

PDF hosted at the Radboud Repository of the Radboud University Nijmegen

The following full text is a publisher's version.

For additional information about this publication click this link.

<http://hdl.handle.net/2066/18631>

Please be advised that this information was generated on 2019-10-22 and may be subject to change.

NAAR EEN WAARDIG SLOT

Dr. A.N.J.J. Schellekens

Rede uitgesproken bij de aanvaarding
van het ambt van bijzonder hoogleraar in de
Theoretische Hoge Energie Fysica
aan de Faculteit der Natuurwetenschappen
van de Katholieke Universiteit Nijmegen
op woensdag 16 september 1998.

*Mijnheer de Rector Magnificus,
Dames en Heren,*

De Hoge Energie fysica neemt een speciale plaats in binnen de natuurkunde. Dat blijkt eigenlijk al uit de naam. De meeste vakgebieden binnen de natuurkunde zijn genoemd naar wat zij bestuderen. De vaste stof fysica bestudeert eigenschappen van vaste stoffen, de atoom fysica bestudeert atomen en de kernfysica atoomkernen. Maar een Hoge Energie Fysicus bestudeert geen Hoge Energie. De naam van het vak is ontleend aan de experimentele technieken die gebruikt worden. Het wezen van het vak is het bestuderen van de materie op steeds kleinere afstanden. Hiertoe worden bundels deeltjes met zeer hoge energie op elkaar geschoten. Hoe hoger de energie, hoe verder men in de materie doordringt. Ons vak begint eigenlijk bij de uitvinding van de microscoop, maar pas in deze eeuw is het echt goed op gang gekomen. We hebben geleerd dat materie bestaat uit moleculen, die weer zijn opgebouwd uit atomen. De atomen bestaan uit een kern met daarom heen een wolk electronen, en de kern bestaat weer uit protonen en neutronen. Steeds wanneer je nog dieper kijkt lijken zich nieuwe verschijnselen voor te doen. Wellicht is dat ook de reden dat het vak niet genoemd is naar het onderwerp van studie; dat verandert immers steeds. Men spreekt weliswaar ook wel van “Elementaire deeltjes fysica”, maar toen die naam voor het eerst gebruikt werd dacht men nog dat protonen en neutronen elementaire deeltjes waren. Intussen weten we wel beter. Het proton en het neutron zijn niet elementair, maar bestaan zelf weer uit andere deeltjes, de quarks. Wanneer zou blijken dat quarks zelf ook weer uit andere deeltjes zouden bestaan zou onze aandacht vanzelf verschuiven naar nieuwe, nog diepere structuren. Voorlopig hebben we daar overigens geen aanwijzingen voor.

Je zou dus kunnen zeggen dat het wezenlijke verschil tussen de Hoge Energie Fysica en alle andere takken van de natuurkunde is dat de eerste het zoekt in de diepte, terwijl alle andere disciplines meer in de breedte werken. In die definitie van de Hoge Energie Fysica zit eigenlijk ook al het einde van het vak opgesloten. Het lijkt onvermijdelijk dat we eens tegen een grens zullen aanlopen die het ons onmogelijk maakt om nog dieper in de materie door te dringen. Dit zou betekenen dat de natuur zich op het allerdiepste nivo voor altijd aan onze waarneming onttrekt. Als wat we niet kunnen zien net zo gecompliceerd is als wat we al gezien hebben, is er geen enkele kans dat we het antwoord zouden kunnen raden. Dit lijkt mij het meest waarschijnlijke einde van dit vak.

Wanneer dat einde bereikt zal worden is minder duidelijk. De laatste 50 jaar zijn de technologische grenzen steeds verder opgeschoven, en zijn er steeds indrukwekkender machines gebouwd. Een van die successen is bijvoorbeeld LEP in Genève, een ringvormige deeltjesversneller met een omtrek van 27 kilometer, waarin electron en positron bundels met grote energie en verbijsterende precisie op elkaar geschoten worden. Steeds wanneer een dergelijke machine opgeleverd wordt ligt de volgende alweer op de tekentafel. Technologisch gezien lijkt het einde misschien in zicht, maar eigenlijk is dat al minstens twintig jaar het geval, en er zijn nu nog steeds nieuwe versnellers gepland of in aanbouw.

Een onvoorzienbare technologische revolutie zou het einde van deze weg fors kunnen uitstellen, maar uiteindelijk zullen we tegen fundamentele of praktische grenzen aanlopen.

Dat wordt pijnlijk duidelijk wanneer we kijken naar de kleinste afmetingen die volgens theoretici interessant zouden kunnen zijn. In theorieën van Quantum Gravitatie spelen zich interessante verschijnselen af op afstanden ter grootte van de Planck lengte, dat is ongeveer 10^{-33} cm. Dit is zo vreselijk klein dat het waarnemen van dit soort structuren met onze krachtigste deeltjes-versnellers net zo iets is als proberen protonen op de maan te zien met behulp van een telescoop. Met een versneller als LEP kunnen we tot ongeveer een-honderdste van de grootte van een proton doordringen. Een machine die structuren ter grootte van de Planck lengte kan zien moet deeltjes versnellen tot een gigantische Energie, de Planck Energie. Wanneer we met de huidige technologie een dergelijke versneller zouden willen construeren, dan blijkt dat die machine minstens de grootte van het gehele melkwegstelsel zou moeten hebben. Het is een interessante vraag of dit zelfs puur theoretisch mogelijk is, praktisch mogelijk is het in ieder geval niet.

Hoewel de meerderheid van de experimenten met deeltjes-versnellers gedaan wordt zijn er andere, wat minder directe methodes om iets over de diepere structuren van de natuur te weten te komen. Maar welke methode ook gebruikt wordt, er zullen altijd verschijnselen denkbaar zijn die zich aan onze waarneming onttrekken. We kunnen ons deeltjes voorstellen die dermate weinig interactie met ons hebben, of gebeurtenissen die zo onwaarschijnlijk zijn, dat we ze nooit zullen zien. Het is moeilijk in te zien waarom de natuur ons altijd dermate vriendelijk gezind zou zijn dat we al haar geheimen uiteindelijk kunnen waarnemen.

Dit vind ik een onplezierige gedachte. Ik zie de ontwikkeling van de fundamentele natuurkunde in deze eeuw als een spannend boek, dat je moeilijk neer kunt leggen zonder het laatste hoofdstuk gelezen te hebben. Het is een prachtig verhaal dat een waardig slot verdient. Het zou een enorme teleurstelling zijn als het laatste hoofdstuk voor ons onleesbaar zou blijken.

Wat is eigenlijk ons doel? Het echte antwoord op die vraag wordt door de meeste van mijn collega's hoogstens met grote aarzeling geformuleerd, omdat het enerzijds vrij arrogant en anderzijds hopeloos naïef klinkt. Je zou het kunnen omschrijven als de "Theorie van Alles". Deze term werd enige jaren geleden voor het eerst gebruikt in een vlag van euforie over een nieuwe doorbraak, en werd over het algemeen met hoongelach ontvangen. Hoezo, Theorie van Alles? Vertelt die theorie ons iets nieuws over supergeleiding? Kun je er de genetische code van de mens uit afleiden? Kun je er dan misschien het weer mee voorspellen? De lijst van vragen waarmee mensen worstelen is eindeloos. Een theorie die al die vragen kan beantwoorden is ondenkbaar.

Als we toch een bereikbaar en aanvaardbaar einddoel willen formuleren zullen we de vragen waarop we een antwoord mogen verwachten moeten beperken. Dit houdt onder meer in dat de vragen niet te ingewikkeld mogen zijn. Het DNA molecuul bijvoorbeeld is dermate ingewikkeld, dat het nooit direct uit een fundamentele theorie zal worden afgeleid. Niettemin weten we al decennia wat die fundamentele theorie is: het is de Quantum Electrodynamica. Wanneer we voldoende eenvoudige vragen stellen geeft deze theorie uitermate precieze antwoorden. In de hoge energie fysica worden de meeste vragen uiteindelijk gereduceerd tot simple vragen zoals: wat gebeurt er precies als twee deeltjes met een bepaalde energie op elkaar botsen. Wanneer we ons ervan overtuigd hebben dat we alle vragen van

dat type kunnen beantwoorden is wat mij betreft aan een van de eisen voor een Theorie van Alles voldaan.

Eigenlijk hebben we al bijna een dergelijk theorie tot onze beschikking. Deze wordt aangeduid met de weinig indrukwekkende naam “Standaard Model”. Deze theorie beschrijft drie van de vier fundamentele krachten die we kennen. Op de eerste plaats is dat de al genoemde Quantum Electrodynamica. Deze interactie manifesteert zich op vele manieren in de wereld om ons heen: licht, electriciteit, magnetisme, chemie, en de meeste eigenschappen van materialen vallen allemaal onder deze theorie. Dan is er de Quantum Chromodynamica, die er onder andere voor zorgt dat de protonen en neutronen in kernen bij elkaar gehouden worden. Tenslotte is er de zwakke kracht, die zich bijvoorbeeld manifesteert in radioactiviteit. Voor al deze verschijnselen hebben we een uitermate succesvolle fundamentele theorie, die al vijftientig jaar lang een indrukwekkende reeks experimentele verificaties met verve heeft doorstaan. Wanneer men in de toekomst terugkijkt op deze eeuw zal het Standaard Model ongetwijfeld genoemd worden als een van de grote doorbraken in de fysica, samen met de quantum mechanica en de relativiteits theorie.

Toch zal niemand geneigd zijn de weinig pretentieuze naam “Standaard Model” te vervangen door “Theorie van Alles”. Daar zijn een aantal redenen voor. Op de eerste plaats ontbréékt een van de vier bekende interacties, namelijk de zwaartekracht. Dat lijkt op het eerste gezicht geen al te groot probleem. Ook voor de zwaartekracht hebben we een uitstekende theorie, Einstein’s algemene relativiteits theorie, een van de parels van de natuurkunde van deze eeuw. Net als het Standaard Model geeft die theorie uiterst nauwkeurige voorspellingen die in overeenstemming zijn met een groot aantal experimenten. Helaas leeft deze theorie echter op gespannen voet met de quantum mechanica. Concreet betekent dit dat we geen voorspellingen kunnen doen wanneer deeltjes met Planck energie op elkaar botsen, of voor extreme verschijnselen in de buurt van zwarte gaten. Het is uitermate onwaarschijnlijk dat we dit soort processen ooit daadwerkelijk kunnen waarnemen, maar van een Theorie van Alles verwachten we dat deze ook in dergelijke extreme omstandigheden een antwoord geeft.

Het Standaard Model heeft daarentegen geen problemen met de quantum mechanica. Het is geformuleerd in termen van Quantum Velden Theorie, en rust stevig op zijn twee pijlers, de quantum mechanica en de relativiteits theorie. Toch zijn we er allermist gerust op dat het Standaard Model geheel in orde is. Het Standaard Model bevat 17 deeltjes, waarvan we er tot nu toe 16 gevonden hebben. Er ontbreekt er dus nog een, het zogenaamde Higgs deeltje. Dit deeltje verschilt nogal van de andere 16, en het wordt algemeen gezien als de zwakste plek in het Standaard Model. Het bestaan van dit deeltje is al vijftientig jaar geleden gepostuleerd, omdat het essentieel is voor de consistentie van het Standaard Model. Maar anderzijds werd al snel duidelijk dat het een nieuw probleem introduceert. Wat dat probleem is zal ik hier niet in detail uitleggen. Het komt er op neer dat de zwakke kracht, ondanks zijn naam, eigenlijk vele malen sterker is dan je redelijkerwijs zou mogen verwachten.

Er is nog meer wat ons niet bevalt aan het Standaard Model. Zo heeft het bijvoorbeeld wat veel parameters, namelijk minstens 19 en waarschijnlijk meer. Een parameter is een

getal waarvan de waarde niet door de theorie wordt vastgelegd. Zo vertelt het Standaard Model ons bijvoorbeeld niet hoeveel de quarks wegen. De massa's van de zes quarks kunnen alleen bepaald worden door ze te meten. Wanneer alle parameters gemeten zijn ligt de theorie vast en kan elke andere grootte berekend worden. Hoewel 19 parameters niet echt veel is hadden we er misschien liever wat minder, bijvoorbeeld geen enkele.

Wat ons echter nog meer zorgen baart is het feit dat sommige van die parameters nogal speciale waarden hebben. Zo is bijvoorbeeld de verhouding van de electron massa met die van de zwaarste quark, de top quark, heel erg klein, minder dan een honderdduizendste. Aangezien het Standaard Model niets zegt over de massa's, had er elk getal uit kunnen komen. Als je dan constateert dat in de natuur zo'n getal heel erg klein is krijg je het gevoel dat je dit zou moeten kunnen begrijpen. Het eerder genoemde probleem met het Higgs boson is eigenlijk van dezelfde aard, maar nog wat erger. Het is net als wanneer je je in een zaal met honderd mensen bevindt, en je ontdekt dat ze allemaal op dezelfde dag jarig zijn. De kans dat dit toeval is, is dermate klein, dat je meteen aanneemt dat er een verklaring voor moet zijn. In de natuurkunde van ons heelal zien we verscheidene van dergelijke onwaarschijnlijke toevalligheden.

Iets anders wat velen niet bevalt is dat het Standaard Model bij lange na niet de enige mogelijkheid is. Toen Einstein de Algemene Relativiteits theorie opschreef had hij eigenlijk niet veel keus. Maar de bedenkers van het Standaard Model hadden talloze variaties voorhanden. Dertig jaar intensief experimenteel werk hebben vrijwel al deze variaties naar de prullemand verwezen, maar eigenlijk zouden velen dat liever op puur theoretische gronden willen kunnen doen. Men zou dus liever een theorie hebben die uniek is.

Niettemin is dit een soort vragen waarvan het wat minder zeker lijkt dat ze beantwoord moeten kunnen worden. Eigenlijk hebben we in het Standaard Model alleen nog vragen over van dit type. Het zijn allemaal vragen die met "waarom" beginnen: waarom juist dit Standaard Model, waarom hebben de parameters de waarden die we waarnemen, en waarom zijn sommige waarden zo klein. Het is onvermijdelijk dat er in een theorie vragen van dit type overblijven. Het feit dat dergelijke vragen niet beantwoord worden is dus geen reden om aan een theorie het predicaat "Theorie van Alles" te onthouden. Dat zouden we wel moeten doen als het inconsistent was of in strijd met experimenten.

Wat ik met het voorgaande heb willen zeggen is dat het begrip "Theorie van Alles" niet noodzakelijk een luchtkasteel is, mits men er niet de verkeerde verwachtingen van heeft. Het Standaard Model is niet alleen een uitstekend model voor drie van de vier natuurkrachten en alle materie, maar ook voor het concept "Theorie van Alles". Op een paar punten na is het eigenlijk precies waar we naar op zoek zijn.

Het Standaard Model heeft een ander probleem dat zelden als zodanig genoemd wordt, maar voor mij wel essentieel is. Het is weliswaar volledig in overeenstemming met alles wat we kunnen waarnemen, maar het heeft niets te zeggen over wat we niet kunnen zien. Wanneer nieuwe experimenten nieuwe deeltjes of nieuwe interacties ontdekken zullen we het Standaard Model moeten uitbreiden. De Quantum Velden Theorie laat tal van uitbreidingen toe. We kunnen wel postuleren dat de natuur beschreven wordt door het Standaard Model zonder enige toevoeging, maar niets garandeert dat. We zijn dus altijd afhankelijk

van verdere experimenten. Dit lijkt zo vanzelfsprekend dat eigenlijk niemand het ooit als probleem noemt.

Hoe staat het nu met de kansen om een aanvaardbare theorie ook werkelijk te vinden? Ik heb al gezegd dat ik daar niet optimistisch over ben. Het Standaard Model is niet zo vreselijk ingewikkeld. Als je de juiste taal spreekt kun je het in twee of drie regels opschrijven. Niettemin zijn er vele experimenten nodig geweest om zover te komen. Experiment en Theorie gaan nu eenmaal hand in hand. Zonder experimentele hulp maken we weinig kans.

Toch is er misschien nog een kleine kans. Er is op dit moment binnen de theorie een ontwikkeling gaande die ons enige hoop geeft dat we onze taak misschien toch tot een goed einde kunnen brengen. Ik doel hier op een iets wat we gewoonlijk “String Theorie” noemen. In het Nederlands wordt dat gewoonlijk met “Snaar Theorie” vertaald, maar ik vindt dat niet prettig klinken. De theorie ontleent zijn naam uit het feit dat alle deeltjes gerealiseerd zijn als trillingen van een soort fundamentele snaar. De grondtonen corresponderen met de deeltjes van het Standaard Model, plus misschien een aantal nieuwe deeltjes. De boventonen corresponderen met een oneindige reeks deeltjes die we nooit zullen waarnemen, tenzij we een versneller met Planck energie zouden kunnen bouwen. Mijn voorkeur voor het woord “String” in plaats van “Snaar” heeft vermoedelijk te maken met de ruimere betekenis van het Engelse woord, wat immers ook koord of touwtje kan betekenen. Die betekenis past beter bij het beeld wat ik gedachten heb dan een strak gespannen viool snaar.

Overigens is intussen wel duidelijk geworden dat het woord “String” veel te beperkt is en het woord “Theorie” een beetje voorbarig. We hebben ontdekt dat naast snaren ook membranen een rol spelen, en we hebben ons ook gerealiseerd dat wat we tot nu toe “String Theorie” noemden slechts een klein hoekje is van een werelddeel wat nog grotendeels in kaart gebracht moet worden. Bij gebrek aan een betere naam zal ik dat hele werelddeel voorlopig maar “String Theorie” noemen.

String Theorie werd dertig jaar geleden min of meer bij toeval ontdekt bij pogingen om de sterke kracht te begrijpen. Al snel werd duidelijk dat deze theorie over magische eigenschappen beschikte, maar voor de beschrijving van de sterke kracht werd al spoedig een beter alternatief gevonden, de Quantum Chromodynamica. Tien jaar lang leidde de theorie, samen met een handjevol trouwe volgelingen, een kwijnend bestaan, om in 1984 een triomphale terugkeer te beleven. Inmiddels was duidelijk geworden dat de theorie veelbelovende eigenschappen had voor de beschrijving van een heel andere kracht, de zwaartekracht. Enige verlichte geesten hadden zich dat overigens in 1975 al gerealiseerd, maar zij vonden toen weinig gehoor.

De revolutie van 1984 is vooral te verklaren uit het feit dat String Theorie ons iets cadeau gaf waar eigenlijk niemand op gerekend had. Naast een mogelijk consistente theorie van quantum gravitatie bleek String Theorie ook deeltjes en krachten te bevatten die leken op het Standaard Model. Dit is een algemeen kenmerk van goede theorieën: slechte theorieën komen altijd wat te kort, maar goede theorieën geven je van alles cadeau waar je redelijkerwijs niet op mocht rekenen.

Als alles uitkomt zoals we hopen zou dit uiteindelijk een theorie moeten opleveren die geheel consistent is en alle bekende deeltjes en krachten bevat. Eerder heb ik als gezegd

dat ik eigenlijk ook zou willen dat een fundamentele theorie een volledige beschrijving geeft van alles wat we (nog) niet kunnen waarnemen. String Theorie heeft een eigenschap die dit lijkt te verwezenlijken. Ik doel hier op iets dat in speciale gevallen met de technische term “Modulaire Invariantie” wordt aangeduid, en waarvan de precieze vorm in algemene zin nog niet duidelijk is. In ieder geval wijst alles er op dat je aan een gegeven String Theorie niet straffeloos deeltjes kunt toevoegen of deeltjes kunt weglaten. Als we dus eenmaal een String Theorie hebben gevonden die exact het Standaard Model bevat, kun je daar niets meer aan toevoegen. Aan een String Theorie kan niet gesleuteld worden. Het is best mogelijk dat de theorie nieuwe deeltjes voorspelt, maar als een experiment een niet verwacht deeltje vindt, dan stort daarmee het gehele bouwwerk in. String Theorie kan dus eigenlijk alleen maar een Theorie van Alles opleveren, of we die term nu prettig vinden of niet: Het is Alles of Niets.

Het woord “Niets” is een beetje overdreven. Op zijn minst hebben we een adembenemend stukje wiskunde in handen. String Theorie heeft een grote aantrekkingskracht op theoretici doordat het over wonderbaarlijke eigenschappen beschikt die aan buitenstaanders wat moeilijk zijn uit te leggen. Het is een reusachtig landschap waar theoretici zich doorheen bewegen met een soort Alice-in-Wonderland gevoel. Elke steen die omgekeerd wordt blijkt nieuwe wonderen te verbergen, elk pad dat ingeslagen wordt leidt tot fascinerende vergezichten. Het lijkt soms of String Theorie zijn eigen problemen oplost, waarbij wij slechts ademloze toeschouwers zijn. Keer op keer lijken zich interne tegenstellingen te openbaren, die echter stevast door een nieuw “String Wonder” opgelost worden. Het geeft de theorie iets onaantastbaars, en je vraagt je soms af hoe String Theorie nog gefalsificeerd zou kunnen worden.

Die magische eigenschappen hebben ook een schaduwzijde. Ze fascineren sommige theoretici zodanig dat het uiteindelijke doel soms uit het oog wordt verloren. Dat doel lijkt nu verder weg dan in 1984. Ondanks de mooie beloftes heeft String Theorie nog geen enkel meetbaar resultaat opgeleverd. Van het Standaard Model zien we hoogstens een vage schim, de details kunnen we nog niet uitwerken. Dat komt voor een deel omdat we nog steeds bezig zijn te ontdekken wat String Theorie eigenlijk is.

Een andere reden is dat we met vreselijk veel mogelijkheden te maken hebben. Men zou misschien van een kandidaat Theorie van Alles verwachten dat deze eenduidig is, met andere woorden, dat er maar één mogelijke uitkomst is voor de wetten van de natuur. Voorlopig lijken de feiten echter een geheel andere richting uit te wijzen.

Toen String Theorie in 1984 herboren werd, werd veel over “uniciteit” gesproken, maar dat was duidelijk voorbarig. In 1984 kenden we namelijk niet één, maar vijf String Theorieën. Daarna liep het snel uit de hand. Die vijf String Theorieën bestonden namelijk in een wereld met negen ruimte en één tijd dimensie, dus tien dimensies in totaal. Onze eigen ruimte heeft ook één tijd, maar slechts drie ruimte dimensies, corresponderend met hoogte, breedte en diepte. In de jaren na 1984 werd snel duidelijk dat het in vier dimensies veel eenvoudiger was om String Theorieën te construeren dan in tien. In plaats van vijf bleken er miljarden mogelijkheden te zijn, of eigenlijk oneindig veel.

Ik was in 1986 zelf bij die ontwikkelingen betrokken, en in ons artikel werd dat grote

aantal oplossingen met enige nadruk genoemd. Dat werd niet als goed nieuws beschouwd. Vele jaren later heb ik zelfs iemand ontmoet die beweerde dat ons werk hem ervan had overtuigd String Theorie te verlaten en iets anders te gaan doen. Dat was uiteraard niet onze bedoeling. Zelf was ik, denk ik, een van de weinigen die dit grote aantal String Theorieën wél als een positieve ontwikkeling beschouwde, en ik zal later uitleggen waarom.

Geleidelijk kwam er na 1986 wat orde in de chaos, en het begon duidelijk te worden dat al die verschillende String Theorieën eigenlijk toch deel uitmaakten van een groter geheel. Ze konden allemaal op een of andere manier gerelateerd worden met een van de vijf String Theorieën in tien dimensies. Om van tien naar vier dimensies te komen worden dan zes van de tien dimensies als het ware opgerold, zodat wij er slechts vier kunnen waarnemen.

Gewoonlijk beschouwen we al die vier-dimensionale String Theorieën als zogenaamde “grondtoestanden” van een van de vijf tien-dimensionale. Om het begrip grondtoestand te begrijpen kan men denken aan een gebergte met vele dalen. In dit beeld correspondeert het gebergte met de theorie, en de verschillende dalen met de verschillende grondtoestanden. De bewoners van ieder van die dalen zien slechts een klein deel van het gehele gebergte. Niettemin is uiteindelijk alles met elkaar verbonden.

Dit beeld herstelt de verloren eenduidigheid weer enigszins. Weliswaar zijn er vele grondtoestanden, maar er is slechts één Theorie. Althans, dat zou het ideaal zijn. We hadden echter nog steeds vijf theorieën in plaats van één. Dat correspondeert dus met vijf gebergtes, ieder met zijn eigen dalen. Vier jaar geleden kwam hier plotseling verandering in. De vijf gebergtes bleken in werkelijk allemaal hetzelfde, maar vanuit verschillende hoek bekeken. Net zoals de Mont Blanc er vanuit Frankrijk gezien geheel anders uit ziet dan vanuit Italië, zo bleken ook op het oog totaal verschillende String Theorieën eigenlijk verschillende benaderingen van dezelfde theorie te zijn. Helaas hebben we nog geen exacte formulering van die overkoepelende theorie. Daar wordt op dit moment druk naar gezocht.

Alles lijkt er op dit moment op te wijzen dat we weliswaar te maken hebben met één theorie, maar die theorie heeft een enorm aantal grondtoestanden. Net zoals elk bergdal vaak zijn eigen wetten en gebruiken kent, zo behoort bij elke grondtoestand een ander stelsel natuurwetten. In plaats van electromagnetische, sterke en zwakke krachten zullen er andere interacties zijn, in plaats van quarks en leptonen andere deeltjes. Als String Theory correct is, is in ons heelal één van die vele mogelijkheden gerealiseerd. Een van de grote uitdagingen is aan te tonen dat ons heelal inderdaad tot de mogelijke oplossingen behoort.

Over andere grondtoestanden kunnen we slechts puur theoretisch discussieren. In tegenstelling tot een bewoner van een bergdal, die in principe een ander dal zou kunnen gaan bekijken, kunnen wij in een andere grondtoestand niet eens bestaan. De quarks en elektronen waar wij uit zijn opgebouwd bestaan daar immers niet eens. Toch lijkt het slechts een kleine stap om nu aan te nemen dat andere grondtoestanden wellicht in een ander heelal gerealiseerd zouden kunnen zijn. Een dergelijke bewering ligt echter buiten de grenzen van de natuurkunde. Per definitie kan de natuurkunde geen uitspraken doen over zaken die niet waargenomen kunnen worden. We kunnen over andere mogelijke “heelallen” slechts theoretisch spreken. Het zijn oplossingen van dezelfde vergelijkingen waar ook ons heelal aan voldoet.

Deze gedachtengang past goed in een reeks van inzichten die ons op onze bescheiden plaats in de cosmos hebben gewezen. Onze planeet bleek niet het centrum van het zonnestelsel, onze zon is slechts een van de vele sterren en niet eens een heel bijzondere, en hetzelfde geldt voor ons gehele melkwegstelsel. Het lijkt vrij natuurlijk om aan te nemen dat ook ons heelal, inclusief de quarks, leptonen en interacties die we waarnemen slechts een van vele mogelijke is.

Er zijn belangrijke consequenties verbonden aan deze manier van denken. Als het inderdaad zo is dat ons heelal, inclusief zijn natuurwetten en het gehele Standaard Model slechts een van vele mogelijkheden is, dan impliceert dit dat er grenzen zijn aan wat we kunnen uitrekenen. De eigenschappen van de quarks en leptonen, hun interacties, en de parameters van het Standaard Model (of althans een deel daarvan) zijn bij het ontstaan van het heelal vastgelegd, waarbij een keuze gemaakt is uit de vele mogelijkheden. Die keuze zullen we nooit kunnen uitrekenen, want die had immers ook anders kunnen zijn.

Ik heb de indruk dat vele van mijn collega's geloven of hopen dat dit uiteindelijk niet het geval zal zijn. Men hoopt een soort wiskundige formule te vinden die maar één uitkomst heeft. Die ene uitkomst zou dan moeten corresponderen met onze wereld, inclusief alle quarks, leptonen en de vier basiskrachten. Ook de waarden van de negentien (of meer) parameters, zoals de massa's van alle deeltjes zouden uiteindelijk als oplossing uit een wiskundige berekening moeten komen rollen.

Het zou inderdaad zo kunnen zijn. Op dit moment is niet duidelijk wat er van die enorme aantallen grondtoestanden overblijft wanneer we String Theory echt goed begrijpen. Het lijkt op het eerste gezicht misschien aantrekkelijk dat er maar één overblijft, maar als je er even over nadenkt wordt duidelijk dat dit eigenlijk een ongewenst einde van het verhaal zou zijn.

Ik zal proberen dat duidelijk te maken, maar eerst wil ik een leerzame historische vergelijking maken. Kepler, een groot geleerde die we allemaal kennen van zijn theorie van de planetenbanen, dacht dat de afstanden van de planeten tot de zon fundamentele parameters waren, die uitgerekend moesten kunnen worden. Hij bedacht er een ingenieuze theorie voor met in elkaar ingebedde regelmatige veelvlakken. Met onze huidige kennis van zaken lijkt Kepler's poging absurd. Kepler wist niet van het bestaan van de planeten Neptunus en Pluto, en dit feit alleen al haalt zijn theorie onderuit. Als hij geweten had van het bestaan van andere zonnestelsels was hij er niet eens aan begonnen. Toch kun je Kepler niet verwijten dat hij het probeerde. Je moet niet te snel aannemen dat iets nooit uitgerekend zal kunnen worden. Wanneer je voldoende inzicht verwerft zal uiteindelijk vanzelf wel duidelijk worden wat je wel en niet kunt uitrekenen. Het lijkt me heel goed mogelijk dat we over enige tijd tot het inzicht komen dat er inderdaad ook andere werelden met andere natuurwetten mogelijk zijn. Pogingen om alle parameters van het Standaard Model uit te rekenen zullen dan even naïef overkomen als wat Kepler beoogde.

Hoewel de keuze uit de verschillende grondtoestanden willekeurig is vanuit wiskundig oogpunt, is dat niet zo vanuit menselijk oogpunt. Ons bestaan is zeer nauw verbonden met het Standaard Model en de precieze waarden van een aantal parameters. Een bekend voorbeeld zijn de massa's van de twee quarks waaruit het proton en het neutron bestaan.

Die quarks worden “up” en “down” genoemd, en het tweede is zwaarder dan het eerste. Dit heeft het plezierige gevolg dat het proton stabiel is, terwijl een vrij neutron in ongeveer 15 minuten uiteen valt in een proton en een elektron. Wisselen we de twee quark massa’s om dan is het net andersom. Het proton zou dan zeer snel vervallen in een neutron en een positron. Het waterstof atoom zou niet stabiel zijn, evenmin als het water molecuul. Ons leven zou volstrekt onmogelijk worden, we zouden niet eens ontstaan zijn. Er bestaat een lange lijst van voorbeelden van dit type. Een aantal daarvan is nog indrukwekkender, maar wat lastiger uit te leggen.

Ons gehele bestaan hangt af van een subtiele reeks processen die zich gedurende de ontwikkeling van ons heelal hebben afgespeeld. Die processen hebben uiteindelijk een planeet opgeleverd waar bijvoorbeeld het cruciale element koolstof in voldoende mate aanwezig is. Verscheidene stappen in dit proces hangen op een kritieke manier af van parameters in het Standaard Model, zoals de massa’s van deeltjes en de sterktes van interacties. Het lijkt vaak eenvoudig aan te tonen dat zelfs een vrij kleine wijziging van bepaalde parameters het proces volledig lam gelegd zou hebben.

Vanuit dit oogpunt lijkt het absurd dat precies die parameter waarden uit een wiskundige berekening zouden volgen. We zouden dan met een veel groter raadsel blijven zitten dan we proberen op te lossen. Om deze reden was ik ook zeer tevreden toen bleek dat String Theorie in hoge mate niet uniek was. Wanneer onze planeet de enige in het heelal zou zijn, zou het een raadsel zijn waarom juist die ene planeet leefbaar was. Het feit dat er miljarden planeten zijn maakt het raadsel aanzienlijk minder ernstig. Op analoge wijze maakt het feit dat er vele soorten heelal mogelijk zijn, het bestaan van condities voor intelligent leven in óns heelal aanzienlijk minder absurd dan wanneer er slechts één mogelijkheid zou zijn.

Dit soort redeneringen wordt vaak aangeduid met de term “anthropisch principe”. Dit is eigenlijk een verzamelnaam voor verscheidene ideeën, waarvan ik er een aantal overigens vrij onzinnig vind. Het anthropisch principe stelt dat het heelal dat wij waarnemen wordt gekenmerkt door het feit dat wij er zijn om het waar te nemen. Hiermee kan eigenlijk niemand het oneens zijn. Wel met de consequenties die sommigen hieraan verbinden.

Het anthropisch principe heeft wat mij betreft alleen zin als ons heelal niet het enig mogelijke is. Het heeft bovendien alleen zin binnen een geheel consistente theorie. Anders weten we namelijk niet welke veranderingen van de parameters van ons heelal zinvol zijn. Het zou bijvoorbeeld best zo kunnen zijn dat we de up/down quark massaverhouding helemaal niet kunnen veranderen. Hoewel ik graag vele mogelijkheden voor de natuurwetten van het heelal zou willen hebben, zou ik ook graag zien dat de fundamentele theorie uniek was. String Theorie lijkt die twee op eerste gezicht tegenstrijdige eisen in zich te verenigen: volgens onze huidige inzichten is er slechts één theorie, maar zijn er vele grondtoestanden mogelijk. Dit is eigenlijk de best denkbare uitkomst.

Het anthropisch principe zou de verklaring kunnen geven voor bepaalde toevalligheden die vanuit het oogpunt van de theorie moeilijk te begrijpen zijn. Het zou kunnen verklaren waarom up quarks lichter zijn dan down quarks, maar echt verbazingwekkend is dit massaverschil eigenlijk niet. Het wordt interessanter wanneer we kijken naar gevallen waar parameter verhoudingen zeer klein of zeer groot zijn. Bekende voorbeelden zijn de electron

massa, die onwaarschijnlijk klein is, of de sterkte van de zwakke kracht. De waarde van beide parameters is essentieel voor de ontwikkeling van ons heelal en ons bestaan, maar dit is niet voldoende om te concluderen dat we de waarden van die parameters begrijpen.

Waar het werkelijk om gaat is de vraag of er voor andere parameter waarden enige vorm van intelligent leven mogelijk is. Als intelligent leven zich in elk denkbaar heelal uiteindelijk zou ontwikkelen is het nog altijd niet te begrijpen waarom de natuur zich in extremen zou begeven om juist onze vorm van intelligent leven mogelijk te maken.

Dit leidt tot een formulering van het anthropisch principe die wellicht binnen het kader van de exacte wetenschap valt. Het vereist op de eerste plaats een theorie die we geheel onder controle hebben en waarvan we in het bijzonder alle mogelijke grondtoestanden kennen, en daarmee alle mogelijke parameters en hun toegestane waarden. Verder hebben we een definitie van intelligent leven nodig die niet op onze eigen quark-lepton wereld gebaseerd is. Voor elk van de toegestane grondtoestanden zouden we dan moeten uitrekenen of intelligent leven mogelijk is. Als dit alleen mogelijk is voor bepaalde extreme parameter waarden, zijn die waarden daarmee verklaard.

Helaas is dit programma met onze huidige kennis van zaken volstrekt onuitvoerbaar. Het is al vrijwel onmogelijk om te zeggen of leven in ons eigen heelal mogelijk is onder drastisch gewijzigde condities. Het lijkt bijvoorbeeld redelijk om aan te nemen dat hiervoor het element koolstof vereist is, maar het is anderszijds bijzonder moeilijk om andere mogelijkheden uit te sluiten. Of er in een van de andere dalen van het String gebergte intelligent leven kan bestaan is een vraag die ik bijzonder interessant, maar vele malen moeilijker vind.

Hoe het ook zij, een waardig slot van het verhaal van de Hoge Energie fysica zou voor mij al de eenvoudige constatering zijn dat wij in een van die vele dalen van dat String gebergte leven. Dit is een bescheiden, maar heel misschien haalbaar doel. Als dat zo is, en als String Theory aan onze verwachtingen voldoet, hebben we een complete theorie voor alles wat er in ons heelal gebeurt, een theorie die precies voorspelt wat we in eventuele toekomstige experimenten nog mogen verwachten, en die geen ruimte laat voor verrassingen. Het zou helemaal mooi zijn als we ook nog kunnen begrijpen waarom wij juist in dit heelal leven en niet in een ander. Helaas is op dit moment zelfs het eerste, bescheiden doel niet meer dan een mooie droom.

Het voorgaande was een schets van een mogelijke afloop van het verhaal. Het is de afloop die mij gezien de huidige stand van zaken het meest wenselijk lijkt, maar uiteindelijk tellen slechts de harde resultaten. De natuur zal zich van mijn wensen vermoedelijk weinig aantrekken. Ondanks het woord “slot” in de titel was het bepaald niet mijn bedoeling om te suggereren dat het einde al spoedig bereikt zal worden. Integendeel, het zal nog vele decennia werk vergen om String Theorie volledig in kaart te brengen. Ik verheug me op een boeiende voortzetting van dit avontuur.

Dankwoord

Tot slot wil ik graag nog enige woorden van dank uitspreken.

Op de eerste plaats wil ik het Lorentz Fonds bedanken voor het ondersteunen van deze leerstoel, de Universiteit Nijmegen voor het instellen ervan, en de curatoren, de hoogleraren Kleiss, Janssen en van Leeuwen, voor het in mij gestelde vertrouwen.

Verder wil ik graag het NIKHEF en de FOM bedanken voor het feit dat zij me toestaan een deel van mijn werk hier in Nijmegen te vervullen.

Ik zou het zeer op prijs hebben gesteld als ik mijn promoter, Roger Van Royen, hier persoonlijk had kunnen bedanken. Ik was zijn eerste promovendus, en helaas ook zijn laatste. Een flink deel van mijn kennis van Quantum Velden Theorie heb ik aan hem te danken. Ik denk ook met veel plezier terug aan talloze waardevolle, emotionele, en altijd inspirerende discussies.

Dat soort discussies kenmerkte trouwens mijn jaren als student en promovendus op het instituut Theoretische Hoge Energie Fysica hier in Nijmegen. De sfeer was steeds uitstekend en ik heb hier een zeer goede tijd gehad. Daarvoor verdienen ook de andere twee hoogleraren, Prof. de Swart en Prof. Dullemond mijn dank. Beste Johan en Kees, ik vond het erg leuk om jullie dit voorjaar eens bij mij in de collegebanken te zien zitten. Het was echter slechts een zeer beperkte compensatie voor alles wat jullie mij geleerd hebben.

Die goede sfeer werd natuurlijk ook in belangrijke mate bepaald door de toevallige samenkomen van een aantal kleurrijke individuen. Ik wil in het bijzonder Dr. van Neerven noemen, die in feite mijn copromotor was. Beste Willy, aan jou heb ik de andere helft van mijn kennis van veldentheorie te danken.

Hooggeleerde Kleiss, Beste Ronald. Ik stel het zeer op prijs dat je mij hebt aanvaard als collega op dit instituut. Wij vertegenwoordigen weliswaar twee extreme kanten van dit vak, maar tot nu verloopt de communicatie probleemloos. Ik hoop dat we er in slagen om hier weer net zo'n geweldig instituut op te bouwen als ik me kan herinneren uit mijn tijd als promovendus.

Beste ouders, ik wil jullie graag bedanken voor de opleiding die jullie mij hebben laten genieten. Jullie hadden misschien enige twijfels over mijn keuze voor natuurkunde, maar jullie hebben niet geprobeerd daar verandering in te brengen. Jullie zagen denk ik heel goed dat dat weinig zin gehad zou hebben. Ik hoop dat jullie het resultaat toch kunnen waarderen.

Zeergeleerde Gato-Rivera, beste Beatriz, als natuurkundige met wetenschappelijke interesses die vrijwel gelijk zijn aan de mijne begrijp je als geen ander de twijfels, teleurstellingen maar ook de mooie momenten die bij dit vak horen. Ik ben zeer gelukkig dat ik die emoties met je kan delen.

Ik heb gezegd.