

# De God van de Fysici

Rede uitgesproken door

**Prof.dr. Jan Zaanen**

bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar  
op het vakgebied van de natuurkunde  
aan de Universiteit Leiden op 13 december 2002.

Mijnheer de Rector Magnificus, zeer gewaardeerde toehoorders,

## Deel I: Het religie gen.

Onlangs werd mijn aandacht getrokken door een artikel in de krant gewijdt aan de oratie van de Nijmeegse godsdienstpsycholoog Janssen [1]. De teneur van het verhaal was dat het universeel voorkomen van godsdienst in menselijke samenlevingen van elke soort en elke tijd geen toeval is. Janssen poneerde de stelling dat het verlangen naar godsdienstige beleving in onze genen verankerd zit. Hij verwees onder andere naar recent neurobiologisch onderzoek waaruit zou blijken dat intellectuele activiteit in sterke mate bepaald wordt door emoties. Dit zou te verklaren zijn uit biologische noodzakelijkheid. Ik citeer: ‘als we alleen maar vanuit onze ratio zouden leven, dan zouden we niet weten wat we moeten kiezen, uit de talloze alternatieven die voorhanden zijn. We zouden eindeloze beslismomen moeten doorlopen. Dat redt ons werkgeheugen niet. Door nu het aantal alternatieven emotioneel te reduceren, kunnen we die keuze wel maken.’

Dit is een belangwekkende gedachte. Het suggereert dat wij mensen zonder dat we ons er bewust van zijn onderworpen zijn aan een terreur van religieusiteit, opgedrongen door onze genen. Als dit zo is, dan kan het niet beperkt zijn tot onze overtuigingen aangaande het leven na de dood, maar moet het zich ook uitstrekken naar bezigheden die ogenschijnlijk het tegenovergestelde zijn van gelovigheid. Ik bedoel natuurlijk de wetenschap, en in het bijzonder de variëteit hiervan die pretendeert de strengste normen ten aanzien van ratio versus gelovigheid te hanteren, de natuurkunde.

Ik beschouw Robert J. Laughlin van Stanford University als één van de grote natuurfilosofen van deze tijd. Laughlin heeft in 1998 de natuurkunde Nobelprijs gekregen voor zijn ontdekking van de verklaring van het fractionele quantum Hall effect. Ik ben zelf van de emotionele overtuiging dat het fraktionele quantum Hall effect de grootste doorbraak is in de fundamentele natuurkunde van de afgelopen 25 jaar.

Onafhankelijk van Janssen *et al.* heeft Laughlin ook het religie gen opgespoort, met dit verschil dat hij dit inzicht in de wetenschappelijke praktijk van alledag probeert toe te passen. Laughlin heeft een omstreden reputatie. Als beoordeelaar geldt hij als wispelturig en onbetrouwbaar. Sommigen van U zijn persoonlijk geconfronteerd geweest met zijn gewoonte om de prettige atmosfeer tijdens bijeenkomsten te verstoren met hufferige commentaren. Deze reputatie rust in niet geringe mate op onbegrip. Aan een ieder die luisteren wil legt Laughlin uit dat hij bezig is een strategie gericht op waarheidsvinding uit te testen. In een eerste stap wordt de alledag van het wetenschappelijk bedrijf afgebeeld op categorieën die afkomstig zijn uit het kerkelijk leven. Het plaatje waar elke voordracht over een bepaald onderwerp mee begint wordt het ikoon. De herhaling van de feiten waar iedereen het over eens is in de inleiding van de voordracht wordt de liturgie, en zo verder. De zin van deze semantische oefening is dat het helpt in het opsporen van de dogma's, de centrale leerstellingen die een specifieke wetenschappelijke discipline haar identiteit verlenen. Nu komt de finesse van Laughlin's methode. Deze dogma's kunnen natuurlijk waarlijk wetenschappelijk zijn, maar

om hier achter te komen moet men op zoek gaan naar een ketterij. Het is a priori niet duidelijk of één op deze wijze gevonden ketterij van belang is, en om hier achter te komen moet deze empirisch onderzocht worden op een manier die kwalitatief niet anders is dan de proefballonnen methodiek die recentelijk opschudding veroorzaakt heeft in de vaderlandse politiek. Eén, niemand maakt zich druk en het dogma is blijkbaar geen dogma. Twee, uit scherpe rationele commentaren blijkt dat er een denkfout in de ketterij geslopen is. Drie, afschuw golft door de gemeenschap maar geen geleerde is in staat om in rationele termen uit te leggen waarom het zo fout is. In het laatste geval is er een gereede kans dat het religie gen aan het werk is, en het is wetenschappelijke plicht om de ketterij verder te perfectioneren, met als aanbeveling om de weg van maximale sociologische weerstand te volgen.[2]

In kerkelijke analogie is de fysica als het katholicisme. Hoewel monotheïstisch bestaat er een hele dierentuin van meerdere en mindere heiligen. Als werkend wetenschapper wordt men geacht heel tevreden te zijn met een sinterklaas ketterij, dat wil zeggen als het gelukt is een provinciaal heilig man van zijn voetstuk te ketteren. Echter, dit is geen excuus om af te blijven van de grote vragen, en een gelegenheid als deze is bij uitstek geschikt om op dubieuze wetenschappelijke gronden de overmoed de vrije hand te laten. Ik wil u een persoonlijke fascinatie voorleggen die zich in de loop der jaren in mijn geest gevormd heeft. Dit gaat over een vermoeden betreffende de mogelijkheid dat een ketterij geformuleerd kan worden, met als doelwit de God van de Fysici in de monotheïstische zin. Voor ik dit vermoeden kan toelichten, moet ik eerst het catechismus van de natuurkunde in beknopte vorm samenvatten: er is maar één God en dat is de Symmetrie, en haar profeten zijn onder andere Plato, Newton, Einstein, Dirac en Witten.

## **Deel II: De Schoonheid en de Troost.**[4]

Het begon met de oude grieken, en de fundamenteën van deze fysica zijn allicht het scherpst verwoord door Plato.[5] De grieken vonden hun inspiratie in de destijds jonge wiskunde, de Euclidische geometrie. Euclides begint met precieze mathematische definities. Om een voorbeeld te geven: ‘een punt is wat geen deel heeft’, ‘een lijn is lengte zonder breedte’ en ‘een rechte lijn is een lijn die gelijkmatig ligt met de punten op zichzelf’. Dat laatste is verwarrend en dat ligt niet aan U. Het blijkt dat de specialisten er nog steeds niet uit zijn wat Euclides hier precies bedoelt heeft.[6] Denkt u maar dat bedoeld wordt dat de rechte lijn de kortste verbinding is tussen twee punten.

Dit is niet zomaar een rechte lijn, maar een precies kaarsrechte lijn. Het wonder van de Euclidische geometrie is, dat beginnend met een gering aantal van deze wiskundige definities een groot aantal onverwachte conclusies volgen. Plato is van mening dat deze wiskundige wereld een werkelijkheid weerspiegelt, die in een bepaalde zin echter is dan de materiele werkelijkheid zoals die tot ons komt via onze zintuigen. Hoewel onze geest geen problemen heeft om zich die wiskundig kaarsrechte lijn voor te stellen, is deze in de materiele werkelijkheid alleen maar te benaderen. De lijn die we in de materiele werkelijkheid trekken ter illustratie van de Euclidische geometrie zal bij

nader onderzoek nooit helemaal recht zijn, vanwege de oneffenheden in het papier of het schoolbord. Toch is er geen twijfel aangaande de realiteit van de wereld van de wiskundige abstracties. De verrassende, tegenintuitieve inzichten van de wiskunde zijn daarvoor te machtig en Plato kwam tot de conclusie dat deze geestelijke wereld van abstracte perfecties, de vormen, wel werkelijker moest zijn dan de materiele wereld. Het was in deze optiek ook mogelijk om waarheid te vinden in deze vormen wereld. Bijvoorbeeld, wat is meer, beter, een cirkel of een vierkant? Het antwoord is de cirkel. Waarom? Op de cirkel is elk punt hetzelfde, terwijl de hoekpunten van het vierkant anders zijn dan de punten op de zijden. De cirkel is daarmee perfekter dan het vierkant, en is daarmee dichterbij de waarheid. De grieken begrepen symmetrie, de cirkel is symmetrischer dan het vierkant.

Nu, grofweg 2500 jaar later, weten we dat er veel meer waarheid steekt in deze metafysische noties dan de oude grieken konden bevroeden. De werkelijkheid zoals we die met onze menselijke zintuigen waarnemen is inderdaad een schijnwerkelijkheid. Er bestaat een hogere werkelijkheid waar de rondheid als van de cirkel in totalitaire zin de baas is. Eén verschil is dat deze hogere werkelijkheid een materiele werkelijkheid is waarvan we absoluut zeker weten dat deze echt bestaat, terwijl we ook precies kunnen vertellen waarom deze hogere werkelijkheid niet waarneembaar is met onze menselijke zintuigen. Het andere verschil is dat de rondheid van een perfectie is die de grieken zich niet konden voorstellen, omdat het hier symmetrieën betreft van een grootsheid die alleen maar met moderne wiskundige middelen te zien is.

De eerste stap in deze goede richting werd gezet door Copernicus, Galilei en Newton. Hun denken was geïnspireerd door de perfectie van de beweging van de hemellichamen, een thema wat de oude grieken ook al in de greep had. Echter, het werd begrepen dat de hemellichamen op directere wijze het karakter van de werkelijkheid lieten zien dan het gedoe op de aardbol. De grote stap werd gezet door Newton die liet zien dat de fundamentele bewegingswetten in wiskunde vastgelegd kunnen worden. In hun diepste wezen zijn deze onderworpen aan symmetrie. Klassieke mechanica begint met behoudswetten, een voorschrift dat alles bij hetzelfde moet blijven. Behoudswetten zijn op hun beurt afgeleiden van symmetrie principes. Als de ruimte waarin het materiele lichaam beweegt translatie invariant is, volgt dat het impuls behouden is. Dit is de precieze manier om uit te drukken dat een dingetje met een gegeven massa eeuwig met dezelfde snelheid blijft doornvliegen als de ruimte waarin het vliegt overal precies hetzelfde is.

Dit alles is slechts een opmaat. De diktatuur van de mathematische symmetrie werd pas in haar volle omvang duidelijk met de ontdekking van de quantum fysica. Hoewel door en door empirisch getest, heeft de quantum theorie een reputatie dat zij niet erg aardig is voor mensen. Zelfs onder natuurkundigen van formaat vindt men de opvatting dat quantumfysica niet werkelijk te begrijpen is. Bijvoorbeeld, de grote fysicus Feynman drukte het in 1965 als volgt uit: 'There was a time when the newspapers said that only twelve men understood the theory of relativity. I do not believe there ever was such a time. There might have been a time when only one man did because he was the only guy who caught on, before he wrote his paper. But after people read the paper a lot of people understood the theory of relativity in one way or the other,

certainly more than twelve. On the other hand I think I can savely say that nobody understands quantum mechanics.’ Dit citaat kwam ik tegen in het recente boek ‘The Elegant Universe’ van Brian Greene wat ik overigens een ieder aanraad die meer over deze materie wil weten.[4] Greene commentarieert: ‘Unlike relativity, few if any people ever grasp quantum mechanics at a soulful level.’

Ik ben het hier niet mee eens. Ik interpreteer ‘soulful’ in de geest van de oude grieken, en vanuit dit perspectief is de quantum fysica héél erg eenvoudig, de klassieke mechanica van de hemellichamen nogal ingewikkeld, en de troep waar wij als mensen doorheen baggeren heel erg ingewikkeld. Dat we de neiging hebben het omgekeerd te zien is een psychologisch probleem. Onze hersenen zijn geconditioneerd door die ingewikkelde troep van alledag en daarom hebben ze een probleem met het herkennen van de ware eenvoud.

De ware eenvoud is de eenvoud van het mathematische symmetrie principe. Laat ik dat uitleggen aan de hand van de galileische invariantie, de ruimte waarin elk punt precies hetzelfde is. In de klassieke mechanica legt deze invariantie op dat impuls niet verandert. De quantum fysica gaat veel verder: omdat elk punt hetzelfde is, kan het materiele object geen voorkeur hebben voor één bepaald punt in de ruimte en het moet daarom overal tegelijkertijd zijn. Als we het toch ergens willen vastzetten, lokaliseren, moet er een oneindig hoge prijs betaald worden in de vorm van snelheden die, hoewel onbepaalbaar, willekeurig groot kunnen zijn. Voor de fysici, dit is het grote inzicht wat zo zichtbaar wordt in het padintegraal formalisme van Feynman. Begin met het aktie principe van de klassieke mechanica en alles wat gedaan moet worden is het herstellen van de gelijkwaardigheid van alle trajecten in configuratie ruimte die gelijkwaardig zijn onder de symmetrie, en de quantum fysica volgt in haar volle glorie. Waarom vond Feynman dit niet eenvoudig?

De niet-fysicus heeft wat meer uitleg nodig om de absurditeit van wat ik net gezegd heb in te kunnen zien. Hoe zou deze bijeenkomst er uit zien als dit een oratie in de quantum wereld zou zijn? Wij zijn gelokaliseerd, u zit in een stoel en ik sta voor deze kansel en dat mag niet! In den beginne is er het heelal, en daar is elk punt in principe precies hetzelfde. Met andere woorden, elk electron en quark uit uw lichaam, de stoel waar u in zit, het akademie gebouw, de aardbol, het zonnestelsel, en zo verder, zou geen voorkeur mogen hebben voor welk bepaald punt dan ook in dit nagenoeg oneindig grote heelal. Met andere woorden, u en ik, het akademie gebouw, de aardbol, enzovoorts, zouden een ijle quantum mist moeten vormen waar elk van de elementaire deeltjes waar u uit bent samengesteld tegelijkertijd zou moeten verkeren op de lokatie van Cygnus X en die van de Rapenburg te Leiden. U moet het me eens zijn, dit is raar maar wel erg eenvoudig.

De natuur laat meer van haar ware gezicht zien als afstanden- en tijden korter worden. Hoewel u hier rustig op uw stoel zit, is elk electron en elke quark waar u uit opgebouwd bent zich netjes aan het conformeren aan de regels van de quantum mist, tenminste als de afstanden en tijden voldoende kort zijn. Om deze quantum soep in haar volle glorie te kunnen waarnemen hebben we het over een afstand van grofweg een miljoenste van een miljardse meter en een tijd van een miljardste van een miljardste seconde. Om

zo snel en zo klein te kijken zijn de meetapparaten van de fysici nodig en met de grootste apparaten van dit soort, reusachtige installaties die te vinden zijn in de buurt van Geneve en Chicago, wordt het mogelijk de natuur bij nog veel kleinere tijden en afstanden te bestuderen.

Wat gebeurt er als we steeds kleiner en sneller kijken? Het wonder is dat de natuur de ladder van de symmetrie opklimt. De natuur wordt steeds ronder. Symmetrie heeft namelijk een pikorde en in ons mensenbestaantje krijgen we alleen maar de laagste sport van de ladder te zien: de rondheid van Plato's cirkel, de translatie invariantie van Galilei's ruimte. Echter, wiskundigen en fysici hebben in de loop der eeuwen het begrip van symmetrie enorm weten op te rekken. Met mathematische middelen is het mogelijk rondheid te creëren die ronder is dan wat we ons kunnen voorstellen. Om een voorbeeld te geven, de cirkel is als een 'oppervlak' in twee dimensies en deze heet wiskundig  $SO(2)$ . De bol is een letterlijk oppervlak in 3 dimensies en is duidelijk ronder dan de cirkel,  $SO(3)$ .  $SO(4)$  is als een oppervlak in de 4 dimensionale ruimte en hoewel niet meer voor te stellen is deze symmetrie eenvoudig wiskundig te beschrijven. Hieruit volgt dat  $SO(4)$  ronder is dan  $SO(3)$ , op een soortgelijke manier als  $SO(3)$  ronder is dan  $SO(2)$ . De wiskunde maakt het mogelijk om steeds verder te veralgemeniseren, en het is ook geen probleem om een voorstelling te maken van een enorme symmetrie zoals  $SO(10)$ .

Zonder het expliciet gezegd te hebben, heb ik het tot nut toe gehad over globale symmetriën, wat betekent dat alles bij hetzelfde blijft als alles tegelijk op dezelfde manier verdraait of verschuift, en dit is iets waar we in ons dagelijks leven aan gewend zijn. Er bestaat echter ook een andere algemene categorie van symmetrie die als geheel hoger staat in de pikorde dan de globale symmetrie: de lokale- of ijk symmetrie. Deze betekent dat we op elk ruimte-tijd punt de symmetrie verschuivingen en verdraaiingen kunnen uitvoeren ongeacht wat er aan de hand is op alle andere ruimte-tijd punten. Quantum fysica aangedreven door lokale symmetrie grijpt de macht als we dieper doordringen in de natuur. De quantum electrodynamica, de verklaring van elektrische en magnetische fenomenen, wordt gecontroleerd door de lokaal symmetrische versie van Plato's cirkel, de  $U(1)$  ijk symmetrie. Het werd pas echt spannend toen Yang en Mills ontdekten dat quantumvelden theorieën mogelijk waren, gecontroleerd door veel grotere ijk-symmetriën. Dit kwam tot bloei in de zeventiger jaren van de vorige eeuw. Het werd mogelijk om met deeltjesversnellers afstanden te onderzoeken die zelfs héél klein zijn in vergelijking met de grootte van het proton, en het werd duidelijk dat bij deze hele hoge energieën de natuur beschreven wordt door een Yang-Mills theorie gecontroleerd door de  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$  ijk symmetrie, het standaard model.

Dit is nog niet einde verhaal. In de oren van de toehoorder klinkt  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$  allicht niet zo rond en dat klopt – die maaltkens drukken uit dat het een wat gemankeerde symmetrie is. Echter, het standaardmodel suggereert dat als we verder omhoogkruipen op een gegeven moment de relatief kleine symmetriën van het standaard model in één hele grote opgaan. Dit zou wel eens de  $SO(10)$  symmetrie kunnen zijn die ik eerder aangestipt heb. Deze triomf is tegelijkertijd het begin van de pijn van de hoge energie fysica. Om dit zeker te weten moeten er experimenten gedaan worden, en de benodigde energieën zijn dusdanig hoog dat er een versneller nodig is die

zich van de Rapenburg tot grofweg  $\alpha$  Centauri uitstrekt. Dit is nog maar een klein pijntje in vergelijking met de verscheurende pijn die zwaartekracht heet. De mooiste van alle klassieke theorien, weer vanwege symmetrie, is de algemene relativiteitstheorie van Einstein, die verteld dat zwaartekracht en ruimte-tijd één groot geheel vormen. De tragiek is dat zwaartekracht, alias ruimte en tijd, en de quantum fysica niet door één deur willen. Toch denken we zeker te weten dat bij de zogenaamde Planck schaal, die maar een stukje kleiner is dan de  $SO(10)$  schaal, zwaartekracht even quantum moet worden als al het andere.

Geen nood, zegt de fysicus, want als er een probleem van dit soort opduikt weten we uit eerdere ervaring waar we de oplossing moeten zoeken. Het moet nog mooier. Met andere woorden, kunnen we een symmetrie principe voorstellen wat nog ronder is dan wat we gewend zijn? Zoals lokale symmetrie onvergelykbaar veel ronder is dan globale symmetrie bestaat er een symmetrie die op haar beurt weer onvergelykbaar veel ronder is dan iksymmetrie. Deze heet terecht supersymmetrie en het ontbreekt mij de tijd om deze uit te leggen. Deze supersymmetrie wil theorieën controleren met een rijkere structuur dan de Yang-Mills theorie, de snaren theorie of ook wel de M theorie. De beoefenaren van deze kunst zoals Witten zijn er erg opgewonden over en ik begrijp er net genoeg van om deze opwinding te kunnen volgen. Het is een mathematische structuur van een woeste schoonheid die de goedkeuring zou krijgen van Plato, Newton, Einstein en Dirac. Het enge aan de zaak is wel dat het contact met de experimentele werkelijkheid volstrekt verloren is gegaan. De harde voorspellingen van deze theorie kunnen alleen maar gecontroleerd worden met versnellers model  $\alpha$  Centauri.

Ik ben aan het einde gekomen van de beloofde samenvatting van het catechismus der fysici. Ik moet nog één brandende vraag beantwoorden. Als die symmetrie god van de fysici werkelijk bestaat, waarom openbaart zij zich niet aan ons, stervelingen? De fysici hebben een glashelder antwoord. Symmetrie kan zich zelf opeten, en dit effect heet spontane symmetrie breking. Deze vindt zijn oorsprong in het feit dat naast symmetrie de natuur zich veel aantrekt van oneindigheid. Een quantum velden theorie kunt u zich als volgt voorstellen. Op elk puntje in ruimte en tijd zit een quantum vrijheidsgraad, een dingetje met een mening ingegeven door de symmetrie. Elke vrijheidsgraad is constant bezig deze mening uit te wisselen met soortgenoten op naburige ruimte-tijd punten. Omdat in elk eindig ruimte-tijd volume een oneindigheid van zulke punten bestaan, is het enige wat echt bestaat een oneindigheid van vrijheidsgraden, en dit betekent op zijn beurt dat alleen de collectieve mening van het geheel der dingetjes betekenis heeft. In de mensenwereld is het zo dat het gedrag van een enkel mens en dat van grote groepen mensen heel verschillend kan zijn, psychologie en sociologie zijn niet voor niets hele andere wetenschappen. In de quantum wereld is dit niet anders. De quantum velden theorie is als de sociologie van de quantum fysica die gedragingen beschrijft die niet af te lezen zijn van de quantum psychologie van een enkel deeltje.

Beginnend in de omstreken van de Planck schaal is het ruimte-tijd volume erg klein, en daarmee is ook het aantal vrijheidsgraden klein, hoewel nog steeds oneindig. Als we uit zoomen naar grotere afstanden doen steeds meer vrijheidsgraden mee en worden de gedragingen van het geheel ook steeds kollektiever. Hoewel het mathematisch te

bewijzen is, blijft het wonderlijk. Hoewel elke individuele vrijheidsgraad zich nauw gezet moet houden aan de precieze regels van de symmetrie, kan een voldoende grote oneindigheid [7] van vrijheidsgraden spontaan besluiten de symmetrie niet meer te gehoorzamen, en de symmetriepijl vast te zetten in een bepaalde stand. Het idee is dat een kaskade van zulke symmetrie brekingen plaatsvindt als we afdalen vanaf de Planck schaal. Supersymmetry gaat teloor,  $SO(10)$  breekt in  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$ , electromagnetisme en zwakke wisselwerkingen ontkoppelen bij de electrozwakke schaal, confinement eet  $SU(3)$  op, en tenslotte geven zelfs ruimte translaties en rotaties het op. Die laatste bijzin slaat direkt op u. Waarom vormt u geen quantum mist van electronen en quarks die uitgesmeerd is over de kosmos? Omdat u bestaat uit grofweg een miljoen maal miljard maal miljard electronen en quarks die gezamenlijk besloten hebben om lak te hebben aan de translatie symmetrie van het heelal, met als gevolg dat u rustig in uw stoel kunt blijven zitten.

### **Deel III: Het maakbare universum.**

Ik hoop van harte dat degenen onder u die met mij in de leer zijn genoten hebben van deze vertrouwde opsomming. Fysici, wees gewaarschuwd, dit is emotie en volgens Janssen ligt het religie gen op de loer! Volgens Laughlin is nu het moment aangebroken om een ketterij te formuleren. Dit is minder eenvoudig dan u allicht denkt. Tot en met het standaardmodel is het gestaalde wetenschap, absolute empirische waarheid binnen haar geldigheidsbereik. De gelovigheid krijgt echter de ruimte als we de vraag stellen naar wat er achter het standaard model zit. Uit de wijze waarop ik deze materie heb gepresenteerd moet het centrale dogma u duidelijk geworden zijn. Naarmate de natuur in toenemende mate haar ware gezicht laat zien, raakt ze meer en meer in de greep van de wiskundige schoonheid van de symmetrie. De wetenschappelijke redenen hiervoor is het mechanisme van spontane symmetriebreking, en dit betekent dat wij vol vertrouwen het onbekende tegemoet kunnen varen zolang wij theoretisch koersen op de mathematische kwaliteit.

Het moment is aangebroken om sommige gemoederen te verhitten. Zover ik het kan overzien moet dit een ketterij van het zuiverste soort zijn. Dames en heren fysici, spontane symmetrie breking is in feite een nogal ingewikkeld gedoe, en hoewel het duidelijk is dat het kan gebeuren, is er naar mijn beste weten geen sluitend bewijs te geven dat het ook moet gebeuren. Sterker, kunnen we ons voorstellen, of nog beter, bewijzen dat het omgekeerde ook waar kan zijn? Als symmetrie kan breken, kan het ook uit het niets ontstaan, opduiken in een quantum theorie als we van veel naar meer gaan? Als het mogelijk is om symmetrie niet alleen te breken maar ook om symmetrie te maken, is het a priori niet uit te sluiten dat aangekomen bij de Planckschaal een afstotelijke troep op ons staat te wachten.

De assertiviteit waarmee ik deze gevaarlijke stelling durf te poneren heeft alles te maken met mijn eigenlijke leeropdracht, de quantum theorie van vormen van materie zoals die onder aardse omstandigheden aangetroffen worden, ofwel de quantum gecondenseerde materie fysica. Het is een historisch feit dat het mechanisme van spontane symmetrie



breking eerst ontdekt en begrepen is in deze context, en pas later in letterlijke vorm overgenomen is door de hoge energie fysica, omdat het aldaar goed van pas kwam om het teloorgaan van de goddelijke symmetrie te verklaren. De specifieke kracht van de gecondenseerde materie fysica heeft veel te maken met het relatieve gemak waarmee de natuur experimenteel onderzocht kan worden, en de natuur heeft meer fantasie dan de beste theoreticus. U hebt al een elementair voorbeeld hiervan voorbij zien komen. Ik herhaal, met theoretische middelen is het erg moeilijk om spontane symmetrie breking te bewijzen. Echter, het eenvoudige feit dat u in een stoel zit en niet een ijle quantum mist vormt drukt uw neus op het feit dat translatie symmetrie wel gebroken moet zijn.

In deze branche van de natuurkunde was het tot voor kort niet anders dan in de hoge energie fysica. Symmetrie is iets wat breekt maar niet opduikt. Gedwongen door experimentele omstandigheden, maar ook door de eigen dynamiek van de theorie, begonnen er echter een tiental jaar geleden verhalen te verschijnen waarin op een wat impliciete, als u wilt stiekeme, manier gespeculeerd werd dat symmetrie maakbaar is. Het lijkt er op dat deze schroom ondertussen afgeworpen is. Als een spreker zijn voordracht begint met ‘dames en heren, let op, ik heb alweer een manier gevonden om een symmetrietje uit de mouw te schudden’ kan hij heden ten dage rekenen op tenminste een aantal verheugde gezichten in zijn publiek. Symmetrie maken wordt mode in mijn kringen, en ik wil u in het kort vertellen hoe het zover heeft kunnen komen.

Zoals gezegd, geexperimenteer aan aardse materie is hier bijzonder belangrijk. Hoewel u zelf ook in deze algemene categorie past, betekent het nog niet dat u zich zorgen hoeft te maken dat u plotseling verdwijnt in een zuchtje quantum mist, omdat uw quarks democratisch besloten hebben symmetrie te maken. U en ik zijn niet uit het juiste hout gesneden. Quantum gecondenseerde materie fysici houden zich bezig met interessantere vormen van aardse spul dan waar mensen uit gemaakt zijn. Het eerste gebod is dat het quantum niet volledig dood geslagen wordt door symmetrie breking, en dit soort quantum materie is minder ver van uw bed dan u allicht vermoedt. De elektrische stromen in koperdraad die zorgen dat hier het licht brandt hebben alles van doen met de quantum mist. Electronen hebben hele kleine massa’s wat het mogelijk maakt dat ze zelfs onder onze omstandigheden zich quantum-mechanisch blijven gedragen. Temperatuur is, naast massa, een invloed die schadelijk is voor het quantum, en door af te koelen worden de quantum-effecten duidelijker. Een klassiek voorbeeld is dat de elektrische weerstand in een koperdraad, een maat voor het ongemak wat een elektrische stroom ondervindt, afneemt als het kouder wordt. De reden is dat de quantum-niveligheid van de electronen steeds perfecter wordt en het electronen systeem wordt daarmee steeds beter in het negeren van de symmetrie-gebroken omgeving. Het hoogtepunt is de supergeleider, een toestand van ijskoude elektronische materie waar het op een precieze manier waar wordt dat elk electron overal tegelijkertijd is, terwijl tegelijkertijd de collectieve stroom van electronen zijn weerstand geheel verliest.

Ijskoude electronen systemen zijn dus bij uitstek het toneel om de werking van de collectiviteit van de quantum-fysica onder aardse omstandigheden te bestuderen. Deze electronen zijn op allerlei ingenieuze wijzen te manipuleren, en er blijkt een grote variëteit van gedragingen te bestaan die onmiskenbaar kollektief en quantum mechanisch

zijn. Sommigen, zoals de metallische electronen in koper, de aluminium supergeleider en het fractioneel quantum Hall effect zijn redelijk goed begrepen, maar anderen zoals de hoge Tc supergeleiders en de zware fermion systemen zijn grote mysteries. Ik heb niet de tijd en de zin om U uit te leggen waar dit allemaal precies over gaat. Wat u moet onthouden is dat het weer gaat over de quantum fysica van veel. In elk grammetje stof bevinden zich grofweg een miljoen maal miljard maal miljard electronen, en elk electron is een dingetje met een quantum mening dat aan het communiceren is met zijn soortgenoten. Dit klinkt bekend, en dat is geen toeval. In dit opzicht zijn deze electronen systemen niet anders dan de fundamentele velden. Sterker, het blijkt dat tenminste in de gevallen waar we begrijpen wat er aan de hand is precies dezelfde wiskundige taal van toepassing is als in de hoge energie fysica, de quantum velden theorie. Echter, in de gecondenseerde materie fysica wordt intensief de confrontatie met de natuur gezocht door middel van het experiment, en al die onbegrepen gevallen maken duidelijk dat de fysici zelfs in het jaar 2002 de grootste moeite hebben om de quantum fysica van heel erg veel te begrijpen.

Ondanks al hun pracht en praal hebben deze electronen systemen toch een beperking. Deze beperking is het fundamentele gebrek aan symmetrie. Beginnende bij het begin kan er alleen maar symmetrie verloren gaan, en het begin van de gecondenseerde materie fysica is de atomaire schaal. Op deze schaal heerst er helaas nog maar een klein klupje van symmetrieën over de electronen, niets in vergelijking met die pracht van de hoge energie. Alles wat er kan gebeuren is dat één of meerdere van deze symmetrieën breken. Dit resulteert in geordende vormen van electron materie. Omdat we weten wat de symmetrieën zijn in den beginne, omdat we alles begrijpen van het breken van symmetrie, en omdat symmetrie de absolute baas is, is het geen probleem om een keurig tabelletje in elkaar te zetten waarin alles staat wat mogelijk is. Vervolgens kunnen we controleren of de natuur zich aan dit tabelletje conformeert. Dit blijkt in veel gevallen prachtig te kloppen en dit is de ouderwetse gecondenseerde materie fysica, een wetenschappelijk succesverhaal uit de vorige eeuw. Hoewel de Physical Review er nog mee vol staat is dit ondertussen een vorm van postzegel verzamelen geworden omdat de grote vragen beantwoord zijn. Echter, ik duidde al op het bestaan van de mysterie systemen, en deze zijn zo mysterieus omdat ze niet in het symmetrie tabelletje passen. Dankzij de noeste arbeid van de experimenteel fysici werd dit met vallen en opstaan steeds duidelijker, en de fascinatie werd met name gevoedt door het feit dat deze systemen zich in bepaalde opzichten eenvoudiger, platonischer gedragen dan de bekende weg.[8] Fascinatie met eenvoud? U raadt het al, het gaat over de God van de Fysici. Het mysterie wordt een stuk minder mysterieus als we het tabelletje uitbreiden met kolommen waar eenvoudiger dingen in staan, afkomstig van grotere symmetrieën die eigenlijk niet mogen. De experimentele vooruitgang dwong de theoretici om zich tot de ketterij te bekeren. Symmetrie is niet alleen breekbaar, maar ook maakbaar.

Het was alsof de schellen voor de ogen wegvielen. Toen de theoretici bevrijdt van het dogma hier hard over gingen nadenken bleek symmetrie maken helemaal niet zo moeilijk. Dit bleek op allerlei manieren te kunnen, en ondertussen beschikken wij over een kastplankje vol met specimens van gemaakte symmetrie, die stuk voor stuk rusten op precieze mathematische argumentaties die laten zien dat er in principe niets op

tegen is als de natuur dit zou doen.

Sommige van deze gemaakte symmetrie specimens hebben te maken met het herwaarderen van theoretische feiten die al sinds jaar en dag bekend zijn maar een speciale betekenis krijgen in de context van de electronen systemen.[9] Om u een idee te geven, een beroemd voorbeeld is de toestand van materie die quantum-kritisch genoemd wordt. Dit heeft alles te maken met spontane symmetrie breking. Ik herhaal, spontane symmetrie breking kan gebeuren maar moet niet gebeuren. Er moet dus een punt bestaan waar de kondities zodanig zijn dat de oneindigheid van vrijheidsgraden met z'n allen op het punt staan om het besluit te nemen om de symmetrie te breken. Dit is het kritische punt en hier gebeurt een wonder. Precies bij het kritische punt heerst besluiteloosheid: zullen we wel of niet de symmetrie breken? Dit getwijfel blijkt nu op totalitaire wijze het heft in handen te nemen. Het mooie is dat dit gebrek aan besluitvaardigheid zich op precies dezelfde manier manifesteert ongeacht of we naar een heel klein stukje van het systeem kijken of naar een heel groot stuk. Het resultaat is dat er een grote ruimte-tijd symmetrie opduikt die schaal invariantie heet. Hoewel dit niets van doen heeft met de wensen van individuele electronen, maakt het op het kritische punt niets uit of we het systeem van elektronen beschouwen op een meter, een millimeter, een micrometer, of een nanometer schaal, het gedraagt zich op precies dezelfde manier. Als bijproduct van symmetriebreking duikt een hele mooie nieuwe ruimte-tijd symmetrie op, de schaal invariantie.[10]

Hoewel het heel boeiend is om dit te zien gebeuren in elektronen systemen, is de reden voor mijn opgewondenheid toch elders. Herinnert u zich dat er die twee hele verschillende categorieën van symmetrieën bestonden? De globale varieteit van onze huis, tuin en keuken werkelijkheid, en die veel mooiere lokale symmetrie, de baas van het standaard model? Als we even electromagnetisme vergeten, zijn atomaire elektronen als u en ik, ze weten alleen af van globale symmetrie. Mijn nachtrust wordt genomen door het feit dat wij op dit moment beschikken over een aantal volstrekt redelijke theorieën, die laten zien dat tenminste in principe deze globaal symmetrische electronen samenzweringen op touw kunnen zetten die uitmonden in lokaal symmetrische collectieve gedragingen.[11] Het is mijn persoonlijke overtuiging dat er hard empirisch bewijs op tafel ligt voor het waar worden van één van deze theorieën in hoge Tc supergeleiding [12], maar dit dient u met een korreltje zout te nemen omdat de wereld van mening is dat deze theorie uitgevonden is door Zaanen.

Nu wilt u natuurlijk weten waar dit precies over gaat. Helaas mag ik u dat niet vertellen, omdat ik daarmee de Lagendijkse oratie wet zou overtreden die voorschrijft dat het ongepast is om een publiek van uw soort lastig te vallen met de besognes van alledag. Ik ben u echter nog wel een verklaring schuldig ten aanzien van de grote ketterij. Kunnen we uit de maakbaarheid van de symmetrie in de hoge Tc supergeleiding concluderen dat we aangekomen op de Planck schaal een afzichtelijke troep zullen aantreffen? Zoals ik aangekondigd heb zou ik op dubieuze gronden niet meer dan een vermoeden presenteren betreffende het mogelijke bestaan van een Grote Ketterij, en dat is dan ook alles. Er worden wel degelijk pogingen ondernomen om verbanden te leggen met het standaardmodel en de quantum zwaartekracht, andere andere door Laughlin die notabene gebruik maakt van de quantum kritikaliteit.[3] Het is echter helaas zo dat de gecon-

denseerde materie voorbeelden van gemaakte symmetrie te weinig rijkdom bezitten om veel in de melk te kunnen brokkelen in de woeste wereld van de M theorie. Ik heb de indruk dat neurobiologen ervan overtuigd zijn dat de emoties schuilen in het deel van onze hersenen wat wij gemeenschappelijk hebben met bijvoorbeeld de dinosauriers, het limbisch systeem. De ambitie van dit betoog reikt in dit opzicht niet verder dan een poging van mijn kant om het limbisch systeem van de zeer gewaardeerde collega's van de hoge energie te irriteren. In de gecondenseerde materie is de wet van de toenemende schoonheid niet langer meer een heilig huisje.

## **Deel IV: De dankzegging.**

Ik hoop dat het mij gelukt is om een indruk te geven van de wonderlijke wereld waar ik elke dag in mag verkeren. Het feit dat ik mijn leven mag wijden aan deze materie beschouw ik als een groot voorrecht. Echter, ik beschouw het ook als een teken dat het de mensheid lukt om meer te zijn dan slechts een zoogdieren soort. Om Janssen nogmaals te citeren: 'Want ons bewustzijn geeft ons weliswaar een grote voorsprong op andere diersoorten om te overleven, maar het heeft als nadelig bij effect dat we ons er ook van bewust zijn dat we uiteindelijk niet zullen overleven. Daarom zijn mensen bijna overdreven bezig met zich een zinvolle plek te veroveren in een zinvolle wereld.' Dit is de opduikende, maakbare kant van het religie gen, en u hebt de afgelopen veertig minuten bijna overdreven geijver kunnen aanhoren, gewijdt aan de zinvolheid van de wereld zoals ervaren door een fysicus.

Ik schaam mij hier niet voor. Het voor de hand liggende alternatief is de wereld buiten de ivoren toren en daar schijnt het vooral te draaien om geld. Geld is een zoogdieren eigenschap. Geld is de telbare, gemathematiseerde vorm van macht en macht is eenvoudig. Wij zijn sociaal levende zoogdieren en onder deze soort betekent macht dat u het, u weet wel, vaker mag doen. Het protest van de priesters tegen het gouden kalf is natuurlijk van alle tijden, maar wij leven in een tijdsgewricht waar tenminste een waarschuwing weer op zijn plaats is.

Het is een relatief recente ontwikkeling die ik zelf het systeem van de commerciële wetenschap noem. Dit is gebaseerd op het idee dat het wetenschappelijk proces naar bedrijfskundige principes á la AHOLD georganiseerd kan worden. Centraal staat de greed, de verslaving aan geld, die in dit bedrijf funding heet. Deze wordt verworven met handige marketing- en sales strategien, zoals het voorkantje Nature wat elke onvoorbereide konsument direkt begrijpt. Nadat deze funding verworven is, zet deze zich om in een nog groter vermogen om goede sales en marketing strategien uit te voeren, en de eindfase hiervan is wat hype genoemd wordt. In Europa in het algemeen, en aan de Leidse instelling in het bijzonder, profiteren wij gelukkig van de wet van de remmende voorsprong. In Amerika is de commerciële wetenschap kwaadaardig aan het woekeren geslagen. Het is schrijnend om te ervaren hoe de creatieve energie van soms briljante Amerikaanse kollega's vloeit in eindeloze pogingen om de zaak verkocht te krijgen. Ik heb het stellige vermoeden dat het systeem zijn beste tijd gehad heeft. Het wordt in toenemende mate als zodanig herkend, en ik neem een golf van afschuw waar die door

alle wetenschappelijke geledingen vloeit. Het is de hoogste tijd dat de geldwisselaars verwijderd worden van het plein van de tempel der wetenschap, zodat de beoefenaars van deze kunst al hun energie weer kunnen besteden aan de core-business. Het zelfreïnigende vermogen van de gemeenschap moet niet onderschat worden. Voor de ware beoefenaar is wetenschap veel interessanter dan geld, en het zijn de intellectuele loosers die de commerciële wetenschap dragen. Natuurlijk moet wetenschap geld kosten, maar de commerciële wetenschapper is eenvoudig uit het systeem te filteren met alweer een Lagendijks principe: meneer of mevrouw de fundraiser, wat nam uw nachtrust toen u dit proposal in elkaar aan het zetten was?

Ik begrijp heel goed dat politiek de kunst van het zwijgen is, en toch schroom ik niet om op dit podium deze uitspraken te doen. Het hart van mijn werkgever zit op de juiste plaats, en u moet het met mij eens zijn dat het van bestuurlijke leeuwemoed getuigd om Harvard waarden omhoog te houden in de afwezigheid van het bijpassende endowment. Ik ervaar het als een persoonlijke verantwoordelijkheid om mijn steentje bij te dragen aan deze nobele zaak en ik dank het CvB en allen die bijgedragen hebben aan het totstand komen van deze benoeming voor het in mij gestelde vertrouwen.

Leidse fysici, het vervult mij met trots om deel uit te mogen maken van uw illustere gezelschap, en woorden schieten te kort om mijn erkentelijkheid uit te drukken ten aanzien van uw kollektieve inspanningen om mij aan boord te houden. U kunt rekenen op mijn volledige inzet ten aanzien van onze gemeenschappelijke zaak. U bent met te veel om u allen hier persoonlijk te bedanken en daarom beperk ik me tot mijn vriend, voormalige baas en huidige kollega Wim van Saarloos. Wim, jouw ongevenaarde verstandigheid mag wat mij betreft spreekwoordelijk worden.

My dear students and junior coworkers, it is a habit that the young professor adds at this point a word of gratitude to his intellectual fathers, the ones who contributed disproportionately to the shape of his mind. My list might surprise you. George Sawatzky, my thesis advisor, is obvious. George, once again my gratitude. The second one you can also guess, it is Chandra Varma who adopted me as his intellectual child at Bell Labs. I have the guts feeling that the others would be surprised when they would learn that they appear on the list. It is no accident that I cited Bob Laughlin and Ad Lagendijk, and the last one on my list is Frank Wilczek. The secret behind this strange list is as follows. The trait which is hardest to acquire is a fierce, uncompromising independence of mind. You can only acquire this trait by watching role-models, giving you the guts to start the fight for the liberation of your own mind. Since George, Chandra, Bob, Ad or Frank did not get hanged in the process, why should you worry?

Ik betreur het ten zeerste dat mijn biologische ouders hier niet aanwezig kunnen zijn. Ik heb respect voor kennis bijna letterlijk met de moedermelk ingegoten gekregen. Ik weet zeker dat dit één van de hoogtepunten van hun leven geweest zou zijn als zij hier aanwezig hadden kunnen zijn. Mijn zoon Filip, het doet mij een intens genoeg om jou trots te zien op jouw vader.

Diejenige die am meisten ein Dankeschön verdient ist meine Frau Christa. Seit fünfzehn Jahren wird sie jeden Tag konfrontiert mit dem Schicksahl, dass sie mit einem Physiker ihr Leben teilt. Jede Physiker-frau kann bestätigen, dass es nicht immer ein Vergnügen

ist den Gatten mit der Physik zu teilen. Christa, du weisst es, aber es schadet nicht es nochmal zu sagen. Am Ende bist du veel wichtiger.

Ik heb gezegd.

## Referenties.

1. H. Visser, *Religie blijft altijd bestaan*, NRC Handelsblad, 3 augustus 2002, pagina 31.
2. Deze formulering is van mijn eigen hand, ingegeven door de retorische eis om het kort en bondig te houden. Desalniettemin kan ik de lezer ervan verzekeren dat dit op precieze wijze de essentie van Laughlin's beweegredenen weergeeft. Een recent voorbeeld van een ketterij van de meester zelf in de context van de gecondenseerde materie fysica is *Gossamer superconductivity* (<http://arxiv.org/cond-mat/0209269>): de Mott isolator is het enige algemeen geaccepteerde dogma in hoge Tc supergeleiding, rede voor Laughlin om er een "spinneweb supergeleider" in te zien. Het fraaiste voorbeeld vind ik referentie 3, schennis van het heiligste der heiligen in de theoretische natuurkunde, Einstein's algemene relativiteitstheorie.
3. G. Chapline, E. Hohlfeld, R.B. Laughlin, en D.I. Santiago, *Quantum Phase Transitions and the Breakdown of Classical General Relativity*, <http://arxiv.org/gr-qc/0012094>.
4. De hoofdlijnen van dit deel van het betoog zijn verre van origineel. Zie bijvoorbeeld het bijzonder indringende *Fearful Symmetry: the Search for Beauty in Modern Physics* van Anthony Zee (Princeton University Press, Princeton, 1999). Dit is een bewerking van de oorspronkelijke versie uit 1986, en de laatste ontwikkelingen (stringtheorie, supersymmetrie) zijn daardoor onderbelicht. Deze staan op de voorgrond in het uitstekende *The Elegant Universe* van Brian Greene (W.W.Norton & Company, New York, 1999). Hoge energie fysici gaan slordig om met het begrip van spontane symmetriebreking en dit is verder ontwikkeld in de gecondenseerde materie fysica: zie bijvoorbeeld het wat gedateerde Philip W. Anderson, *Basic Notions of Condensed Matter Physics* (Benjamin/Cunings, Menlo Park, 1984), of mijn eigen syllabus *The Classical Condensates: from Crystals to Fermi Liquids* (binnenkort op het web, <http://www.lorentz.leidenuniv.nl/Zaanen>).
5. Zie bijvoorbeeld D.J. Connor's , *A Critical History of Western Philosophy* (McMillan, New York, 1964).
6. Zie David E. Joyce's (Dept. of Mathematics, Clark University) website, <http://aleph0.clarku.edu/~djoyce/>, onder Euclid's elements.
7. Een mogelijke tegenwerping is natuurlijk dat bij de Planck schaal ruimte-tijd zelf quantiseert, diskreet wordt. De continuum formulering die ik hier presenteer klinkt allicht wat ongewoon, en moet als volgt begrepen worden. Symmetrie zal bij voldoende hoge temperatuur ongebroken zijn, en dit correspondeert met een korte imaginaire tijdsas in het Euclidische pad-integraal formalisme, en daarmee met een 'relatief kleine' oneindigheid van vrijheidsgraden. Onder afkoeling wordt de tijdsas langer, en moeten dus timeslices toegevoegd worden (in de zin van de tijds-continuum limiet). Daarmee neemt het aantal vrijheidsgraden toe van 'minder oneindig naar meer oneindig', totdat bij voldoende lage temperatuur het aantal vrijheidsgraden voldoende groot geworden is zodat de symmetrie breekt bij de thermische fase-overgang.
8. Zie bijvoorbeeld, J. Zaanen, *Hoge-Tc's verleiding: I. quantumkriticaliteit en de verborgen orde*, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde **67**, 270 (2001); J. Zaanen, *Why high Tc is exciting*, Ann. Univ. Curie-Sklodowska, Lublin – Polonia, sectio AAA, Vol. LVII, 9 (2002) (<http://arxiv.org/cond-mat/0103255>).

9. De opduikende schaalinvariantie bij het klassieke kritische punt werd ontdekt door L.P. Kadanoff in de zestiger jaren, en verder vervolmaakt door K.G. Wilson in de vorm van de renormalisatie groepen theorie, beloont met de Nobelprijs in 1982. Gedurende de laatste tien jaar is duidelijk geworden dat in de quantum context allerlei onverwachte, spannende effecten opduiken: zie ref.'s [3], [8] en vooral S. Sachdev, *Quantum Phase Transitions* (Cambridge University Press, 1999).
10. Voor de volledigheid, het is ook al sinds en jaar dag bekend dat onder speciale kritische omstandigheden interne symmetriën ‘meegesleept’ kunnen worden door de schaalinvariantie, om op te gaan in een grotere symmetrie precies bij het kritisch punt. Een voorbeeld is S.C. Zhang’s ‘unificatie’ van  $SO(2)$  lading- en  $SO(3)$  spin globale symmetrie in de overkoepelende  $SO(5)$  symmetrie (Science **275**, 1089, 1997). Een erg gewaagde speculatie is dat zelfs supersymmetrie dynamisch gegenereerd zou kunnen worden in het geval van fermionische quantum fase-overgangen: zie P. Coleman, <http://arxiv.org/cond-mat/0206003> (2002).
11. Men kan zichzelf gemakkelijk voor de gek houden bij het maken van lokale symmetrie. Een eerste betekenis van lokale symmetrie is dat het lokale behoudswetten impliceert, en deze kunnen opgevat worden als lokale randvoorwaarden. Deze geven op hun beurt de theoreticus de vrijheid om bij wijze van rekentruk naar believen niet bestaande vrijheidsgraden in te voeren, die tijdens de berekening weer moeten verdwijnen door de invloed van de ijkfluctuaties naar behoren in rekening te brengen. Dit is de gedachte achter de  $U(1)$  en  $SU(2)$  ijktheorieën van spin-lading scheiding van Anderson, Baskaran, etcetera (de ‘stiekeme’ theorieën van een tiental jaar geleden). Deze theorieën zijn mathematisch niet te controleren en het grootste probleem is dat het niet duidelijk is of al die extra vrijheidsgraden überhaupt een materiele betekenis hebben. Een wijdverbreide opvatting is dat ijktheorieën alleen maar serieus genomen kunnen worden als de ijkvelden een interpretatie hebben in termen van objecten ‘gemaakt’ uit elektronen. Recent werk van Patrick Lee en Naoto Nagaosa aan de  $SU(2)$  theorie is in dit opzicht hoopgevend (<http://arxiv.org/cond-mat/0211699>). De volgende moeilijkheid heeft te maken met het dualiteits begrip. Met name in het geval van Abelse symmetrieën in 2+1 dimensie is de toestand gekarakteriseerd door een gebroken globale symmetrie tegelijkertijd de wanordelijke fase in termen van wanorde operatoren die lokale symmetrie gehoorzamen. Het lokaal- of globaal zijn van de symmetrie hangt dus af van de orde- of wanorde ‘bril’ van de waarnemer. Deze ambiguïteit kan als volgt vermeden worden: dualiteit in dit soort theorieën legt een verband tussen twee fasen, terwijl de volledige ijktheorie drie fasen toelaat (Higg’s, Coulomb, en Confining). Er zijn op dit moment drie volwaardige ijktheorieën bekend die aan de bovenstaande criteria voldoen, die alledrie gecontroleerd worden door Ising ijsymmetrie: spin fractionalisatie in niet co-lineaire quantum antiferromagneten (S. Sachdev, <http://arxiv.org/cond-mat/0211027>), Cooper paar fractionalisatie (T. Senthil en M.P.A. Fischer, Phys. Rev. B **62**, 7850, 2000), en de stripe fractionalisatie theorie van Sachdev *et al.* (Phys. Rev. B **66**, 094501, 2002), en Nussinov en mijzelf (Phil. Mag. B **81**, 1485, 2001). De ‘materiele’ interpretatie rust in deze drie gevallen op topologische (wan)orde en in dit opzicht kunnen wat mij betreft ook de Chern-Simons theorie van het fractionale quantum Hall effect (afkomstig van Wilczek *et al.*) en de  $QED_3$  theorie van de wanordelijke d-wave supergeleider van Tesanovic *et al.* (Phys. Rev. Lett. **87**, 257003 (2001)) op het plankje met gemaakte lokale symmetrie specimens bijgezet worden.
12. Z. Nussinov, J. Zaanen, <http://arxiv.org/cond-mat/0211699> en [cond-mat/0209437](http://arxiv.org/cond-mat/0209437).