centrale deel van het nieuwe beeld nog erg vaag blijft, kunnen toch al heel wat implicaties ervan getest worden. Immers, een essentiële veronderstelling in het geheel is dat de dualiteiten tussen de vijf stringtheorieën correct zijn. Door deze te testen, toetsen we ook indirect het  $M$ -theorie-beeld. Bovendien leveren de dualiteitstransformaties een beter begrip op van hoe de stringtheorie zelf in elkaar zit (denk maar aan de niet-storingseffecten en  $S$ -dualiteit).

Als twee theorieën dual aan elkaar zijn, moet die dualiteit natuurlijk in alle sectoren terug te vinden zijn: zowel in de lage-energielimit, in de oplossingen, als in de dynamica van de theorie. Omgekeerd, gegeven een dualiteit tussen één theorie en een andere, kunnen we ons beeld van de ene theorie vervolledigen dankzij de kennis van de andere: nieuwe oplossingen construeren uit oude bijvoorbeeld, of de dynamica afleiden uit die van een duale theorie.

In dit proefschrift hebben we beide dingen gedaan: zowel het testen van de dualiteiten op de verschillende niveaus van de theorie, als het gebruiken van de dualiteiten om resultaten mee af te leiden. Na een drietal inleidende hoofdstukken, waarin we iets dieper ingaan op de probleemstelling en een introductie geven in de basisbegrippen van de stringtheorie en dualiteiten, onderzoeken we in hoofdstuk 4 uitvoerig de symmetrieën van de lage-energielimiten van de verschillende theorieën. We schrijven de dualiteitsregels op die deze lage-energielimiten onderling relateren en vinden dat deze overeenkomen met de dualiteitsrelaties tussen de stringtheorieën waarvan de lage-

energielimiten beschouwen.

In hoofdstuk 5 kijken we naar de  $p$ -braan-oplossingen van de stringtheorie, en meer in het bijzonder naar de manieren waarop meerdere van zulke  $p$ -branen samen kunnen voorkomen en elkaar kunnen snijden. Dergelijke intersecties zijn interessant omdat, ze na dimensionale reductie oplossingen opleveren in lagere dimensies. Een classificatie van de mogelijke intersecties in de stringtheorie geeft een overzicht van de verschillende oplossingen in bijvoorbeeld een vierdimensionale ruimte-tijd als de onze.

Hoofdstuk 6 gaat over de dynamica van de oplossingen. Die wordt gegeven door een wiskundige uitdrukking, die men de effectieve actie van de oplossing noemt. Zoals gezegd moeten de dualiteitsrelaties die tussen de oplossingen bestaan, ook tussen de effectieve acties van deze oplossingen terug te vinden zijn. We geven een overzicht van deze effectieve acties, tonen de dualiteiten aan en construeren aan de hand daarvan de effectieve actie van een bepaalde oplossing (de Kaluza-Klein monopool).

De laatste jaren zijn in een snel tempo nieuwe vorderingen gemaakt in de stringtheorie, en dat zal nog wel even blijven duren. In de tijd die er nodig was om dit proefschrift te schrijven, zijn er weer ontwikkelingen geweest, die veelbelovend lijken. Eén ding is duidelijk: of er nu al dan niet snel een goede formulering van  $M$ -theorie gevonden wordt, zelfs of  $M$ -theorie nu wel of niet de uiteindelijke, langgezochte “theorie van alles” blijkt te zijn, dualiteiten hebben zich een blijvende, belangrijke plaats weten te verwerven in de stringtheorie en meer algemeen, in de hoge-energiefysica.

# Dankwoord

Het tot stand komen van dit proefschrift werd mogelijk gemaakt door de steun van de Stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie (F.O.M.) in Utrecht. Het maakte deel uit van hun onderzoeksprogramma en gebeurde op het Instituut voor Theoretische Natuurkunde van de RuG.

Ik zou graag de volgende mensen willen bedanken voor hun hulp in de verschillende fasen van dit proefschrift: op de eerste plaats mijn begeleiders Eric Bergshoeff en Mees de Roo, die mij in de afgelopen vier jaar wegwijs hebben gemaakt in de wereld van de theoretische hoge-energiefysica. Ik ben blij dat ik met hen heb kunnen samenwerken in de verschillende projecten. Zowel hun stimulerende begeleiding bij het onderzoek, als het kritisch doorlezen van het manuscript droegen essenti el bij tot het bereikte resultaat. Ook mijn promotor, David Atkinson, en de leescommissie, bestaande uit professor Bernard de Wit, professor Ulf Lindstr m en professor Walter Troost, ben ik erg erkentelijk voor het aandachtig lezen van het proefschrift.

Verder wil ik ook de mensen bedanken met wie ik de afgelopen jaren heb mogen samenwerken: de mede-AIO's en -OIO's van onze groep, Harm Jan Boonstra, Eduardo Eyraes en Jan Pieter van der Schaar en de buitenlandse gasten Tom s Ort n en Klaus Behrndt. Voor de technische problemen waar nodig kon ik steeds terecht bij Jeroen Nijhof, Antony Hams, Manuel Reenders en Luuk van Dijk en voor organisatorische hulp bij de secretarissen Iris de Roo-Kwant, Ynske Joustra en Carina Wiegman. Ook denk ik nog met veel plezier terug aan de tafeltennistoernooien en koffietafelgesprekken (al dan niet over natuurkunde) met de studenten, promovendi en hoogleraren van het Instituut.

Mijn Groningse vriendenkring van buiten het Instituut ben ik dankbaar voor het sociale leven dat ik de stad heb kunnen opbouwen. In het bijzonder denk ik dan aan de mensen van het studentenkoor C.S.G. Gica en het dubbelkwartet Stella Cantorum (het vroegere Sch tzkoortje). Met hen heb ik vele inspirerende en muzikale uren doorgebracht.

Mijn speciale dank gaat echter uit naar mijn directe familie. A F tima, por el apoyo moral y ps quico d a tras d a. La admiro por el valor y la determinaci n que ha mostrado en los  ltimos a os. En mijn ouders voor hun nimmer aflatende steun en vertrouwen, niet alleen in de laatste vier jaar dat ik hier in Groningen verbleef, maar ook voor in alle jaren daarvoor. Allen hebben, op hun manier, een niet te onderschatten rol gespeeld in het tot stand komen van dit proefschrift.