

University of Groningen

Symmetries in string theory

Boonstra, Harm Jan Hugo

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:

1996

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

Citation for published version (APA):

Boonstra, H. J. H. (1996). *Symmetries in string theory*. 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

De elementaire deeltjesfysica heeft als doel de verscheidenheid aan elementaire deeltjes en hun onderlinge wisselwerkingen beter te begrijpen. Elementaire deeltjes zijn de bouwstenen van materie. Vooral elektronen en quarks zijn typische bouwstenen omdat, zoals we weten, atomen uit een door elektronen omringde kern van protonen en neutronen bestaan, waarbij deze laatste op hun beurt opgebouwd zijn uit quarks. We noemen deeltjes elementair als ze, voor zover bekend, niet opgebouwd zijn uit nog kleinere deeltjes. In deze zin zijn protonen en neutronen dus niet elementair, maar quarks en elektronen wel.

Voor het opstellen en testen van theorieën over het gedrag van elementaire deeltjes zijn experimenten waarbij verschillende deeltjes met elkaar in botsing worden gebracht van groot belang. Tijdens de botsing vinden interacties plaats die tot resultaat kunnen hebben dat andere deeltjes verschijnen en waargenomen worden. Een algemene regel is dat hoe kleiner de structuur is die onderzocht wordt, hoe hoger de energieën van de botsende deeltjes moeten zijn (ze dringen dan dieper in elkaar door). De elementaire deeltjesfysica wordt daarom ook wel hoge-energie fysica genoemd.

De huidige fundamentele theorie van elementaire deeltjes is 'het standaardmodel'. Deze is ontstaan na jaren van spuurwerk naar orde en structuur in de experimentele gegevens en na uitgebreide selectie van theoretische modellen. Om het standaardmodel te testen wordt het gebruikt voor het voorspellen van uitkomsten van nieuwe experimenten. Tot nu toe heeft het standaardmodel deze beproevingen met succes doorstaan, al zijn er naar het zich laat aanzien recentelijk enige afwijkingen gevonden.

Het standaardmodel beschrijft alle bekende elementaire deeltjes, waaronder quarks en elektronen, en hun onderlinge wisselwerking ten gevolge van drie fundamentele interacties of krachten. Dit zijn de elektromagnetische, zwakke en sterke interacties. Deze laatste bijvoorbeeld, is verantwoordelijk voor het bijeenhouden van de deeltjes in een atoomkern. In het standaardmodel zijn de drie krachten zeer nauw gerelateerd aan symmetrieën, via het zogenaamde ijkprincipe. Een symmetrie houdt in dat de vergelijkingen van de theorie dezelfde vorm behouden na bepaalde wiskundige bewerkingen (symmetrietransformaties). Een eenvoudig voorbeeld is translatiesymmetrie, waarbij de vergelijkingen dezelfde vorm behouden na willekeurige verschuivingen van het gebruikte assenstelsel. Dit correspondeert met de observatie dat de natuurwetten overal in het heelal hetzelfde zijn. Een ander voorbeeld is rotatiesymmetrie, waarbij de vergelijkingen dezelfde vorm behouden na willekeurige rotaties van het assenstelsel. Bij de iksymmetrieën van het standaardmodel werken de symmetrietransformaties niet op het coördinatenstelsel van de ruimte, maar zijn het een soort rotaties in een interne ruimte van variabelen die de verschillende elementaire deeltjes representeren. We kunnen een symmetrietransformatie meestal beschouwen als een verandering van referentiesysteem waarbij de theorie onveranderd blijft. Het kenmerkende van iksymmetrie is dat die verandering van referentiesysteem in elk punt van de ruimte en op elk tijdstip onafhankelijk gekozen mag worden. Het ijkprincipe houdt nu in dat het aantal mogelijke interacties tussen de verschillende deeltjes beperkt is omdat deze allemaal aan de symmetrie moeten

gehoorzamen. Aangezien deze beperkingen experimenteel worden bevestigd, is ijsymmetrie een belangrijke leidraad gebleken op weg naar betere theorieën in de elementaire deeltjesfysica.

Het standaardmodel is een quantumtheorie. Sinds het begin van deze eeuw is bekend dat de natuurkunde op microscopische schaal, en dus zeker de elementaire deeltjesfysica, bijzondere eigenschappen bezit die we normaal gesproken niet zien op voor ons meer natuurlijke lengteschalen. Dit zijn quantummechanische eigenschappen. Op zeer kleine schaal wordt onder meer duidelijk dat de golven in een elektromagnetisch veld gequantiseerd zijn in pakketjes met bepaalde energieën. Deze kunnen we interpreteren als deeltjes. Voor het elektromagnetische veld worden deze deeltjes fotonen genoemd. In het standaardmodel worden alle interacties verklaard door de uitwisseling van dit soort elementaire deeltjes, ook wel ijkbosonen genoemd.

Het is bekend dat het standaardmodel geen volledige theorie kan zijn. Het bevat namelijk geen enkele referentie aan de zwaartekracht, terwijl een volledige theorie alle elementaire deeltjes inclusief alle mogelijke wisselwerkingen zou moeten beschrijven. Nu is het zo dat bij botsingsexperimenten met elementaire deeltjes helemaal niets van de zwaartekracht te merken is; deze is gewoon veel te zwak en valt in het niet bij de andere krachten. Voor de zwaartekracht beschikken we over een afzonderlijke theorie: Einstein's algemene relativiteitstheorie. Deze verklaart gravitatie in termen van de geometrie van de vier-dimensionale ruimte-tijd. Zo geeft het een zeer nauwkeurige beschrijving van de bewegingen van hemellichamen ten opzichte van elkaar, waarvoor overigens de veel oudere theorie van Newton ook meestal een zeer goede benadering is. Dat op grote schaal (tussen grote objecten en over grote afstanden) de zwaartekracht het kennelijk wint van de andere krachten kan begrepen worden uit het feit dat de zwaartekracht uitsluitend aantrekkend is (en niet zoals bijvoorbeeld de elektromagnetische kracht soms afstotend en soms aantrekkend afhankelijk van de ladingen) en zijn sterkte maar langzaam afneemt met de afstand.

Een van de grote vraagstellingen binnen de theoretische hoge-energie fysica is hoe deeltjesfysica (het standaardmodel) en gravitatie (de algemene relativiteitstheorie (ART)) verenigd kunnen worden in één theorie. Dat ze niet zomaar te verenigen zijn blijkt als we bedenken dat de ART een klassieke, dat wil zeggen niet-quantummechanische theorie is. Als je echter elementaire deeltjes zou kunnen versnellen tot extreem hoge energieën, dan zou de zwaartekracht op een gegeven moment significant moeten worden, want volgens de ART koppelt de zwaartekracht net zo goed aan energie als aan massa. Ook verwacht men dat quantummechanische effecten van de zwaartekracht dan een belangrijke rol gaan spelen. Dergelijke extreme energieën (in de buurt van de zogenaamde Planck energie of Planck massa) zijn weliswaar niet te realiseren in deeltjesversnellers, maar waren hoogstwaarschijnlijk bij het ontstaan van het heelal alomtegenwoordig. Natuurlijk heeft men geprobeerd, en probeert men nog steeds, een quantummechanische versie van de ART te construeren, zij het zonder enige experimentele aanwijzing. Vanwege grote wiskundige problemen is dit tot nu toe niet gelukt.

Een andere aanwijzing voor het niet compleet zijn van het standaardmodel is de aanwezigheid van vele parameters in de theorie. Deze parameters, bijvoorbeeld de massa's van de elementaire deeltjes, moeten 'met de hand in de theorie worden gestopt', zodanig

dat er overeenstemming is met experimentele bevindingen. Men kan zich voorstellen dat hoe meer van dit soort parameters een theorie heeft, des te kleiner haar voorspellende kracht is. Het zou fraaier zijn als uiteindelijk deze parameters hun waarde uit de theorie zelf krijgen.

Op het ogenblik wordt er veel theoretisch onderzoek gedaan naar wat waarschijnlijk de beste kandidaat is voor een volledige theorie die de zwaartekracht met de deeltjesfysica combineert: stringtheorie. Wellicht het belangrijkste idee van stringtheorie is dat het concept van puntvormig deeltje (zoals we ons een elementair deeltje meestal voorstellen) wordt vervangen door dat van een string of snaar, d.w.z. een één-dimensionaal object. In tegenstelling tot een puntdeeltje heeft een snaar inwendige vrijheidsgraden, omdat hij op tal van manieren kan trillen. De verschillende trillingstoestanden van een snaar kunnen dan verschillende elementaire deeltjes representeren, zoals verschillende trillingen van een vioolsnaar verschillende tonen produceren. Het zal duidelijk zijn dat een snaartje dat alle elementaire deeltjes verenigt minuscule klein moet zijn, ook al omdat het nog nooit gedetecteerd is.

Door bestudering van de mogelijke trillingstoestanden van een string kan uitgerekend worden welke deeltjes met welke eigenschappen door stringtheorie beschreven worden. De verzameling van deze deeltjes wordt het spectrum genoemd. Een van de grote verrassingen van stringtheorie is dat het spectrum een deeltje bevat dat precies de eigenschappen heeft van het graviton, het quantum (gequantiseerd energiepakketje of deeltje) van het zwaartekrachtsveld. Bovendien lijkt stringtheorie gevrijwaard te zijn van de moeilijkheden die optreden bij pogingen om rechtstreeks een quantummechanische versie van de theorie van de zwaartekracht te construeren. Naast het graviton bevat het spectrum nog een oneindig aantal andere deeltjes. Slechts een eindig aantal hiervan is massaloos, en daaronder bevinden zich ook ijkbosonen, de deeltjes die geassocieerd worden met krachten, zoals die van het standaardmodel.

Stringtheorie zou dus in principe een volledige theorie voor alle elementaire deeltjes en alle krachten kunnen zijn. Een duidelijk probleem is echter, zoals hiervoor al gebleken is, dat de meeste voorspellingen van stringtheorie (nog) niet experimenteel getest kunnen worden. Daarvoor zijn de energieën waarbij karakteristieke string effecten of quantumgravitatie effecten optreden veel te hoog. Het is wèl mogelijk om een benadering van stringtheorie te bestuderen die alleen geldig is bij lage energieën. Deze zou voorspellingen kunnen opleveren die ook experimenteel getest kunnen worden. Voordat het zover is moeten er nog wel enige technische (wiskundige) moeilijkheden overwonnen worden.

Stringtheorie heeft in tegenstelling tot het standaardmodel geen vrije parameters. Dat betekent dat alle waarden van bijvoorbeeld massa's van deeltjes, maar zelfs het aantal dimensies van de ruimte waarin we leven, zouden moeten volgen uit de vergelijkingen van de theorie zelf. Dat is op zich een gewenste eigenschap, maar het wijst ons wel op tekortkomingen van de huidige formulering van stringtheorie. Het standaardmodel met al z'n parameters zou op de een of andere manier als vier-dimensionale lage-energielimit van stringtheorie tevoorschijn moeten komen. Nu blijkt inderdaad dat stringtheorie oplossingen heeft die veel op het standaardmodel lijken. Het probleem is dat er nog veel en veel meer oplossingen zijn en dat voor stringtheorie al deze oplossingen even goed of

even slecht zijn. De huidige formulering van stringtheorie lijkt dan ook niet compleet te zijn. Bovendien is deze formulering gebaseerd op storingsrekening. Processen waarbij strings wisselwerken kunnen daarin bij benadering berekend worden. Voor elke verbetering in de benadering moet een extra term uitgerekend worden, corresponderend met de uitwisseling van een extra string tijdens het proces. Het is een onmogelijke opgave om al deze correctietermen te berekenen (er zijn er in principe oneindig veel), en in de praktijk wordt dan ook meestal alleen naar de laagste orde benadering gekeken. Deze benadering is beter naarmate de koppeling tussen strings (de sterkte van hun interactie) kleiner is. Maar ongetwijfeld zijn er ook belangrijke effecten die zowieso niet met behulp van storingsrekening kunnen worden berekend, zogenaamde niet-storingseffecten. Als we bijvoorbeeld in detail willen weten welke voorspellingen stringtheorie doet bij lage energieën, of hoe eventueel het standaardmodel uiteindelijk tevoorschijn komt, dan zullen we eerst een beter begrip van niet-storingseffecten moeten hebben.

Tot zover de inleiding. Nu zal ik vertellen waar dit proefschrift nou eigenlijk over gaat. Symmetrieën spelen een belangrijke rol in het standaardmodel en in de algemene relativiteitstheorie. Stringtheorie combineert symmetrieën van standaardmodel en ART in een nog veel grotere groep van symmetrieën. De verwachting is dat een beter begrip van deze symmetrieën kan bijdragen tot een meer volledige formulering van stringtheorie. In dit proefschrift worden enkele van de symmetrieën in stringtheorie onderzocht. Het grootste deel van het proefschrift gaat over generalizaties van stringtheorie gebaseerd op uitbreidingen van een belangrijke onderliggende symmetrie. Stringtheorie is namelijk niet uniek, zo lijkt het. Het meest bekend zijn de superstring modellen. Dit zijn de beste kandidaten voor een volledige elementaire deeltjestheorie. Maar er zijn meer mogelijkheden.

Zoals het traject van een deeltje dat zich in een bepaalde ruimte voortbeweegt een lijn is, is het traject van een string een twee-dimensionaal oppervlak. Stringtheorie kan dan geformuleerd worden op zo'n twee-dimensionaal oppervlak. Dit wordt uitgebreid beschreven in hoofdstuk 2 van dit proefschrift. Nu is het zo dat de parametrisatie van het twee-dimensionale oppervlak er niet toe mag doen; de theorie moet invariant zijn onder 'herparametrisaties' van dit oppervlak; dit is derhalve een symmetrie (en wel een ijksymmetrie) van stringtheorie. Het blijkt mogelijk te zijn om deze symmetrie uit te breiden. De uitbreidingen zoals beschreven in dit proefschrift worden W -symmetrieën genoemd en de stringtheorie hierop gebaseerd heet W -string. Symmetrieën worden, wiskundig gezien, beschreven door groepen of algebra's. In het geval van de W -symmetrieën zijn deze algebra's (W -algebra's) niet-lineair en dat maakt de analyse ervan nogal ingewikkeld. Om deze situatie te verbeteren hebben we vereenvoudigingen ontwikkeld in de formulering van W -strings. Deze vereenvoudigingen ontstaan na speciale transformaties van de variabelen en hebben ons in staat gesteld meer te weten te komen over onder andere het spectrum van W -strings. Gedetailleerde berekeningen zijn gedaan voor een string gebaseerd op de W_4 algebra. Het berekenen van het spectrum gebeurt in het zogenaamde BRST formalisme. Dit is een formalisme dat geschikt is voor de kwantisatie (de constructie van een quantummechanische versie) van theorieën met ijksymmetrie. Het is gebleken dat deze W -strings weliswaar niet qua spectrum beter zijn dan de originele string (ze lijken er zelfs erg op), maar dat ze belangrijk kunnen zijn in verband met de niet-kritische string, een stringmodel met minder vrijheidsgraden waarvoor ook niet-

storingsberekeningen gedaan kunnen worden. Hoofdstukken 3 en 4 geven een overzicht van het onderzoek naar W -strings.

Tenslotte handelt hoofdstuk 5 over het tweede deel van mijn onderzoek dat zich toespitst heeft op een ander soort symmetrie van stringtheorie: de zogenaamde dualiteits-symmetrieën. Het belangrijkste idee van dualiteitssymmetrieën is dat ze twee (of meer) verschillende beschrijvingen van dezelfde theorie aan elkaar relateren. We onderscheiden verschillende soorten dualiteitssymmetrieën. Sommige relateren strings bewegend in verschillende ruimten. Deze T -dualiteitstransformaties relateren onder meer grote en kleine lengteschalen in stringtheorie. In de eerste helft van hoofdstuk 5 leggen we uit hoe T -dualiteit werkt, zowel in de lage-energielimiet van stringtheorie als in de formulering op het twee-dimensionale oppervlak.

Naast T -dualiteit bestaat er een andere groep van dualiteitstransformaties die waarschijnlijk zeer belangrijk is voor een beter begrip van niet-storingseffecten in stringtheorie. Deze noemen we sterk/zwak koppelingsdualiteiten. Ze relateren een stringtheorie met zwakke koppeling (waarvoor storingsrekening goede resultaten geeft) aan een (mogelijk andere) stringtheorie met een sterke koppeling. Dat betekent dat storingsrekening in de ene theorie informatie geeft over sterke koppelingseffecten (niet-storingseffecten) van de andere theorie. Een van de sterk/zwak koppelingsdualiteiten is S -dualiteit. Deze relateert verschillende formuleringen van dezelfde (lage-energielimiet van) stringtheorie waarbij, naast een transformatie van de koppeling, elektrische en magnetische velden worden verwisseld.

De laatste jaren is ook duidelijk geworden dat strings waarschijnlijk niet de enige fundamentele objecten zijn binnen stringtheorie. Er zijn namelijk oplossingen van de vergelijkingen van stringtheorie die objecten voorstellen van andere dimensies, bijvoorbeeld puntdeeltjes (of zwarte gaten) en ook hoger-dimensionale objecten. Deze worden p -branen genoemd, waarbij p het aantal dimensies van het object voorstelt. Voor $p = 0$ is dit een deeltje, voor $p = 1$ een string, voor $p = 2$ een membraan, enzovoort. Een mogelijke sterk/zwak koppelingsdualiteit is string/5-braan dualiteit. Hierbij zou een 5-braan theorie equivalent zijn aan een stringtheorie, maar dan met sterke en zwakke koppeling verwisseld. Wij onderzochten de rol van S -dualiteit en T -dualiteit, onder string/5-braan dualiteit. Er zijn aanwijzingen dat deze dualiteiten verwisseld worden onder string/5-braan dualiteit, maar we hebben gevonden dat dit alleen het geval kan zijn als bepaalde deeltjes uit het spectrum worden weggelaten. Daarnaast hebben we speciale oplossingen van één van de bekende superstringtheorieën (type IIB) onderzocht. Deze oplossingen kunnen zowel elektrische als magnetische ladingen hebben en worden verbonden door verschillende dualiteitssymmetrieën. Dit soort oplossingen kan verdere verbanden tussen de verschillende superstringtheorieën verduidelijken alsook informatie over het niet-storingsspectrum van stringtheorie verschaffen.

Nieuwe ontwikkelingen op het gebied van dualiteit in stringtheorie verschijnen tegenwoordig in een snel tempo. Zo wordt er nu veel onderzoek gedaan naar een mogelijke onderliggende theorie waarvan verschillende ‘reducties’ dual zijn aan de bekende superstringtheorieën. Er is in ieder geval genoeg reden om optimistisch te zijn over verdere ontwikkelingen op dit gebied. Die zouden kunnen leiden tot een meer volledige formulering van stringtheorie waarin ook niet-storingseffecten beter begrepen kunnen worden.

Dankwoord

Dit proefschrift kwam tot stand met de financiële steun van de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (F.O.M.). Het onderzoek is verricht op het Instituut voor Theoretische Natuurkunde in Groningen. Ik wil dan ook de medewerkers van het instituut bedanken voor alle geboden hulp en voor de vriendelijke werkomgeving.

Mijn dank gaat in het bijzonder uit naar de volgende mensen. Allereerst naar mijn begeleiders Eric Bergshoeff en Mees de Roo. Ik bedank hen voor de mogelijkheid die zij mij geboden hebben om dit onderzoek te verrichten, voor de goede begeleiding tijdens het onderzoek, en voor het kritisch doorlezen van mijn teksten. Ik heb veel geleerd van onze gezamenlijke projecten in de afgelopen jaren als promovendus, en ook het jaar daarvoor al tijdens het afstuderen bij Mees de Roo. Daarnaast bedank ik David Atkinson, mijn promotor, voor veel nuttige opmerkingen over het manuscript. Ook de leescommissie, bestaande uit professor F. Bais, professor K. Stelle en professor A. Van Proeyen, ben ik erkentelijk voor het aandachtig lezen van mijn proefschrift.

Een aantal mensen wil ik graag bedanken voor de plezierige samenwerking en/of voor boeiende discussies: de buitenlandse gasten Pablo Mendez-Llatas, Tomas Ortín, Sudhakar Panda en Shibaji Roy, en niet te vergeten de andere AIO's/OIO's van de afdeling van wie ik met name noem Bert Janssen als fijne kamergenoot (we vormden ook een succesvol pingpongduubbel) en Jeroen Nijhof die meestal in een mum van tijd alle (computer)problemen weet op te lossen.

Muziek maken is mijn voornaamste hobby en ik ben blij dat ik naast het werk op de universiteit nog tijd had om in een aantal ensembles te kunnen spelen. Ik bedank iedereen met wie ik heb mogen musiceren. In het bijzonder denk ik dan aan studentenorkest Mira en aan de verschillende kamermuziekensembles zoals het klarinetkwintet. Ik heb er veel plezier aan beleefd.

Degenen die ik het meest dankbaar ben zijn mijn ouders. Zij zijn altijd bereid geweest om mij waar dan ook bij te helpen en hebben zo veel bijgedragen aan wat uiteindelijk tot dit proefschrift heeft geleid. Rest mij nog hierbij al die anderen te bedanken die in de loop der jaren in meer of mindere mate, bewust dan wel onbewust een positieve bijdrage hebben geleverd.