

Van snaren naar membranen:
op zoek naar de quantumzwaartekracht

Eric A. Bergshoeff

Rede uitgesproken bij de aanvaarding
van het ambt van hoogleraar in de theoretische natuurkunde,
in het bijzonder de Theoretische Hoge-Energie Fysica,
aan de Rijksuniversiteit Groningen
op dinsdag 28 mei 2002

Aan mijn vader

ISBN-nummer: 90-367-1697-7

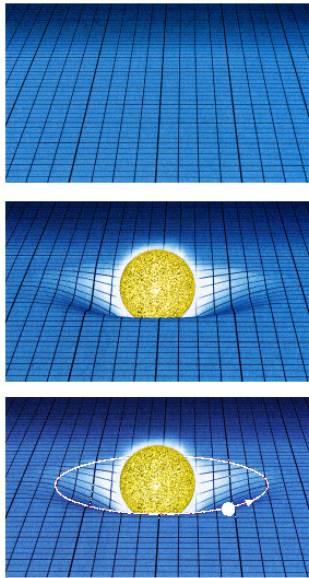
*Mijnheer de Rector Magnificus,
Geachte leden van het College van Bestuur,
Zeer geachte collega's,
Dear visitors,
Dames en Heren toehoorders,*

Inleiding

Drie eeuwen geleden schreef de natuurkundige Isaac Newton: “Ik voel mij als een kind dat speelt op het strand en zich vermaakt met het zoeken naar een bijzondere schelp of een mooie steen terwijl de grote zee van de waarheid geheel onontdekt voor mij ligt.” Deze uitspraak geeft fraai weer hoe Newton ervan overtuigd was dat de door hem geboekte resultaten slechts verfijningen in de marge van het grote onbekende waren. Er is in de eeuwen die volgden heel wat vooruitgang geboekt in de natuurkunde. De speurtocht naar bijzondere schelpen en mooie stenen duurt voort tot op de dag van vandaag. Zij wordt verricht door een internationale gemeenschap van natuurkundigen die elkaar via de computer van dag tot dag van elkaars ontdekkingen op de hoogte houden. Soms blijkt een mooie schelp net onder het zand verborgen te liggen, soms worden kuilen van wel een meter diep gegraven zonder enig resultaat. De ontwikkelingen in mijn vakgebied volgen elkaar in hoog tempo op. Iedere dag is weer anders. Wat gisteren nog nieuw was kan morgen alweer verouderd blijken te zijn. Het is geen rustige maar wel een spannende en enerverende speurtocht. Vandaag wil ik u een kijkje achter de schermen geven en u iets over de drijfveren vertellen die mij en mijn collega's zo fanatiek aan het speuren doen slaan.

Om u het een het ander uit te leggen is het gewenst om bij Newton te beginnen. Newton is vooral bekend geworden als de ontdekker van een wel heel bijzondere schelp, namelijk de eerste zwaartekrachtswet. Deze wet van Newton verklaart niet alleen hoe de zwaartekracht een appel uit een boom laat vallen, dezelfde wet beschrijft ook een groot aantal andere verschijnselen, zoals bijvoorbeeld het feit dat de planeten een baan rondom de zon beschrijven. Eeuwenlang is de wet van Newton gebruikt om een grote verscheidenheid van zwaartekrachtsverschijnselen zowel hier op aarde als in ons zonnestelsel te verklaren.

In het begin van de vorige eeuw kwam Albert Einstein tot de conclusie dat de wetten van Newton aan renovatie toe waren. Hij verving ze in 1915 door



Figuur 1: Newton versus Einstein

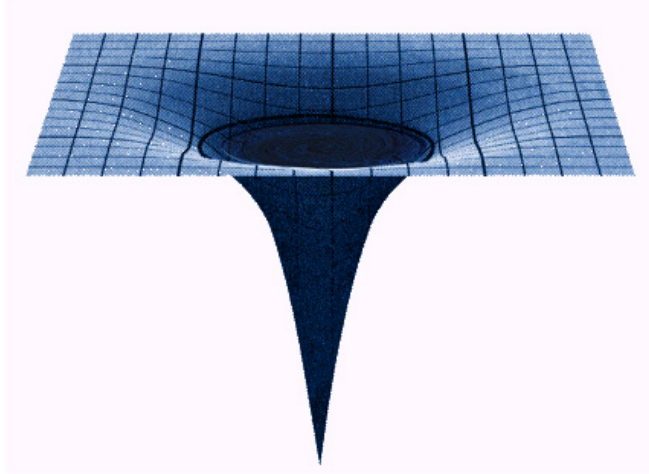
een nieuwe theorie van de zwaartekracht, de zogeheten Algemene Relativiteitstheorie. Het verschil tussen Newton en Einstein is dat Newton aannam dat de zwaartekracht instantaan werkt, dat wil zeggen dat de zon aan de aarde trekt alsof de zwaartekracht direct via een denkbeeldig touw de zon met de aarde verbindt. De ruimte tussen de zon en de aarde speelt hierbij geen enkele rol. Einstein daarentegen veronderstelde dat de zwaartekracht overgedragen wordt via de ruimte tussen de zon en de aarde. Deze ruimte is niet een leeg iets, zoals bij Newton het geval is, maar heeft een structuur en gedraagt zich als een weefsel dat kan plooiën. U ziet het ruimteweefsel zonder plooiing schematisch aangegeven in Figuur 1. De aanwezigheid van de zon veroorzaakt een plooiing in dit weefsel zoals een bal op een strak laken een kuil in dat laken maakt. De door de zon veroorzaakte plooiing van het ruimteweefsel beïnvloedt op haar beurt de manier waarop een ander object zich in de buurt van de zon beweegt. Zo beschrijft de aarde als gevolg van de plooiing van het ruimteweefsel een cirkelvormige baan rondom de zon, precies zoals een rouletteballetje dat in het casino doet. Het is duidelijk dat de ruimte een belangrijke rol speelt bij Einstein.

De Algemene Relativiteitstheorie voorspelt afwijkingen van de zwaartekrachtswet van Newton. Zij voorspelt bijvoorbeeld, in tegenstelling tot de wet van Newton, dat licht afgebogen wordt door de zon. De verschillen tussen de theorieën van Einstein en Newton zijn, bij toepassingen op aarde of in ons zonnestelsel, zeer klein. De verschillen hier op aarde spelen eigenlijk alleen een rol bij

precisiemetingen zoals die bijvoorbeeld nodig zijn bij toepassingen van de op satellieten gebaseerde navigatiesystemen. Om de positie op aarde tot op de meter nauwkeurig te bepalen is het noodzakelijk om de effecten van de Algemene Relativiteitstheorie in beschouwing te nemen.

Het verschil tussen de theorieën van Einstein en Newton is niet overal klein. Elders in het heelal zijn er gebieden waar de zwaartekrachtsvelden heel sterk zijn, veel sterker dan hier op aarde. In die gevallen is alleen de Algemene Relativiteitstheorie van toepassing. De Algemene Relativiteitstheorie dient ook toegepast te worden om de kosmologie, dat wil zeggen de evolutie van het heelal als geheel, te begrijpen. Einstein was één van de eersten die de Algemene Relativiteitstheorie op de kosmologie toepaste. Om een statisch heelal te verkrijgen, dat wil zeggen een heelal waarbij de onderlinge posities van de verschillende melkwegstelsels niet veranderen, was Einstein gedwongen een zogeheten kosmologische constante aan zijn zwaartekrachtswetten toe te voegen. Toen later, op basis van de astronomische waarnemingen van Hubble, bleek dat het heelal niet statisch is maar uitdijt, noemde Einstein de invoering van de kosmologische constante zijn grootste blunder. Overigens is deze kosmologische constante nog steeds het onderwerp van felle discussies. Zij is waarschijnlijk nodig om recente astronomische waarnemingen te verklaren die suggereren dat het heelal niet alleen uitdijt maar dat vroeger ook op een versnelde manier gedaan heeft.

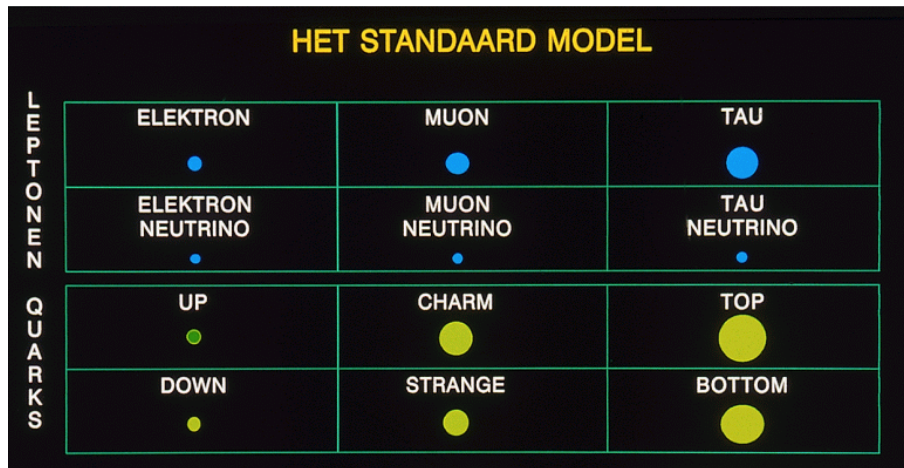
Een mogelijk nog grotere blunder van Einstein was dat hij niet wilde accepteren dat zijn theorie het bestaan van zeer zware objecten voorspelt met een zwaartekracht zo groot dat zelfs licht er niet uit kan ontsnappen, vandaar de naam “zwarte gaten”. Ik heb een voorbeeld van zo’n zwart gat in Figuur 2 weergegeven als een diepe put in het ruimteweefsel. U kunt een zwart gat het beste vergelijken met de afvoer in uw badkuip. Alles wat hierin verdwijnt komt nooit meer tevoorschijn. Wat er zich precies in een zwart gat afspeelt is niet bekend. Het bestaan van zwarte gaten was al in de 18de eeuw gesuggereerd maar het was de Algemene Relativiteitstheorie die liet zien dat ieder voldoende zwaar lichaam onder de invloed van zijn eigen zwaartekracht in elkaar stort tot een zwart gat. Met een voldoende zwaar lichaam bedoel ik iets extreems als de aarde samengeperst tot de grootte van één eurocent. Dit lijkt inderdaad wel erg extreem maar toch zijn er sterke aanwijzingen dat sommige sterren zwarte gaten zijn en dat zwarte gaten zich in het centrum van ons melkwegstelsel bevinden. Het onderzoek naar de zwarte gaten staat volop in de belangstelling zowel bij de natuurkundigen als bij de sterrenkundigen.



Figuur 2: Een zwart gat

Ik heb u tot nu toe verteld over de zwaartekracht. De Algemene Relativiteitstheorie geeft een goede beschrijving van de werking van de zwaartekracht. Om precies te zijn weten we alleen dat de Algemene Relativiteitstheorie een goede beschrijving van de zwaartekracht geeft op grote afstanden, dat wil zeggen veel groter dan één atoom. De werking van de zwaartekracht op afstanden kleiner dan het atoom is nog nooit gemeten. Dit komt doordat op dergelijke kleine afstanden de zwaartekracht volledig gedomineerd wordt door drie andere, veel sterkere krachten, te weten de elektromagnetische, de zwakke en de sterke kracht. De elektromagnetische kracht is de kracht die ervoor zorgt dat twee elektrisch geladen deeltjes, twee elektronen bijvoorbeeld, elkaar afstoten of dat de wijzer van een kompas in de richting van het noorden gaat staan. De zwakke kracht is verantwoordelijk voor het feit dat de wijzers van uw horloge 's nachts licht geven terwijl de sterke kracht verantwoordelijk is voor kernexplosies en hopelijk in de toekomst ook voor gecontroleerde kernfusie.

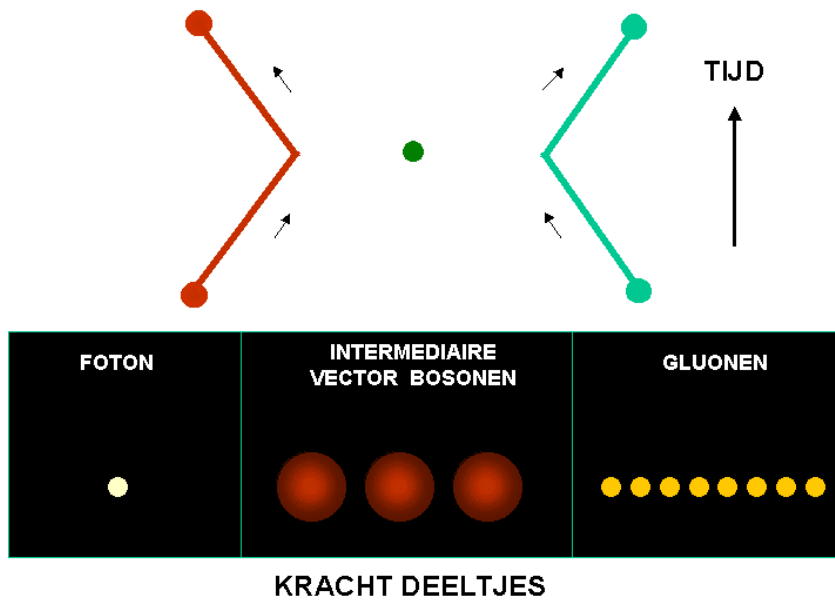
Iedereen kent Einstein en zijn Algemene Relativiteitstheorie van de zwaartekracht. Veel minder bekend bij het grote publiek is dat er in de vorige eeuw ook een theorie ingevoerd is die het gedrag van deeltjes binnen het atoom verklaart. Ik doel hierbij op de invoering van de quantumhypothese van Planck in 1901 en de uiteindelijke ontdekking van de quantummechanica in 1925 door Heisenberg, Schrödinger en Dirac. De quantummechanica voorspelt dat bepaalde



Figuur 3: Het Standaard Model

grootheden alleen als veelvoud van een kleinste eenheid voorkomen. U kunt dit het beste vergelijken met het betalingsverkeer. U kunt alleen één eurocent uitgeven of een veelvoud daarvan, maar u kunt bijvoorbeeld geen halve eurocent uitgeven. Precies zo voorspelt de quantummechanica dat de straal van de cirkelvormige baan die het elektron rondom de kern van een atoom beschrijft altijd gelijk is aan een veelvoud van een kleinst mogelijke straal. De quantummechanica heeft geleid tot ontwikkelingen die de invoering van bijvoorbeeld de laser en de transistor mogelijk hebben gemaakt. Ze heeft ook grote invloed gehad op moderne ontwikkelingen in de scheikunde en de biologie. Deze eeuw zal ongetwijfeld nog meer verrassende toepassingen van de quantummechanica zien in de context van bijvoorbeeld de nanotechnologie en quantumcomputers.

De quantummechanica ligt ook ten grondslag aan het zogeheten Standaard Model van de elementaire deeltjes. Elementaire deeltjes zijn deeltjes waarvan het tot nu toe niet bekend is of ze zijn opgebouwd uit andere deeltjes. In het Standaard Model worden de elementaire deeltjes onderverdeeld in twee klassen. Enerzijds hebben we de leptonen, zoals het elektron en het elektron–neutrino. De overige leptonen zijn zwaardere kopieën van het elektron en het elektron–neutrino. Anderzijds hebben we de quarks, zoals het up–quark en het down–quark. Ook in dit geval zijn de overige quarks zwaardere versies van het up–quark en het down–quark. De quarks zijn nog nooit als vrije deeltjes waargenomen. Ze komen slechts als gebonden toestand voor in de kernen van de atomen. Alles wat wij hier zien op aarde, zoals de stoel waarop u zit of de auto waarmee u hier naar Groningen gekomen bent, is opgebouwd uit de deeltjes in de linker kolom van Figuur 3, ook wel de eerste familie van deeltjes geheten. De deeltjes



Figuur 4: Uitwisseling van Krachtdeeltjes

in de andere twee kolommen, de zogeheten tweede en derde familie van deeltjes, zijn alleen aangetroffen in de kosmische straling die vanuit het heelal op onze aarde valt of zijn kunstmatig geproduceerd in de deeltjesversnellers.

In het Standaard Model worden de krachten tussen twee deeltjes beschreven door de uitwisseling van speciale krachtdeeltjes. Zo brengt het foton, het lichtdeeltje, de elektromagnetische kracht over. U ziet in Figuur 4 twee elektronen van links en rechts elkaar naderen. Het ene elektron zendt lichtdeeltjes uit die door het andere elektron opgevangen worden. Het netto effect is dat de twee elektronen elkaar afstoten en zich van elkaar verwijderen. Net als de elektromagnetische kracht worden in het Standaard Model ook de zwakke en sterke kracht beschreven door de uitwisseling van speciale krachtdeeltjes, die exotische namen hebben als “intermediaire vector bosonen” en “gluonen”.

Het grote succes van het Standaard Model wordt verklaard door het feit dat het model gebruikt kan worden om de uitkomst van botsingen tussen deeltjes uit te rekenen waarbij krachtdeeltjes betrokken zijn. Dat dit mogelijk is hebben onze landgenoten Veltman en 't Hooft laten zien. Zij hebben hiervoor in 1999 de Nobelprijs gekregen. De berekeningen stemmen tot nu toe zeer goed overeen met de experimenten in de deeltjesversnellers.

Het Standaard Model van de elementaire deeltjes heeft zich ontwikkeld in de zestiger en zeventiger jaren van de vorige eeuw. Het model geeft een zeer

goede beschrijving van de experimenten in de deeltjesversnellers, maar niemand denkt dat het model volledig is. Het Standaard Model geeft bijvoorbeeld geen verklaring voor de preciese waarde van de massa van de deeltjes en legt ook niet uit waarom er precies drie families van deeltjes zijn. Net als de wetten van Newton zal ook het Standaard Model vroeger of later aan renovatie toe zijn.

Het probleem

De situatie is nu als volgt. Enerzijds geeft de Algemene Relativiteitstheorie een goede beschrijving van de zwaartekracht op afstanden veel groter dan één atoom. Anderzijds geeft de quantummechanica, dat ten grondslag ligt aan het Standaard Model van de elementaire deeltjes, een goede beschrijving van de elektromagnetische, zwakke en sterke krachten binnen het atoom. Op de afstand van één atoom is de zwaartekracht te verwaarlozen ten opzichte van de drie krachten van het Standaard Model. Er is dus geen directe noodzaak om de zwaartekracht in het Standaard Model op te nemen en de quantummechanica op de zwaartekracht toe te passen. Deze noodzaak ontstaat pas als de sterkte van de zwaartekracht vergelijkbaar zou worden met die van de drie krachten van het Standaard Model. Deze extreme situatie doet zich niet voor hier op aarde maar is wel gerealiseerd bij zwarte gaten. Bij een zwart gat zijn de effecten van de zwaartekracht geconcentreerd in een zeer klein volume en is de sterkte van de zwaartekracht vergelijkbaar met die van de drie krachten van het Standaard Model. De beschrijving van zwarte gaten vereist dus zowel de Algemene Relativiteitstheorie, we hebben immers te maken met de zwaartekracht, als de quantummechanica omdat we nu ook de werking van de zwaartekracht op zeer kleine afstanden moeten begrijpen. Een ander voorbeeld waarbij de Algemene Relativiteitstheorie en de quantummechanica tegelijkertijd toegepast moeten worden is de oerknal van het heelal. Vlak na deze oerknal bevond de massa van het volledige heelal zich immers in een zeer klein volume. We hebben zowel de Algemene Relativiteitstheorie als de quantummechanica nodig om de oorsprong van ons heelal te begrijpen.

Wanneer we de quantummechanica toepassen op de zwaartekracht dan voorspelt de quantummechanica dat ook de zwaartekracht tussen twee deeltjes wordt overgedragen door een krachtdeeltje. We noemen dit krachtdeeltje het graviton. Helaas, en hier komen we bij de kern van ons probleem, kan de Algemene Relativiteitstheorie niet gebruikt worden om de botsingen tussen deeltjes uit te reke-

nen waarbij het door de quantummechanica voorspelde graviton–krachtdeeltje betrokken is. Het probleem zit hem erin dat de Algemene Relativiteitstheorie gebaseerd is op de aanname dat de zwaartekracht overgedragen wordt via een ruimteweefsel terwijl de quantummechanica beweert dat de zwaartekracht op kleine afstanden overgedragen wordt via het graviton–krachtdeeltje. Op kleine afstanden kunnen deze twee verschillende beschrijvingen van de zwaartekracht niet gelijktijdig gebruikt worden.

We hebben te maken met een erg onbevredigende situatie. Enerzijds geeft de quantummechanica een goede beschrijving van de elektromagnetische, zwakke en sterke krachten tussen de deeltjes. Anderzijds kan dezelfde quantummechanica niet op de Algemene Relativiteitstheorie toegepast worden. We verwachten daarom dat de Algemene Relativiteitstheorie op kleine afstanden vervangen dient te worden door een nieuwe theorie waarop de quantummechanica wél toegepast kan worden. We noemen deze theorie de quantumzwaartekracht. Het zoeken naar de quantumzwaartekracht is één van de grote open vragen in de theoretische natuurkunde. De vraag hoe quantumzwaartekracht de oorsprong van het heelal kan helpen verklaren komt zelfs voor op de lijst van de tien belangrijkste natuurkunde problemen voor het net gestarte millennium, opgesteld tijdens de laatste ‘Strings 2000’–conferentie in Michigan, Amerika. Deze tien problemen staan, als onderdeel van een kunstproject, uitgeschreven op verschillende lokaties in de stad Belfast. De vraag van de quantumzwaartekracht is geschreven op de zijgevel van een rijtjeshuis dat uitkijkt op de Lagan–rivier. De vraag luidt in het Engels: “How can quantum gravity help explain the origin of the universe?” Het is mij overigens niet duidelijk of dit kunstwerk de waarde van het huis heeft doen toenemen of afnemen.

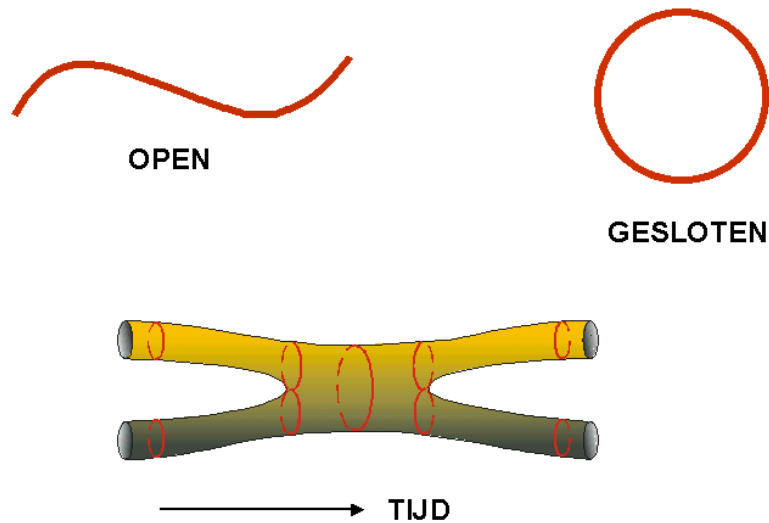
In de zeventiger jaren van de vorige eeuw werd de snaartheorie naar voren geschoven als een mogelijke theorie van de quantumzwaartekracht. Snaartheorie is gebaseerd op de aanname dat de deeltjes geen puntdeeltjes zijn maar trillingen van kleine snaartjes. Net zoals de tonen van een viool overeenkomen met de verschillende trillingen van de vioolsnaar, zo veronderstelt de snaartheorie dat ieder deeltje beschreven wordt door een snaar die op een bepaalde wijze trilt. Het bijzondere van de aanname is dat één snaar de eigenschappen van alle deeltjes van het Standaard Model, te weten de leptonen, de quarks en de krachtdeeltjes, beoogt te beschrijven. De ene toon beschrijft het elektron, de andere toon het up–quark en wéér een andere toon het foton, enzovoorts. Het blijkt dat óók het graviton, de drager van de zwaartekracht, met een trillende snaar



Figuur 5: Het Probleem van de Quantumzwaartekracht

geïdentificeerd kan worden. Snaartheorie geeft dus een beschrijving van alle krachten, inclusief de zwaartekracht.

U vraagt zich misschien af: hoe komt het dat we die trillende snaartjes nog nooit hebben gezien? Dit komt doordat de lengte van de snaartjes zeer klein is. Pas als we de deeltjes op zeer kleine afstand genaderd zouden zijn, een afstand die niet in de deeltjesversnellers onderzocht kan worden, dan pas worden de snaartjes duidelijk zichtbaar. U zult zich vervolgens misschien afvragen: als we die snaartjes toch niet kunnen zien, wat is dan het grote voordeel van de aanname dat de deeltjes kleine snaartjes zijn? Het grote verschil tussen puntdeeltjes en snaren is dat snaren, in tegenstelling tot puntdeeltjes, een bepaalde uitgebreidheid bezitten. Nu geldt in het algemeen dat hoe kleiner een object, hoe gedetailleerder men met behulp van dat object iets kan onderzoeken. Omgekeerd geldt ook: hoe groter een object hoe minder details men met behulp van dat object waar kan nemen. Zo is bijvoorbeeld het profiel van de band van een mountainbike zeer grof gemaakt zodat de mountainbike zo min mogelijk



Figuur 6: Open en Gesloten Snaren

last heeft van de kleine oneffenheden in het terrein. Een gewone fiets zou hier veel meer last van hebben. Precies hetzelfde gaat ook op voor puntdeeltjes en snaren. Doordat de snaren een zekere uitgebreidheid bezitten kunnen ze niet gebruikt worden om het ruimteweefsel van Einstein te onderzoeken op een afstand die kleiner dan de snaar zelf is. Dit blijkt precies de afstand te zijn waarbij de conflicten tussen de quantummechanica en de Algemene Relativiteitstheorie beginnen op te treden. Met andere woorden: de snaar is als het ware blind voor de fijnstructuur van het ruimteweefsel waar de Algemene Relativiteitstheorie en de quantummechanica elkaar in de haren vliegen. Hierdoor kan de snaartheorie, in tegenstelling tot de Algemene Relativiteitstheorie, wél gebruikt worden om de uitkomst van botsingen tussen deeltjes uit te rekenen waarbij het graviton betrokken is. Snaartheorie werd door dit positieve resultaat een belangrijke kandidaat voor een theorie van de quantumzwaartekracht. De snaartheorie is geen vervanging van de Algemene Relativiteitstheorie maar moet gezien worden als een verfijning ervan die zijn geldigheid op kleine afstanden niet verliest. Op grote afstand lijken de snaartjes op puntdeeltjes en gaat de snaartheorie over in de Algemene Relativiteitstheorie. Pas op kleine afstand worden de snaartjes duidelijk zichtbaar en voorspelt de snaartheorie afwijkingen van de Algemene Relativiteitstheorie.

Er bestaan twee soorten snaren: open snaren met twee verschillende eindpunten en gesloten snaren die een cirkelvorm hebben. U ziet in Figuur 6 een

voorbeeld van een botsing tussen twee deeltjes in de snaartheorie. Van links naderen twee deeltjes elkaar. Deze twee deeltjes worden beschreven door twee trillende gesloten snaren. Nadat ze elkaar genaderd zijn gaan ze samen verder als één gesloten snaar. Deze gesloten snaar splitst zich na verloop van tijd op in twee gesloten snaren die zich vervolgens, als twee verschillende deeltjes, van elkaar verwijderen.

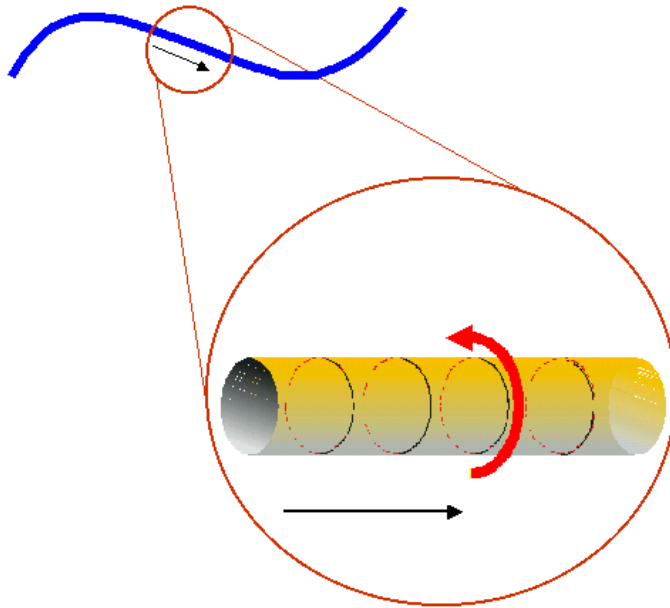
De snaartheorie werd een supersnaartheorie toen men door kreeg dat de consistentie van de theorie vereiste dat er een nieuwe symmetrie ingevoerd werd, de zogeheten supersymmetrie. Ik zal hier niet uitleggen wat supersymmetrie precies is. In het algemeen kan men stellen dat hoe meer symmetrie een theorie heeft hoe makkelijker die theorie te bestuderen is. Zo is bijvoorbeeld de zwaartekrachtswet van Newton niet alleen geldig hier op aarde, dezelfde wet is ook van toepassing op de maan of op de zon. We zeggen dat de wet van Newton een translatiesymmetrie heeft. Zonder zo'n translatiesymmetrie zouden we op verschillende plaatsen een verschillende zwaartekrachtswet moeten gebruiken. Supersymmetrie is ruwweg een translatiesymmetrie die niet werkt in de gewone ruimte maar in een abstracte ruimte. Men kan laten zien dat in het supersymmetrische Standaard Model, in tegenstelling tot het Standaard Model zonder supersymmetrie, de elektromagnetische, zwakke en sterke kracht verschillende manifestaties zijn van één onderliggende kracht. Deze eenwording van de krachten wordt algemeen als een aantrekkelijke eigenschap beschouwd. Het daadwerkelijk aantonen van supersymmetrie in het Standaard Model is één van de hoofddoeleinden van de nieuwe generatie deeltjesversnellers. Naast het supersymmetrische Standaard Model hebben we ook de supersymmetrische Algemene Relativiteitstheorie, ook wel superzwaartekracht geheten, en de supersnaartheorie. We hebben gezien dat de snaartheorie op grote afstanden in de zwaartekracht van Einstein overgaat. Precies zo gaat iedere supersnaartheorie op grote afstanden over in een superzwaartekracht.

We hopen en verwachten ook dat de theorie die een beschrijving geeft van alle krachten in de natuur uniek is. In het geval van het Standaard Model, als we de zwaartekracht buiten beschouwing laten, zijn er oneindig veel mogelijke theoretische modellen. Zo worden bijvoorbeeld de massa's van de verschillende deeltjes niet door de theorie vastgelegd. Het is het experiment dat uit moet maken welk model het correcte is. De supersnaartheorie, die de zwaartekracht bevat, laat weliswaar veel minder mogelijkheden toe, maar geeft toch nog aanleiding tot vijf verschillende snaartheorieën. Het probleem is nu dat we niet

weten hoe te kiezen uit deze vijf snaartheorieën.

Om mijn eigen bijdrage aan de ontwikkeling van de snaartheorie uit te leggen moet ik u eerst iets zeer vreemds over die vijf snaartheorieën vertellen. Het heeft te maken met het aantal dimensies van de ruimte waarin wij leven. Op het eerste gezicht lijkt het vanzelfsprekend dat wij in een driedimensionale ruimte leven. De drie dimensies zijn voor-achter, links-rechts en boven-beneden. Eén van de verrassende eigenschappen van supersnaartheorie is dat de quantummechanica alleen consistent toegepast kan worden als de dimensie van de ruimte negen is in plaats van drie. Dit lijkt in tegenspraak met onze dagelijkse waarneming. Toch hoeft er geen tegenspraak te zijn, mits we aannemen dat zes van de negen dimensies opgerold zijn tot kleine cirkeltjes. Deze oprolprocedure heet Kaluza-Klein compactificatie. De situatie is te vergelijken met een tuinslang, zie Figuur 7. Van veraf ziet een tuinslang eruit als een 1-dimensionaal object. Die ene dimensie is de richting waarin het water stroomt. Pas als men dichterbij komt ontdekt men dat de tuinslang een tweede, opgerolde, dimensie heeft die een draairichting voorstelt loodrecht op de richting waarin het water door de slang stroomt. Deze extra dimensie, die alleen op kleine afstand waargenomen kan worden, is in de figuur met een gele pijl aangegeven. Op dezelfde manier is het ons gebrek aan verbeelding dat ons doet denken dat wij in een driedimensionale ruimte leven. Pas als we de snaren tot op heel kleine afstand zouden benaderen, een afstand die niet onderzocht kan worden in de deeltjesversnellers, zal men ontdekken dat we te maken hebben met zes extra opgerolde dimensies. Overigens spreekt men in de literatuur vaak over tien in plaats van negen dimensies maar dat is alleen omdat men de tijd ook als een dimensie meetelt. Ik zal dit vanaf nu ook doen.

Ik heb al eerder gezegd dat bij iedere supersnaartheorie een superzwaartekracht hoort die de snaren op grote afstanden beschrijft. Zo hoort er bij ieder van de vijf snaartheorieën in tien dimensies een superzwaartekracht in tien dimensies. Het omgekeerde, te weten iedere superzwaartekracht beschrijft het langeafstandsgedrag van een snaartheorie, blijkt niet waar te zijn. De hoogste dimensie waarin een superzwaartekracht gedefinieerd kan worden is niet tien maar elf. Aangezien er geen snaartheorie is in elf dimensies doet zich de vraag voor van welke theorie de 11-dimensionale superzwaartekracht een beschrijving op grote afstanden geeft. Het enige wat we van deze theorie zeker weten is dat het op kleine afstanden geen snaren laat zien. Toen de 11-dimensionale superzwaartekracht in 1978 geconstrueerd werd, dacht men even dat deze the-

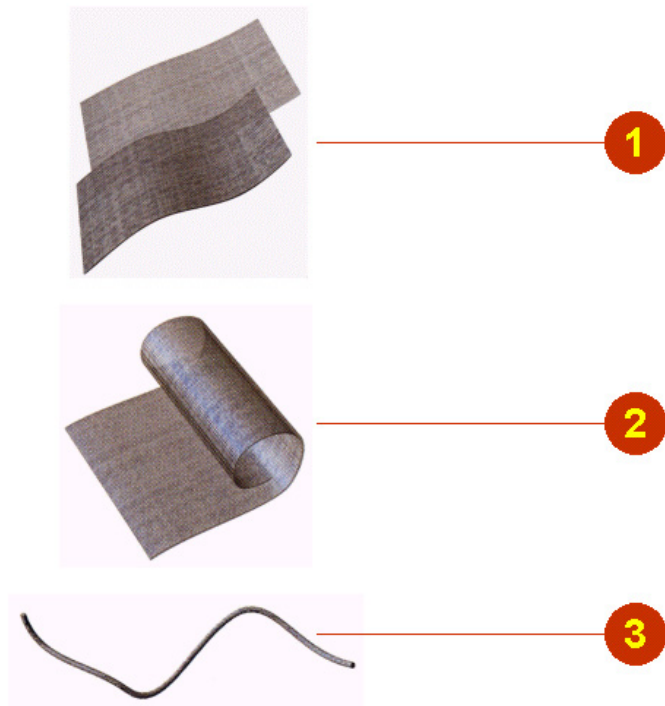


Figuur 7: Extra Dimensies

orie zelf al een quantumzwaartekracht definieerde. Algauw bleek echter dat de 11-dimensionale superzwaartekracht dezelfde problemen heeft als de Algemene Relativiteitstheorie. Supersymmetrie alleen is niet voldoende om het probleem van de quantumzwaartekracht op te lossen. De interesse in de 11-dimensionale superzwaartekracht verdween toen in 1984 de 10-dimensionale supersnaartheorie zijn succesvolle entree maakte. De status van de 11-dimensionale superzwaartekracht in de tachtiger jaren staat als volgt samengevat in het standaard boek van Green, Schwarz en Witten over de snaartheorie [1]: *“11-dimensionale superzwaartekracht is een raadsel. Het is moeilijk voor te stellen dat de theorie bij toeval bestaat maar zijn ware betekenis is op dit moment moeilijk in te schatten.”*

Branen en M–Theorie

Ik kom nu toe aan mijn eigen bijdrage aan de snaartheorie. In december 1986, net voor het verschijnen van het Green, Schwarz en Witten boek met de opmerking over het raadsel van de 11-dimensionale superzwaartekracht, stelden Ergin Sezgin, Paul Townsend en ikzelf een mogelijke oplossing van het raadsel voor [2]. We observeerden dat op dezelfde manier waarop de 10-dimensionale



Figuur 8: Het oprollen van een Membraan tot een Snaar

superzwaartekracht een beschrijving geeft van de 10-dimensionale snaartheorie op grote afstanden, de 11-dimensionale superzwaartekracht gerelateerd kan worden aan trommelvliesen of membranen, dat wil zeggen objecten met twee dimensies. Dit klinkt heel logisch. Immers, als een puntdeeltje vervangen kan worden door een snaar, waarom zou men dan geen stap verder kunnen gaan en de snaar vervangen door een membraan? Er blijkt ook een verband te bestaan tussen de membraan in elf dimensies en de snaar in tien dimensies. Spoedig na het verschijnen van ons artikel hebben Duff, Howe, Inami en Stelle laten zien dat een membraan in elf dimensies zich op kan rollen rondom de elfde dimensie tot een snaar in tien dimensies [3]. U ziet in Figuur 8 het oprollen van een membraan tot een snaar in drie stappen weergegeven.

In onze artikelen onderzochten we ook of objecten met meer dan twee dimensies konden bestaan en we classificeerden het aantal mogelijkheden. De Engelse taal liet ons echter alleen toe om objecten in te voeren met 0 dimensies (“a point particle”), 1 dimensie (“a string”), 2 dimensies (“a membrane”) en 3 dimensies (“a lump”). Om objecten met meer dan 3 dimensies in te voeren moesten we onze eigen Engelse taal ontwikkelen. We kwamen met het voorstel om het woord “p-branen”, of kortweg “branen”, in te voeren waarbij het getal

p aangeeft met hoeveel dimensies we te maken hebben. Dus een 0-braan is in deze notatie een puntdeeltje, een 1-braan een snaar, een 2-braan een membraan enzovoorts. Intussen heeft ook de Engelse taal zich met de branen verzoend. Het woordje “branes” komt voor als nieuw item in de eerstvolgende nieuwe uitgave van de Oxford English dictionary.

Ons artikel over de 11-dimensionale supermembraan wekte een wereldwijde interesse op. Supermembranen werden zelfs het onderwerp van een internationale conferentie in 1989 in Triëste, Italië. Gedurende deze conferentie werd echter duidelijk dat de supermembraan niet dezelfde rol speelt als snaartheorie in de zin dat de deeltjes van het Standaard Model niet voorgesteld kunnen worden als trillende trommelvliesjes. De supermembraan kan dus geen alternatief voor de snaartheorie zijn. Aan dit voor ons enigszins teleurstellende resultaat heeft mijn collega en promotor Bernard de Wit uit Utrecht een belangrijke bijdrage geleverd [4]. Omdat we geen contact konden maken met de deeltjes van het Standaard Model kregen de branen in de periode na de Triëste-conferentie slechts een beperkte belangstelling. Dit veranderde plotslag toen in de jaren 1994 tot 1996 revolutionaire nieuwe ontwikkelingen in de snaartheorie plaatsvonden.

Om de zogeheten “snaarrevolutie” van 1994-1996 te begrijpen moeten we teruggaan naar één van de standaard rekentechnieken in de theoretische natuurkunde. In de theoretische natuurkunde is het vaak onmogelijk om het precieze antwoord van een probleem uit te rekenen. In plaats hiervan maakt men vaak eerst een ruwe schatting van het antwoord en vervolgens berekent men correcties op deze eerste ruwe schatting met het doel een betere benadering van het exacte antwoord te krijgen. Deze correcties worden vaak gegeven als een reeksontwikkeling in machten van een kleine parameter, als die beschikbaar is. De eerste correctie is dan evenredig met de parameter, de tweede correctie is evenredig met het kwadraat van de parameter enzovoorts. Deze techniek heet storingsrekening. De storingsrekening werkt alleen maar als de berekende correcties slechts kleine veranderingen in de eerste ruwe schatting tot gevolg hebben. Is dit niet het geval, met andere woorden zijn de correcties in grootte vergelijkbaar met de eerste ruwe schatting, dan kan de storingsrekening niet toegepast worden.

Onze kennis van de supersnaartheorie omstreeks 1987 was beperkt door het feit dat de storingsrekening de enige beschikbare techniek was om botsingen

tussen deeltjes uit te rekenen. De in de storingsrekening gebruikte parameter is de snaarkoppelingsconstante. Deze constante geeft aan hoe sterk de krachten tussen de snaren zijn. Als de snaarkoppelingsconstante klein is en de zwaartekrachtsvelden zwak zijn dan leveren de eerste paar termen uit de storingsrekening een goede benadering voor het exacte antwoord op en dus kan de storingsrekening toegepast worden. De echte test voor de snaartheorie was of ze ook in staat is om een beschrijving van de eigenschappen van zwarte gaten te geven. De beschrijving van zwarte gaten vereist immers zowel de Algemene Relativiteitstheorie als de quantummechanica. Het probleem is nu dat, om de eigenschappen van zwarte gaten te beschrijven, we de supersnaartheorie moeten toepassen voor grote waarden van de snaarkoppelingsconstante en sterke zwaartekrachtsvelden. Dit is echter precies het gebied waar de storingsrekening niet werkt en een alternatieve rekentechniek is niet direct voor handen.

De revolutionaire ontwikkeling die in 1994 plaatsvond is dat er nieuwe technieken beschikbaar kwamen om berekeningen voor grote waarden van de koppelingsconstante uit te voeren. Deze nieuwe technieken waren gebaseerd op het idee van de zogeheten dualiteit. Dit idee maakt gebruik van het simpele feit dat als een getal groot is, dan is 1 gedeeld door dat getal klein. Duizend euro is bijvoorbeeld veel geld maar $1/1000$ van een euro is slechts $1/10$ van een eurocent en is dus weinig geld. Beschouw nu een snaartheorie met een snaarkoppelingsconstante gelijk aan N . Deze snaartheorie kunnen we goed doorrekenen via storingsrekening voor kleine waarden van N . We laten nu de waarde van N toenemen van kleine waarden naar grote waarden, het gebied waar de storingsrekening niet meer van toepassing is. Dualiteit zegt nu dat voor grote waarden van N de oorspronkelijke snaartheorie kan overgaan in een andere snaartheorie met snaarkoppelingsconstante gelijk aan $1/N$. Aangezien $1/N$, in tegenstelling tot N zelf, wél klein is kan de storingsrekening wél op deze andere snaartheorie toegepast worden.

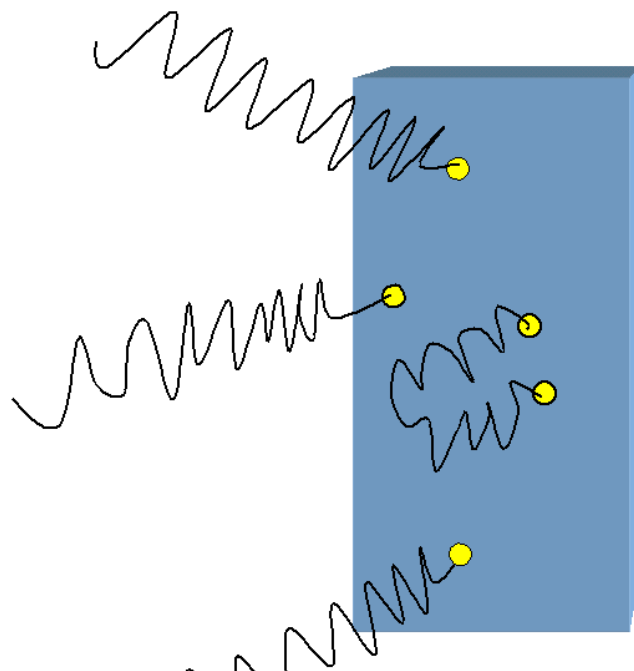
Dualiteit zegt dat twee ogenschijnlijk verschillende snaartheorieën twee gezichten van dezelfde theorie kunnen voorstellen, net zoals de twee kanten van één munt. Nader onderzoek in 1994 en 1995 heeft aangetoond dat in feite alle vijf snaartheorieën verschillende gezichten zijn van één en dezelfde onderliggende theorie. In 1995 heeft mijn collega Paul Townsend laten zien dat er zelfs een verborgen elfde dimensie is in snaartheorie en dat ook de 11-dimensionale supermembraan gezien kan worden als weer een ander gezicht van dezelfde theorie.



Figuur 9: De verschillende achterkanten en de identieke voorkant van een 20–eurocentmunt

De situatie laat zich vergelijken met de Europese Monetaire Unie. Beschouw bijvoorbeeld de 20–eurocentmunt. In Figuur 9 ziet u met de klok mee de achterkanten van een Spaanse, Franse, Belgische, Duitse en Nederlandse 20–eurocentmunt. Stel we zouden niet in staat zijn om de voorkant van deze munten te bekijken. Ons zicht op de muntstukken is hierdoor beperkt net zoals ons zicht op de snaartheorie beperkt is door het feit dat we alleen berekeningen met behulp van de storingsrekening kunnen doen. Er kan nu de indruk ontstaan dat we met vijf verschillende muntstukken te maken hebben. Op het moment echter dat we erin slagen om de voorkant van de muntstukken te bekijken zouden we ontdekken dat we te maken hebben met de vijf verschillende achterkanten van één en dezelfde 20–eurocentmunt, zie het midden van Figuur 9. Op dezelfde manier hebben we ontdekt dat de vijf snaartheorieën en de 11-dimensionale superzwaartekracht verschillende gezichten vormen van één en dezelfde onderliggende theorie. Sinds 1996 wordt deze theorie met “M-theorie” aangeduid. Voor sommigen staat M-theorie voor Membraantheorie, anderen prefereren de naam Moedertheorie en zo zijn er nog vele andere varianten.

Volgens de moderne inzichten heeft M-theorie niet alleen te maken met snaren en membranen maar met alle mogelijke branen van verschillende dimensies. Dit zijn precies de branen waarvan wij in 1987 het bestaan geopperd hadden. Volgens de laatste inzichten zijn snaren slechts één aspect van M-theorie. M-theorie wordt op zijn Engels daarom ook wel genoemd: “the theory formerly known as strings.” [5].

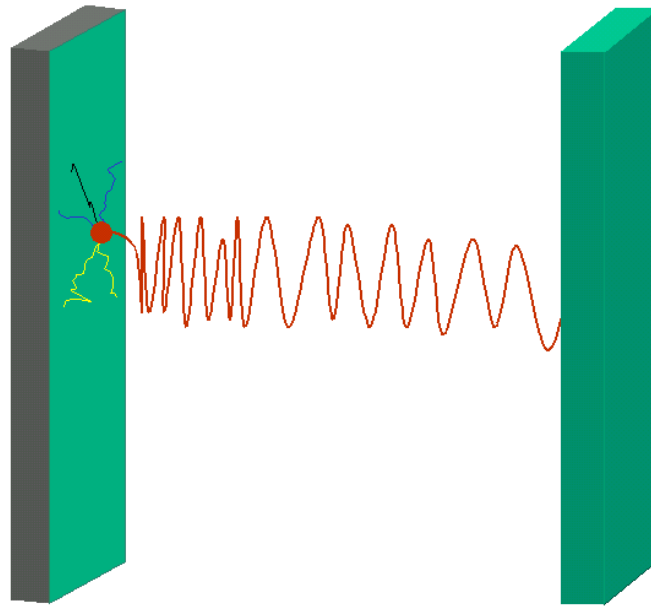


Figuur 10: Een D-braan

De precieze rol van de branen in snaartheorie werd pas duidelijk toen Polchinski in december 1995 liet zien dat veel van deze branen speciale branen zijn die gezien kunnen worden als oppervlakken waarop snaren eindigen [6]. Hij noemde deze branen om technische redenen “D-branen”. In Figuur 10 ziet u een voorbeeld van zo’n D-braan die de extra structuur heeft dat snaren erop eindigen. Een D-braan is als het ware een gewone braan met extra haartjes. Het bijzondere van deze D-branen is dat ze een simpele beschrijving in snaartheorie hebben als open snaren waarvan de eindpunten zich niet vrij door de hele ruimte maar alleen in het oppervlak van de D-braan kunnen bewegen. Deze beschrijving van D-branen als open snaren met een bepaalde randvoorwaarde op de eindpunten maakte het mogelijk om veel van de rekentechnieken uit de snaartheorie op de D-branen toe te passen. Vafa en Strominger hebben laten zien dat de D-branen van M-theorie gebruikt kunnen worden om voor de eerste keer een afleiding te geven van de entropie van een klasse van zwarte gaten [7]. Ruwweg is de entropie van een systeem een maat voor de wanorde van dat systeem. Bijvoorbeeld, een huis waarin de boeken in de boekenkast door elkaar liggen, het speelgoed van de kinderen overal rondslingert en de afwas niet gedaan is heeft een grote wanorde of een grote entropie. Een huis daarentegen, waarin de boeken netjes op alfabetische volgorde in de boekenkast staan, het speelgoed netjes gesorteerd in opbergdozen ligt en de afwas gedaan is heeft een

grote orde of lage entropie. De wanorde van het huis ontstaat doordat de inboedel van het huis is opgebouwd uit verschillende onderdelen, zoals de boeken, het speelgoed, de afwas en nog veel meer. Het werk van Bekenstein en Hawking in de zeventiger jaren toonde aan dat ook aan zwarte gaten een wanorde toegekend kan worden. De grote vraag was echter de wanorde van wat? Met andere woorden wat is precies de inboedel van een zwart gat? Vafa en Strominger maakten in hun afleiding van de entropie gebruik van het feit dat bepaalde zwarte gaten opgebouwd kunnen worden uit een aantal afzonderlijke D-branen, met andere woorden de inboedel van deze klasse zwarte gaten bestaat uit een aantal D-branen. Het feit dat Vafa en Strominger erin slaagden om vanuit deze aanname de juiste uitdrukking voor de entropie af te leiden is een sterke aanwijzing dat branen ons een sleutel tot de quantumzwaartekracht verschaffen.

Het zoeken naar de quantumzwaartekracht heeft ons geleid naar eerst de snaartheorie en vervolgens de M-theorie. M-theorie lost niet alleen het probleem van de quantumzwaartekracht op maar heeft ook tot nieuwe inzichten geleid in theorieën waar de zwaartekracht in eerste instantie niets mee te maken lijkt te hebben. Om dit uit te leggen moet ik eerst een nieuw woord invoeren. We hebben gezien dat de quantummechanica ten grondslag ligt aan het Standaard Model van de elementaire deeltjes. De theorie die beschrijft hoe deze deeltjes zich gedragen heet een Quantumveldentheorie. De Quantumveldentheorie die hoort bij het Standaard Model geeft een beschrijving van de elektromagnetische, zwakke en sterke kracht maar niet van de zwaartekracht. De snaartheorie beoogt een beschrijving te geven van alle krachten inclusief de zwaartekracht. Voor zowel de Quantumveldentheorie als de snaartheorie geldt dat de meeste berekeningen gedaan werden met behulp van de storingsrekening. Hierdoor was onze kennis van zowel de Quantumveldentheorie als de snaartheorie beperkt. In december 1997 heeft Maldacena een nieuwe dualiteit ingevoerd die stelt dat niet alleen twee snaartheorieën maar ook een Quantumveldentheorie en een snaartheorie twee verschillende gezichten van één en dezelfde theorie kunnen zijn [8]. Het bijzondere van deze nieuwe dualiteit is dat het een dualiteit betreft tussen enerzijds een theorie zonder zwaartekracht, te weten de Quantumveldentheorie, en anderzijds een theorie met zwaartekracht, te weten de snaartheorie. Dit betekent dat berekeningen in de quantumzwaartekracht onder bepaalde omstandigheden vertaald kunnen worden naar berekeningen in de Quantumveldentheorie, alwaar we een groot aantal beproefde technieken tot onze beschikking hebben. Omgekeerd stelt deze nieuwe dualiteit ons in staat om belangrijke ei-



Figuur 11: Het idee van de “wereldbraan”

genschappen van de Quantumveldentheorie, zoals het feit dat de quarks door de sterke krachten opgesloten worden in de atoomkernen, te vertalen naar eigenschappen van de Algemene Relativiteitstheorie. Verder onderzoek in deze richting biedt aanknopingspunten voor samenwerkingsverbanden met de theoretici van het Kernfysisch Versneller Instituut hier in Groningen. Ik verwacht dat de dualiteit van Maldacena ons in de toekomst nog veel verrassende nieuwe inzichten in de Quantumveldentheorie op zal leveren.

M-theorie beïnvloedt ook ons inzicht in andere gebieden van de natuurkunde en heeft onverwachte relaties met zowel de wiskunde als de sterrenkunde. Er zijn sterke aanwijzingen dat, om M-theorie volledig te doorgronden, we nieuwe wiskunde nodig zullen hebben. Dit zal tot een vruchtbare wisselwerking met de wiskundigen leiden. Ik verwacht dat een belangrijk zwaartepunt in het toekomstig onderzoek aan M-theorie zal zijn de relatie tussen M-theorie en de kosmologie. Er is voorgesteld dat wij zelf leven in een zogeheten “wereldbraan” die ingebed is in een hogerdimensionale ruimte. M-theorie heeft tot toepassingen van dit idee geleid waarbij gebruik gemaakt wordt van twee branen, zie Figuur 11. De linkerbraan is de wereldbraan waarin wij leven. De rechterbraan is een soort spiegeling van ons heelal. Alleen via de zwaartekracht, schematisch weergegeven met een golvende lijn tussen de branen, kan onze wereldbraan contact hebben met het gespiegelde heelal. De andere drie krachten, schematisch

weergegeven met de golvende lijnen in de wereldbraan, kunnen ons heelal niet verlaten. De ruimte tussen de twee branen vormt een extra, nog niet waargenomen, dimensie. De deeltjes in het gespiegelde heelal vormen een natuurlijke kandidaat voor de zogeheten “donkere materie”. Donkere materie is materie die nog nooit via enige techniek, zoals de optische telescoop, is waargenomen maar waarvan we weten dat deze verantwoordelijk is voor het grootste gedeelte van de massa van het heelal. Het idee van de wereldbraan klinkt misschien als science fiction, maar wordt tot nu toe niet door het experiment tegengesproken. Dit komt doordat de extra dimensie zeer klein is en alleen via de zwaartekracht waargenomen kan worden. Om zo’n extra dimensie aan te tonen moeten we weten hoe de zwaartekracht zich precies gedraagt op afstanden kleiner dan een millimeter. Experimenteel is hierover weinig bekend. Het voorstel van de wereldbraan heeft geleid tot een verhoogde belangstelling in de experimenten die de zwaartekracht op kleine afstanden onderzoekt.

Het is duidelijk dat er nog veel valt te ontdekken op het grensgebied tussen M-theorie en de kosmologie. Het is dan ook een goede zaak dat de groep in Groningen, tezamen met de groepen in Amsterdam en Leiden, dit najaar een internationale workshop organiseert met als titel “Branes and Cosmology”. Hopelijk zal deze workshop leiden tot een intensievere samenwerking tussen de theoretische natuurkunde en de theoretische sterrenkunde in Nederland.

Ik heb u verteld over de strijd tussen de quantummechanica en de Algemene Relativiteitstheorie en de supersnaartheorie en M-theorie die uit deze strijd tevoorschijn zijn gekomen. Het doet mij deugd om te constateren dat de snaartheorie veel talentvolle jonge onderzoekers blijft aantrekken. Het is duidelijk dat jonge onderzoekers behoefte hebben om te werken aan ambitieuze problemen. Dat de snaartheorie ook in de belangstelling staat buiten de theoretische natuurkunde blijkt wel uit het feit dat populaire lezingen over de snaartheorie volle zalen trekken. De snaren vormen zelfs de inspiratie voor een stuk van Toneelgroep Amsterdam, dat onlangs ook het noorden heeft aangedaan (zie Figuur 12).

De vraag die rest is: waar staan we nu? Zijn alle problemen nu opgelost? Zitten we met M-theorie op de juiste weg naar een theorie die alle krachten en alle deeltjes beschrijft en die ons de oorsprong en verdere ontwikkeling van het heelal verklaart? Er is in de afgelopen jaren enorm veel vooruitgang geboekt in ons begrip van de snaartheorie en de M-theorie waartoe de snaren behoren. Er



Figuur 12: Aankondiging van het toneelstuk “Snaren”

is ook veel vooruitgang geboekt om het supersymmetrische Standaard Model af te leiden vanuit de supersnaartheorie met het doel contact te maken met het experiment. Er is echter ook nog veel niet bekend. Zo weten we nog steeds niet wat M-theorie nu precies is. Het enige wat we weten is dat de theorie in bepaalde limieten snaren of andere branen oplevert. Ook is onze kennis van M-theorie op het moment onvoldoende om eenduidige voorspellingen over het Standaard Model te doen die experimenteel verifieerbaar zijn.

Ik vertelde u aan het begin hoe Newton zich voelde als een kind dat speelde op het strand en zich vermaakte met het zoeken naar een bijzondere schelp of een mooie steen terwijl de grote zee van de waarheid onontdekt voor hem lag. Sommige van mijn collega's hebben gesuggereerd dat die grote zee van de waarheid weleens met M-theorie geïdentificeerd zou kunnen worden. Dat zijn de theoretici. Andere collega's hebben gezegd: waarom trek je niet je zwembroek aan en ga je zelf niet uitzoeken hoe die oceaan eruitziet? Dat zijn de experimentatoren. Nu moet ik zeggen dat dat water in die oceaan wel erg koud is. Ik ben van mening dat we op het moment in een overgangsfase zitten. We beschikken niet over een directe experimentele verificatie van M-theorie. Aan de andere kant zijn er wel degelijk mogelijkheden voor experimenten op de middellange termijn. Zo zou bijvoorbeeld de ontdekking van de supersymmetrie

in de nieuwe LHC-versneller in CERN een enorme sprong voorwaarts zijn. Ik verwacht in de komende jaren ook nieuwe input via astronomische waarnemingen en nieuwe zwaartekrachtsexperimenten. Ik denk dat we spoedig misschien niet met het zwemmen maar wel met het pootjebaden kunnen beginnen.

Voorlopig zie ik M-theorie als een wel heel mooie schelp die we net op het strand gevonden hebben. Onze speurtocht gaat door. Ik verwacht dat de toekomst ons nog veel verrassingen zal brengen.

Dankwoord

Ik wil deze rede besluiten met een dankwoord.

Hooggeleerde De Wit, beste Bernard!

Toen ik in 1978 in Leiden jouw college Quantumveldentheorie volgde werd ik direct geraakt door je enthousiasme. Dit was voor mij de start in de theoretische hoge-energiefysica. Ik heb met veel plezier mijn promotieonderzoek onder jouw begeleiding gedaan. We zijn elkaar ook later, mede dankzij de membranen, vaak tegengekomen. Ik hoop dat we ook in de toekomst nog veel contact zullen hebben.

Hooggeleerde Berends, beste Frits!

Jij was het die mij een paar dagen voor de deadline erop opmerkzaam maakte dat ik toch maar eens naar die NATO-beurs moest solliciteren. Per slot van rekening was het bij Karel Gaemers ook gelukt, zo zei je. Die NATO-beurs heb ik inderdaad gekregen en dat heeft mij in staat gesteld een jaar aan de Brandeis Universiteit in Boston, Amerika, door te brengen. Dat jaar was voor mij een onvergetelijke ervaring.

Hooggeleerde Sezgin, dear Ergin!

When I arrived in 1984 in Trieste, Italy, it was not clear whether I would continue in physics. Soon after my arrival however we started to work together and from one thing came another and at the end I stayed in physics. My 4 years in Trieste are a very special period in my life. We not only worked like hell but we also had a lot of fun there in Trieste. It was a real good fortune for me to have met you there. Eén van de mooie dingen van ons vak is dat je zoveel collega's van verschillende landen ontmoet die aan dezelfde speurtocht meedoen. Het zoeken naar de quantumzwaartekracht geeft aldus de mogelijkheid om met mensen van diverse nationaliteiten in contact te komen. Sommigen van hen zijn hier vandaag aanwezig. Dear Kelly, I would like to thank you for the efforts you have taken to be present today.

Zeergeleerde De Roo, beste Mees!

Al sinds mijn jaren in Leiden hebben we in veel projecten samengewerkt. Door de jaren heen heeft onze samenwerking zich ontwikkeld tot een verstandhou-

ding waarbij je elkaar na een half woord begrijpt. Jij hebt je, samen met Marinus Winnink, ingezet om mij via een KNAW-fellowship naar Groningen te halen. Ik ben jullie daar zeer erkentelijk voor. Ik hoop dat onze samenwerking zich ook in de toekomst met succes zal voortzetten en dat ik nog veel mag leren van je scherpe inzichten.

Beste studenten, promovendi en postdocs!

Jullie zijn het die ons er via kritische vragen en jeugdige enthousiasme voor behoeden in de valkuil van de routine te vallen en ons dwingen open te blijven staan voor nieuwe ontwikkelingen. Ik ben er trots op dat de groep in Groningen, hoe klein ook vergeleken met de andere groepen in Nederland, nog steeds in staat is bij te dragen aan de laatste wetenschappelijke ontwikkelingen. Gelukkig hebben we, onder andere via Europese netwerken, voldoende contacten met de internationale onderzoeksgemeenschap. Ik wil in deze context de belangrijke rol van de Landelijke Onderzoeksschool Theoretische Natuurkunde benadrukken. Alleen als onderdeel van dit grotere geheel zijn wij in staat een sterke positie te handhaven.

Beste familie en vrienden,

Ik hoop dat jullie een beetje begrepen hebben met welke speurtocht ik mij al die jaren heb beziggehouden. Beste Wim, ik dank je voor de vriendschap door alle jaren heen. Ik hoop dat we nog vele jaren nieuwe ontmoetingen tegemoet kunnen zien.

Lieve Marie-Louise, Floor en Pien!

Ik heb het in mijn verhaal gehad over de wetenschapper en zijn speurtocht op het strand. Zoals jullie het beste weten vereist deze speurtocht vaak veel energie en concentratie. Vroeger, als ongetrouwde postdoc in het buitenland, kon ik deze speurtocht zeven dagen per week voortzetten. Nu we samen een gezin vormen is dit niet meer mogelijk. Dat is maar goed ook want zo wordt de wetenschappelijke interesse ook wat gerelativeerd. Ik dank jullie voor alle steun en ik hoop dat we met ons vieren nog vele stranden en eilanden aan zullen doen.

Ik heb gezegd.

Verantwoording

Figuur 1 en 2 zijn overgenomen uit B. Greene, *The Elegant Universe*, Jonathan Cape, ISBN 0-224-05299-3; Figuur 8 is overgenomen uit S. Hawking, *The Universe in a nutshell*, Bantam books, ISBN 0-553-80202-X; Ik dank Bill Graham voor zijn hulp bij het nemen van de foto behorende bij Figuur 5.

Literatuur

1. M. Green, J. Schwarz en E. Witten, *Superstring theory*, deel I en II, Cambridge monographs on Mathematical Physics, Cambridge University Press 1987, ISBN 0 521 32384 3.
2. E. Bergshoeff, E. Sezgin en P. Townsend, *Supermembranes and Eleven-dimensional Supergravity*, Phys. Lett. B189 (1987) 75.
3. M. Duff, P. Howe, T. Inami en K. Stelle, *Superstrings in $D=10$ from Supermembranes in $D=11$* , Phys. Lett. B191 (1987) 70.
4. B. de Wit, M. Lüscher en H. Nicolai, *The supermembrane is unstable*, Nucl. Phys. B320 (1989) 135.
5. M. Duff, *The Theory Formerly Known as Strings*, Scientific American 278 (1998) 2.
6. J. Polchinski, *Dirichlet Branes and Ramond-Ramond Charges*, Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 4724.
7. C. Vafa en A. Strominger, *Microscopic Origin of the Bekenstein-Hawking Entropy*, Phys. Lett. B379 (1996) 99.
8. J. Maldacena, *The Large N Limit of Superconformal Theories and Supergravity*, Adv. Theor. Math. Phys. 2 (1998) 231 en Int. J. Theor. Phys 38 (1999) 1113.