

Gepubliceerd als: Aerts, D., 1994, "Quantummechanica", in *Wetenschap en Filosofie*, eds. Apostel, L. en Verbeure, F., Pelckmans, Kapellen.

QUANTUMMECHANICA

Diederik Aerts* ,
Theoretische Natuurkunde,
Vrije Universiteit Brussel,
Pleinlaan 2, 1050 Brussel.

Vanaf haar ontstaan, in het begin van deze eeuw, heeft de quantummechanica allerlei nieuwsoortige moeilijkheden veroorzaakt, voor de natuurkundigen zowel als voor de filosofen. Enerzijds zijn deze problemen te wijten aan een gebrekkig begrip van de basisconcepten die gebruikt worden in de quantummechanica, en anderzijds vinden ze hun oorsprong in de mysterieuze en eigenaardige aard van de werkelijkheid zelf, zoals deze getoond wordt door de quantummechanica en de experimenten ermee verbonden. Alleen al het uitmaken van welke paradoxale quantumfenomenen met het formalisme en welke met de aard van de werkelijkheid te maken hebben, houdt de natuurkundigen nu meer dan zestig jaar bezig. Het laatste decennium heeft er een versnelling plaatsgegrepen in het onderzoek naar de quantumstructuren, enerzijds door de technologische ontwikkelingen, die het mogelijk maken om rechtstreeks experimenten in verband met de aard van de werkelijkheid uit te voeren, en anderzijds door de explosieve ontwikkelingen van de theoretische en wiskundige natuurkunde, waar nu vruchtbaar gezocht wordt naar een gemeenschappelijke taal en een geünifieerd kader¹.

* Onderzoeksleider bij het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek.

¹Deze ontwikkeling heeft voor de wiskunde plaatsgevonden op het einde van de vorige eeuw, en het universele kader werd de verzamelingenleer. Voor de natuurkunde is deze stap nog steeds niet gezet, wat maakt dat natuurkundigen van mening kunnen verschillen over de betekenis van veel voorkomende basisconcepten, zoals 'waarschijnlijkheid', 'experiment', 'meting', 'toestand', enz... Het onderzoek naar de fundamenten van de natuurkunde gaat nu hand in hand met de ontwikkeling van zulk een algemeen kader (zie ref [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 19]).

In het eerste gedeelte van deze tekst geven we een korte schets over de toestand en de evolutie van de quantumtheorie op het einde van deze eeuw. In het tweede gedeelte brengen we de problemen van de quantummechanica naar voren die hun oorsprong vinden in de structurele tekortkomingen van de orthodoxe theorie, terwijl we in het derde gedeelte de quantummechanische concepten die verbonden zijn met echte nieuwe eigenschappen van de micro-wereld bespreken.

1 Quantummechanica op het einde van de twintigste eeuw

In het overzicht van het rapport over Natuurkunde dat gepubliceerd werd door het 'National Research Counsel' [1], wordt gesteld dat de quantummechanica illustreert op welke onvoorspelbare manier nieuwe kennis in de fysica de maatschappij kan beïnvloeden: "Gebaseerd op de studie van de eigenschappen van de materie, de spectra van de atomen en de beweging van geladen deeltjes, brengt de quantummechanica ons een totaal nieuwe manier om de fysische werkelijkheid te modelleren... Het wordt nu algemeen aanvaard dat quantummechanica niet enkel de basistheorie is van de natuurkunde, maar ook van de scheikunde, de biologie en andere wetenschappen. En wat meer is, quantummechanica heeft rechtstreeks geleid tot het ontstaan van nieuwe industrieën, zoals de semiconductoren en de optische communicatie, en nieuwe technologieën, zoals de creatie van exotische materialen, de laser en de transistor, een basiselement van de allomtegenwoordige computer. Niemand kan nu voorspellen hoe de maatschappij nog verder zal veranderen als gevolg van deze revolutie."

De hedendaagse technologie streeft naar een fijne beheersing van complexe fenomenen. Ze tracht controle te verkrijgen over het gebruik van energie en het opslaan en transport van informatie. Om deze doelen te bereiken heeft men steeds een grotere miniaturisatie en hogere snelheid nodig. Daarom zal een systematisch gebruik van quantummechanische processen in de nabije toekomst een noodzakelijkheid worden. Dat is de reden waarom entiteiten die beschreven worden door quantummechanica met een hernieuwde en actieve belangstelling worden bekeken. Deze nieuwe fase van onderzoek contrasteert met de passieve aard van de bespiegelingen in de beginjaren van de quantummechanica. Toen was de hoofdbedoeling het begrijpen van de nieuwe beschrijving van de werkelijkheid, terwijl men nu de eigenschappen van materie en licht gebruikt om in te grijpen in de microwereld. Als een gevolg hiervan ontstaan nieuwe gegevens en nieuwe noden binnen het onderzoek in de quantummechanica, die leiden tot nieuwe ontwikkelingen, zowel op theoretisch als op experimenteel vlak. Deze evolutie stimuleert de studie van de quantumprocessen vanuit een algemene systeemtheoretische aanpak, en de introductie van duidelijke en goedgedefinieerde fysische basisconcepten is een diepe en dringende behoefte geworden. Inderdaad, gewoonlijk ontwikkelt het actief gebruik van een succesvolle theorie zich vlugger dan het fundamentele begrijpen ervan, omdat dikwijls enkele conceptueel-eenvoudige modellen genoeg zijn voor een uitgebreide mogelijkheid

tot gebruik. In het quantumgebied is de situatie anders, omdat beelden en eenvoudige modellen nog steeds ontbreken, zelfs na zovele jaren.

Het ontbreken van duidelijke en fysisch-begrijpbare basisconcepten voor de quantummechanica is voor een groot stuk te wijten aan de manier waarop de theorie ontstond. In tegenstelling met de andere grote pijler van de moderne natuurkunde, de relativiteitstheorie, die van bij haar ontstaan geconstrueerd werd aan de hand van welgedefinieerde en intuïtief duidelijke basisconcepten², werd de quantummechanica op een compleet andere manier geboren. De constructie van de quantummechanica volgde een kronkelig pad door vele nieuwe maar slecht gedefinieerde en niet-begrepen concepten in te voeren.

De eerste quantummechanica (1890-1925, Max Planck, Albert Einstein, Louis de Broglie, Hendrik Antoon Lorentz, Niels Bohr, Arnold Sommerfeld en Hendrik Antonie Kramers), die nu gewoonlijk de 'oude quantumtheorie' genoemd wordt, was zelfs niet ingebed binnen een coherent wiskundig model. Men moest wachten tot in 1925, toen Werner Heisenberg [2] en Erwin Schrödinger [3] de eerste twee versies van de nieuwe quantummechanica voorstelden, en toen enkele jaren later Paul Adrien Dirac [4] en John Von Neumann [5]³ deze twee versies unificeerden tot wat nu de orthodoxe quantummechanica wordt genoemd. Van dat moment af bezat de quantummechanica een gesofistikeerd wiskundig formalisme, maar bleef zeer vaag en onduidelijk voor wat de betekenis van de basisconcepten betreft. Het succes van de experimentele voorspellingen was echter zo groot dat de nieuwe theorie onmiddellijk beschouwd werd als fundamenteel. Omdat de basisconcepten zo onduidelijk waren rezen er aanstonds grote problemen van conceptuele aard, en er ontstond een groot debat over de inhoud en de betekenis van de quantummechanica, waaraan alle belangrijke natuurkundigen van die tijd deelnamen (Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Pauli, Dirac, Von Neumann, enzovoort).

Dikwijls wordt de orthodoxe quantummechanica van Von Neumann nog steeds als de referentie voor de theorie beschouwd door diegenen die de quantummechanica onderwijzen,

²We merken op dat gedurende het laatste decennium ook de verstaanbaarheid en de duidelijkheid van de concepten van de relativiteitstheorie in twijfel wordt getrokken. In verband met de vierdimensionale structuur van de tijd-ruimte in de relativiteitstheorie is er een groot probleem om deze te unificeren met een quantumtheorie die fundamenteel spreekt over processen die plaatsgrijpen in de tijd. We kunnen niet ingaan op deze recente maar fundamentele problematiek in het bestek van dit artikel.

³Von Neumann's versie van de quantummechanica (1932) wordt beschouwd als deze die het standaard-wiskundig model levert. Dit wiskundig model bestaat uit de beschrijving van de toestand van een quantumentiteit door de eenheidsvector van een separabele complexe Hilbertruimte, en de beschrijving van een experiment door een zelftoegevoegde operator op deze Hilbertruimte met als eigenwaarden de uitkomsten van het experiment. Door een experiment verandert een toestand naar de eigentoestand van de corresponderende zelftoegevoegde operator overeenkomend met een zekere uitkomst van het experiment met een waarschijnlijkheid die gegeven wordt door het kwadraat van het inproduct tussen de eenheidsvector die de toestand voorstelt en de eenheidsvector overeenkomend met de bewuste eigenvector. Daaruit volgt dat als de toestand van de quantumentiteit geen eigentoestand is van een operator van een gegeven experiment, voor dit experiment alle uitkomsten mogelijk zijn, en elke uitkomst een waarschijnlijkheid heeft gegeven door het juist vermelde kwadraat van het inproduct tussen de betrokken vectoren. De deterministische dynamische evolutie van een quantumentiteit wordt beschreven door de Schrödingervergelijking.

terwijl er ondertussen allerlei alternatieve formalismen bestaan, die ieder voor zich verbeteringen en verduidelijkingen inhouden, en waarvan de uitwerking gewoonlijk gemotiveerd was door de reeds vermelde conceptuele tekortkomingen van de orthodoxe theorie. In de jaren zestig-zeventig begonnen groepen onderzoekers over de gehele westerse wereld deze nieuwe formalismen uit te werken. Laat me kort enkelen vermelden: (a) In Genève ontwikkelde de school van Josef M. Jauch een axiomatische formulering van de quantummechanica, en Constantin Piron bewees een fundamenteel representatiethorema voor de axiomatische structuur [6]. (b) De groep van Gunther Ludwig in Marburg ontwikkelde de 'convexe-verzamelingen-aanpak' [7], en in Massachusetts werkte de groep van Charles Randall en David Foulis aan een operationele aanpak [8]. Terwijl de groep van Peter Mittelstaedt in Keulen de logische aspecten van het quantumformalisme bestudeerde [9], werd de algebraïsche aanpak uitgebouwd (Jordan, Segal, Mackey, Varadarajan, Emch) [10], en formuleerde Richard Feynman de padintegralen [11]. Er ontstond de fase-ruimte-quantisatie (Grossman, Berezin), de meetkundige quantisatie (Souriau, Kostant) en de quantisatie door vervorming van algebra's (Flato, Lichnerowicz) [12].

Deze verschillende formalismen maakten alle een poging om meer duidelijkheid te brengen in het conceptuele labyrint van de orthodoxe theorie. Toch slaagt geen enkele van deze veralgemeningen erin de fundamentele onbegrijpbaarheid van de quantummechanica weg te nemen. De reden hiervoor is dat ze alle vertrekken vanuit eenzelfde methodologie, die we als volgt zouden willen samenvatten: "Eerst de wiskundige structuur en dan de fysische interpretatie van deze structuur". Ook de theorieën die nu, in de publieke opinie, maar ook bij een groot gedeelte van de professionele natuurkundigen, opgang maken als de meest geavanceerde unificaties (we denken hier aan de quantumchromodynamica en de stringtheorieën), werken expliciet vanuit deze wiskundige methodologie. Vanaf het begin van de jaren tachtig ontstond een groeiend gevoel bij een groot deel van de natuurkundigen die zich bezighouden met onderzoek van de quantumstructuren, dat deze methodologie moet verlaten worden. Er bestond de overtuiging dat men opnieuw moest vertrekken vanuit de natuurkunde zelf, en theorieën formuleren waarvan de basisconcepten duidelijk gedefinieerd zijn. Gelukkig valt deze fundamentele theoretische evolutie samen met een periode waarin een overvloed aan nieuwe experimentele gegevens ter beschikking komen, die alle zeer subtiele details testen van aspecten van de microwereld die vroeger enkel hypothetisch gekend waren. We denken hier aan de neutroneninterferometrie, de quantumoptika, de experimenten met individuele atomen, enz.... De nieuwe fysische gegevens over de aard van de quantumwerkelijkheid, gedeeltelijk voortspruitende uit deze experimenten, en gedeeltelijk geboren uit deze nieuwe methodologische aanpak, hebben het mogelijk gemaakt eindelijk klaar te zien in sommige van de oude quantumparadoxen, en daardoor openden zich dan weer nieuwe mogelijkheden voor de zo noodzakelijke fysicisering van de theorie.

2 De structurele tekortkomingen van het orthodoxe quantumformalisme en de valse paradoxen

Niels Bohr was van mening dat er een essentieel verschil bestond tussen een macroscopische entiteit en een quantumentiteit, en dat men daarom niet moest proberen om een macroscopische entiteit te beschrijven aan de hand van de quantummechanica. Deze mening was Bohr zeker ingegeven door het feit dat er inderdaad grote moeilijkheden tevoorschijn komen wanneer met de orthodoxe quantummechanica als een universele theorie wil beschouwen, en ook zoiets als de 'golffunctie van het meetapparaat' invoert⁴. Bohr kon echter geen argumenten leveren voor deze houding en dit was eigenlijk het geval voor alle belangrijkste aspecten van de zogenoemde Kopenhageninterpretatie. Deze interpretatie stelt apriori de orthodoxe quantummechanica als universeel denkkader, zodanig dat de manier waarop men 'kan' denken over de natuur beperkt wordt door de aard van het formalisme van de quantummechanica. De gevleugelde uitspraak van Bohr was: "Zo mag men niet redeneren in de quantummechanica", alsof de theorie ons een nieuwe manier van denken over de natuur voorschrijft. Deze overevaluatie van de draagwijdte van het orthodoxe formalisme zelf was de hoofdreden voor het feit dat de Kopenhageninterpretatie nooit veel enthousiasme heeft kunnen opwekken bij de natuurkundigen die nadachten over de problematiek. De mening van de anderen is dat quantummechanica een nieuwe fysische theorie levert en dan ook op die manier moet behandeld en gewogen worden. Alhoewel de Kopenhageninterpretatie, grotendeels door de enorme persoonlijke invloed van Niels Bohr, en waarschijnlijk ook door het feit dat de mensheid gevoelig is voor sterke denkdoctrines, de geesten van vele natuurkundigen heeft geblokkeerd en heeft verhinderd dat ze zich vragen stellen over de eigenaardigheden van de quantummechanica, is er steeds een voldoende kritische massa van natuurkundigen geweest die zich niet wilden laten onderwerpen aan een quantummanier van denken. Het is uit deze groep dat nu de nieuwe beelden langzaam beginnen te ontspruiten.

We willen in deze sectie eerst een korte schets geven van de aspecten van het probleem die hun oorsprong vinden in tekortkomingen van het orthodoxe quantumformalisme om dan door te dringen tot die gebieden van de quantumwerkelijkheid die echt nieuwe en onverwachte eigenschappen vertonen.

2.1 *Het probleem van de meting: is Schrödingers kat dood of levend, of geen van beide?*

Als men toch de quantummechanica wil gebruiken voor de beschrijving van de entiteit bestaande uit het meetapparaat (een macroscopische entiteit) en de quantumentiteit, dan komt men tot zeer eigenaardige voorspellingen. Het is Schrödinger die deze problematiek uitvoerig

⁴Heden ten dage kan men zelfs sommige zeer onzorgvuldige natuurkundigen horen spreken over de golffunctie van het heelal.

heeft behandeld, en we willen ze dan ook beschouwen door de ogen van zijn kat [13]. Schrödinger beeldt zich het volgende gedachtenexperiment in. We beschouwen een kamer waarin zich een radioactieve bron bevindt en een detector die radioactieve deeltjes kan detecteren. Er is ook een glazen fles met vergif en een levende kat binnen dezelfde kamer. De detector wordt aangezet gedurende een tijdsinterval waarop hij juist een kans van $1/2$ heeft om een radioactief deeltje, uitgezonden door de bron, te detecteren. Als de detector een deeltje detecteert dan springt een mechanisme in gang dat de glazen fles breekt waardoor het vergif vrijkomt en de kat sterft. Als de detector geen deeltje detecteert, dan gebeurt er niets en de kat leeft. We kunnen de uitkomst van het gehele experiment maar te weten komen wanneer we de kamer openen en zien wat er gebeurd is. Als we een quantumbeschrijving, binnen het orthodoxe quantumformalisme, toelaten van het gehele systeem (de kat inbegrepen), dan blijft de toestand van de kat (laat ons deze p_{kat} noteren) een 'superpositietoestand' van de twee toestanden 'de kat is dood' (laat ons deze toestand p_{dood} noteren), en 'de kat is levend' (laat ons deze toestand p_{levend} noteren) tot op het laatste ogenblik, namelijk wanneer we de kamer openen. We herhalen, $p_{\text{kat}} = 1/\sqrt{2}(p_{\text{dood}} + p_{\text{levend}})$, en deze superpositie wordt enkel verbroken wanneer we de kamer openen om te zien wat er aan de hand is. Een belangrijk gedeelte van de basisproblematiek van het quantumformalisme kan getoond worden aan de hand van dit voorbeeld, en daarom zullen we er uitvoerig op ingaan.

Als we de toestand, zoals hij beschreven wordt door de golffunctie van de orthodoxe quantummechanica, interpreteren als een wiskundig object dat enkel en alleen 'onze kennis' over het fysisch systeem beschrijft, dan is er geen moeilijkheid met Schrödingers kat. Inderdaad, binnen deze 'kennisvisie' kunnen we onderstellen dat de kat reeds dood of nog levend was, voor we de kamer openen, en dat de quantummechanische toestandsverandering enkel onze kennisname van dit feit beschrijft. Deze kennisvisie rekent ook af met een ander probleem: tijdens het openen van de kamer verandert, volgens het quantumformalisme, de superpositietoestand $p_{\text{kat}} = 1/\sqrt{2}(p_{\text{dood}} + p_{\text{levend}})$ 'plotseling' in een van de componenttoestanden p_{dood} of p_{levend} . Deze plotselinge verandering van toestand wordt in het quantummechanische jargon 'de collaps van de golffunctie' genoemd, en binnen de 'kennisvisie' vindt ze een natuurlijke verklaring. Als inderdaad de quantumgolffunctie onze kennis over de situatie beschrijft dan verandert deze kennis, en dus ook deze golffunctie, plotseling bij het inwinnen van nieuwe informatie, bijvoorbeeld door het openen van de deur van de kamer.

De kennisvisie gaat er dus van uit dat de quantummechanische golffunctie niet de werkelijkheid, die onafhankelijk is van onze kennis ervan, beschrijft, maar een voorstelling geeft van de cognitie die we bezitten over deze werkelijkheid. Daaruit volgt dat, indien de kennisvisie juist is, er een onderliggende werkelijkheid moet bestaan, die niet beschreven wordt door de golffunctie van de quantummechanica. In het voorbeeld van de kat levert deze onderliggende theorie de beschrijving van hoe de kat is, dood of levend, onafhankelijk van het feit of we de deur openen om daarvan kennis te nemen. De kennisvisie geeft daarom on-

middellijk aanleiding tot de hypothese van het bestaan van een 'verborgen-veranderlijken-theorie', die deze onderliggende werkelijkheid beschrijft. En hier rijst het probleem met de kennisvisie. Men kan aantonen dat het waarschijnlijkheidsmodel van een theorie, waarin een 'gebrek aan kennis' van een onderliggende werkelijkheid de oorzaak is van de waarschijnlijkheid (een verborgen-veranderlijken-theorie), steeds voldoet aan de axioma's van Kolmogorov⁵. Daar het waarschijnlijkheidsmodel van de quantummechanica niet voldoet aan deze axioma's, toont dit theorema dat de kennisvisie niet juist is. Recentelijk zijn ook experimenten uitgevoerd (in verband met de Bell-ongelijkheden), die bevestigen dat de verborgen-veranderlijken-hypothese verkeerd is.

Het is nu een welhaast uitgemaakte zaak dat de golffunctie van de quantummechanica niet onze kennis over het systeem, maar de werkelijke toestand van het systeem, onafhankelijk van het feit of we deze kennen of niet, voorstelt. Maar als dat zo is, dan brengt Schrödingers kat ons in de problemen. Zou het dan kunnen dat, voor we de kamer openen, de kat zich in een superpositietoestand, noch dood noch levend, bevindt, en dat deze toestand zich, door het openen van de kamer, naar een toestand van dood of levend transformeert? Het lijkt ons toch wel onmogelijk dat de werkelijkheid op deze manier zou reageren op onze waarnemingen. Een werkelijkheid waar een toestand in bestaan komt doordat we er kennis van nemen, is op zovele punten in contradictie met ons dagelijks werkelijkheidsbeeld, dat we het idee nauwelijks ernstig kunnen nemen. Toch lijkt het een onherroepelijk gevolg van de orthodoxe quantummechanica, toegepast op de gehele werkelijkheid. Recentelijk, door het ontstaan van de nieuwe formalismen, waarvan de basisconcepten veel dichter bij de werkelijkheid blijven, is er een totaal nieuw licht geworpen op deze problematiek.

2.2 *De nieuwe formalismen*

In deze nieuwe formalismen beschrijft men, op een zeer algemene manier, een entiteit S door middel van de verzameling van zijn toestanden, die men Σ noteert. Een toestand p , op een tijdstip t , beschrijft de werkelijkheid van de entiteit S op dit tijdstip t . Maar aan de verzameling van toestanden wordt niet apriori een bepaalde wiskundige structuur opgelegd, zoals dat wel het geval is in de quantummechanica (een Hilbertruimte) en in de klassieke mechanica (een faseruimte). Verder onderstelt men dat er experimenten worden uitgevoerd op de entiteit S , en de verzameling van relevante experimenten noteert men ϵ . Weer wordt er geen apriori wiskundige structuur vastgelegd voor de verzameling van deze experimenten, zoals dat wel

⁵De axioma's van Kolmogorov (door Kolmogorov expliciet naar voren gebracht in 1933) zijn deze van de klassieke waarschijnlijkheidsrekening, zoals reeds door Simon Laplace op punt gesteld in de vorige eeuw. Het quantumwaarschijnlijkheidsmodel voldoet niet aan deze axioma's van Kolmogorov. John Von Neumann was de eerste die een no-go-theorema voor de verborgen-veranderlijken-theorieën bewees [5], en later werd stapsgewijs het bewijs van de onmogelijkheid om de quantumwaarschijnlijkheden te reproduceren vanuit een verborgen-veranderlijken-theorie vervolmaakt [14].

het geval is voor de quantummechanica en de klassieke mechanica. Er wordt enkel ondersteld dat wanneer de entiteit S in een toestand p is en een experiment e wordt uitgevoerd, er een uitkomst x wordt bekomen met een zekere waarschijnlijkheid. Hierbij wordt de toestand p veranderd in een nieuwe toestand q . Op deze manier geeft men een algemene beschrijving van het meetproces. Bij afwezigheid van meting is de entiteit S op elk tijdstip t in een welbepaalde toestand $p(t)$, en deze toestand verandert met de tijd. Deze dynamische verandering wordt in het geval van de quantummechanica beschreven door de Schrödingervergelijking, en in het geval van de klassieke mechanica door de Newtonvergelijkingen. Er zijn reeds een aantal diepe en concrete resultaten bereikt door middel van deze algemene aanpak, waarvan we er enkele willen vernoemen, omdat ze rechtstreeks verbonden zijn met de oplossingen voor een gedeelte van de quantumparadoxen.

2.3 De klassieke componenten en de quantumcomponenten van een algemene beschrijving, en de oplossing van Schrödingers-kat-paradox

In deze nieuwe algemene beschrijving is het zeer goed mogelijk, en zelfs natuurlijk, om speciale experimenten te onderscheiden. Zo voert men het concept in van 'klassiek experiment': een experiment zodanig dat voor elke toestand van de entiteit S er steeds een uitkomst x gedefinieerd is. Een klassiek experiment is dus een experiment waarvoor de uitkomst met zekerheid bepaald is, ook voor men het experiment uitvoert. De verzameling van relevante experimenten ϵ zal in het algemeen geval een gedeelte klassieke experimenten en de rest niet-klassieke experimenten bevatten. Het is mogelijk om een theorema te bewijzen waarin het klassieke stuk van de beschrijving van een entiteit afgesplitst wordt [15]. De verzameling van alle toestanden kan dan geschreven worden als de unie van een verzameling klassieke mengsels, waar elk klassiek mengsel bepaald wordt door een verzameling micro-toestanden die niet-klassiek zijn. Als men op deze algemene situatie de quantummechanische axioma's formuleert, dan kan men aantonen dat de verzameling van toestanden binnen één klassiek mengsel kunnen voorgesteld worden door een Hilbertruimte. De verzameling van alle toestanden van de entiteit wordt dan beschreven door een oneindige verzameling van Hilbertruimten, één voor elk klassiek mengsel. De orthodoxe quantummechanica komt hier naar voren als een limietgeval, waar geen enkele klassieke meting aanwezig is, en dan geeft de voorstelling inderdaad aanleiding tot één Hilbertruimte. De klassieke mechanica is het andere limietgeval, waar enkel klassieke metingen aanwezig zijn, en dan geeft de voorstelling een faseruimtebeschrijving. De algemene situatie van een willekeurige fysische entiteit is noch puur quantum, noch puur klassiek, en kan alleen maar beschreven worden door een verzameling van verschillende Hilbertruimten. Als men het meetproces binnen dit algemene kader beschouwt, verdwijnt het probleem van de kat van Schrödinger. Het openen van de deur is een klassieke meting die niets verandert aan de toestand van de kat, en zo kan men ze ook beschrijven bin-

nen deze algemene aanpak. De quantumcollaps gebeurt wanneer het radioactief element gedetecteerd wordt door de detector, en dit proces is niet-klassiek, ook binnen de algemene beschrijving.

Niet alleen de Schrödingers-kat-paradox wordt opgelost binnen dit algemeen formalisme. Het is nu ook mogelijk om de quantummechanica en de klassieke mechanica te beschouwen als twee speciale gevallen van een meer algemene theorie. Deze algemene theorie is 'quantumachtig', maar veroorzaakt geen paradoxen voor het meetproces, omdat men het meetapparaat als een klassieke entiteit, en de te meten entiteit als een quantumentiteit beschrijft binnen hetzelfde formalisme. De paradox van de meting is te wijten aan de structurele beperktheid van het orthodoxe quantumformalisme.

2.4 De Einstein-Podolsky-Rosen paradox: nog meer beperktheden van het orthodoxe formalisme

Het altijd bestaan van de superpositietoestanden, oorzaak van Schrödingers-kat-paradox (de superpositietoestand van de levende en de dode kat), werd door Einstein, Podolsky en Rosen gebruikt voor de formulering van een veel meer subtiele paradoxale situatie. EPR beschouwen de situatie van twee gescheiden entiteiten S_1 en S_2 en de samengestelde entiteit S bestaande uit deze twee gescheiden entiteiten. Ze tonen aan dat het steeds mogelijk is om de samengestelde entiteit S in een toestand te brengen zodanig dat een meting op een van de deelentiteiten de toestand bepaalt van de andere deelentiteit. Voor een situatie van gescheiden entiteiten is dit een voorspelling van de quantummechanica die indruist tegen het concept 'gescheiden' zelf. Voor gescheiden entiteiten wordt de toestand van een van de entiteiten niet bepaald door wat men doet met de andere entiteit, en dat is wat ons bevestigd wordt door de experimenten die we kunnen uitvoeren op gescheiden entiteiten.

Weer kan een beschouwing van deze situatie binnen de nieuwe aanpak opheldering brengen voor deze paradox. Als men de situatie van twee gescheiden entiteiten bestudeert binnen het nieuwe algemene formalisme, dan is het mogelijk om te bewijzen dat de entiteit S die bestaat uit de twee gescheiden entiteiten S_1 en S_2 , nooit voldoet aan de axioma's van de orthodoxe quantummechanica, zelfs niet als men klassieke experimenten toelaat, zoals voor het geval van de meetparadox [16]. Er zijn twee axioma's van de orthodoxe quantummechanica ('weak modularity' en de 'covering law' in het jargon), die nooit voldaan zijn voor de situatie van een entiteit S die bestaat uit twee gescheiden quantumentiteiten S_1 en S_2 . De tekortkoming van de orthodoxe quantummechanica die hier geïdentificeerd wordt is structureel veel dieper dan deze die we eerder besproken hebben in verband met de meetproblematiek. Daar is het mogelijk om een oplossing voor te stellen die de ene Hilbertruimte van de orthodoxe quantummechanica vervangt door een verzameling van Hilbertruimten, en deze oplossing blijft hanteerbaar binnen het kader van het Hilbertruimteformalisme. De onmogelijkheid

lijkheid voor de orthodoxe quantummechanica om gescheiden entiteiten te beschrijven ligt in de vectorruimtestructuur van de Hilbertruimte zelf. De twee 'slechte axioma's' zijn de axioma's die aanleiding geven tot de vectorruimtestructuur van de Hilbertruimte, en als we deze axioma's verwijderen voor de beschrijving van gescheiden entiteiten, moeten we een totaal nieuwe wiskundige structuur voor de toestandruimte bouwen. Dat is echter wat de recente bevindingen ons voorschrijven, en het is de enige manier om het quantumformalisme te bevrijden van de EPR achtige paradoxen in verband met de beschrijving van gescheiden entiteiten. Er wordt aan gewerkt binnen de nieuwe formalismen.

2.5 De quantum-klassiek relatie: wijzend op dezelfde beperktheid van het orthodoxe formalisme

Het laten varen van de vectorruimtestructuur voor de verzameling van toestanden Σ is een ernstige wiskundige ingreep, maar er zijn recentelijk nieuwe bevindingen die er de noodzaak van bevestigen. De mogelijkheid om binnen het algemeen formalisme zowel klassieke entiteiten als quantumentiteiten te beschouwen lost de meetparadoxen op. Maar de mogelijkheden tot beschrijving blijven gepolariseerd tussen klassiek en quantum of in het algemeen een mengeling van beide. Zeer recentelijk is men nu ook begonnen om de tussenliggende gebieden te onderzoeken binnen dit algemeen formalisme. En weer blijken dezelfde twee axioma's een beschrijving van de tussenliggende gebieden onmogelijk te maken [17]. Als we dus een theorie formuleren zonder deze twee axioma's dan kunnen we quantum, klassiek, de mengeling van beide, maar ook tussenliggende structuren, die noch quantum en noch klassiek zijn, beschrijven. Deze aanpak zou het mogelijk maken om werkelijk een continue overgang van quantum naar klassiek te beschrijven.

Als besluit van deze sectie kunnen we stellen dat het orthodox quantumformalisme een aantal fundamentele tekortkomingen heeft die nu geïdentificeerd zijn. Het zijn deze tekortkomingen die leiden tot verschillende van de bekende paradoxen en men is volop bezig om de veralgemeningen uit te werken.

3 De mysterieuze aspecten van de quantumwerkelijkheid

In deze sectie willen we een korte schets geven van die aspecten van het quantumformalisme die wel degelijk verbonden zijn met nieuwe en onverwachte eigenschappen van de werkelijkheid van de micro-wereld.

3.1 De nieuwe experimenten

Het is voor ons experimenteel duidelijk dat de kat van Schrödinger niet dood of levend wordt door het feit dat we de deur openen⁶, en het is ook experimenteel duidelijk dat de toestand van een van twee gescheiden entiteiten niet bepaald wordt door wat men doet met de andere entiteit. Deze paradoxale voorspellingen van de orthodoxe quantummechanica hebben we kunnen verklaren als een gevolg van een structurele tekortkoming van het wiskundig formalisme. Het is echter experimenteel helemaal niet duidelijk wat deze speciale quantumeffecten, samenhangende met deze superpositietoestanden, in het geval ze 'wel' bestaan, betekenen. Sommige natuurkundigen zijn zover gegaan om te insinueren dat de bewuste superpositietoestanden misschien helemaal niet bestaan en slechts wiskundige artefacten zijn van de theorie. Recente experimenten hebben echter aangetoond dat het effectief mogelijk is om quantumentiteiten voor te bereiden in zulke superpositietoestanden. We willen kort enkele aspecten van deze experimentele resultaten aanhalen.

Bij experimenten met neutronenbundels van zeer lage energie slagen Helmut Rauch en zijn groep erin om één neutron binnen een siliciumkristal in een superpositietoestand van twee ver van mekaar verwijderde gelokaliseerde toestanden te brengen [18]. Het siliciumkristal heeft een doormeter van meer dan vijf centimeter, en de twee componenttoestanden zijn toestanden van een neutron dat gelokaliseerd is binnen kubusjes A en B met ribben van één miljoenste van een centimeter. Het lokalisatiegebiedje A van de ene componenttoestand, laat ons deze toestand p_A noteren, is meer dan drie centimeter verwijderd van het lokalisatiegebiedje B van de andere componenttoestand, die we p_B noteren. Het neutron wordt door Rauch voorbereid in een superpositietoestand p_{sup} van deze twee componenttoestanden, dit wil zeggen dat $p_{\text{sup}} = 1/\sqrt{2}(p_A + p_B)$. Als het neutron zich in de toestand p_{sup} bevindt, en men voert een detectie uit in een van de twee regionen A of B, dan heeft men een kans van 1/2 om het neutron te detecteren in het gebiedje A en een kans van 1/2 om het te detecteren in het gebiedje B. Rauch en zijn groep slagen erin om werkelijk de verifiëren dat het neutron zich in een superpositietoestand p_{sup} bevindt, doordat ze extra experimenten uitvoeren op het neutron in deze toestand. Een van de meest fascinerende van deze extra experimenten bestaat uit de rotatie van de spin van het neutron. Rauch draait door middel van een magnetisch veld, dat gelokaliseerd is in het gebied A, de spin van het neutron in de superpositietoestand p_{sup} . Het resultaat van een Larmorprecessie over een hoek van n graden door het magnetisch veld in het gebied A op de componenttoestand p_A resulteert in een werkelijke rotatie van $n/2$ graden,

⁶Enkel binnen een solipsistisch wereldbeeld, waar er geen verschil meer is tussen observatie (een experiment dat de buitenwereld bijna niet beïnvloed) en creatie (een experiment dat een stukje werkelijkheid maakt), zou de visie van een werkelijkheid die gecreëerd wordt op het moment van de waarneming zin hebben. Strikt gesproken kunnen we een solipsistisch wereldbeeld voor onszelf niet uitsluiten, omdat het uiteindelijk steeds wij zijn die de laatste observatie uitvoeren. Toch willen we opmerken dat zulk een solipsistisch wereldbeeld geen plaats geeft voor een heleboel belangrijke gegevens; bijvoorbeeld alleen maar de hypothese dat de anderen ook waarnemende wezens zijn. Als de kat van Schrödinger maar dood of levend wordt als de deur geopend wordt, wie mag deze deur dan openen? Dit maar even terzijde om op te merken hoe belangrijk en noodzakelijk deze bevindingen binnen de nieuwe formalismen zijn, omdat ze de quantummechanica verlossen van haar solipsistische implicaties, te wijten aan de structurele tekortkoming van het orthodoxe formalisme.

net zoals voorspeld aan de hand van het superpositieprincipe. Een gelijktijdige rotatie over n graden van de andere componenttoestand p_B , gebruik makende van een magnetisch veld in het gebied B , resulteert eveneens in een rotatie van $n/2$ graden van de spin van het neutron in de superpositietoestand. Rauch voert allerhande extra experimenten uit, die alle overeenstemmen met de quantumbeschrijving van het ene neutron in de superpositietoestand van de twee gelokaliseerde componenttoestanden. De lezer kan een gedetailleerde beschrijving van dit experiment en extra referenties vinden in [19]. Deze experimenten, en vele andere, bewijzen het werkelijke bestaan van deze bewuste superpositietoestanden, en de vraag die we ons nu stellen is of we uit deze experimenten ook besluiten kunnen trekken in verband met de fysische betekenis van de superpositietoestand. Voor we hierop antwoorden willen we een ander probleem van de quantummechanica bespreken, dat nauw verbonden is met de mogelijkheid om een fysische betekenis voor de superpositietoestanden voor te stellen.

3.2 De oorsprong van de quantumwaarschijnelijkheden: het ontdekkings-creatie-beeld

We hebben reeds vermeld dat de 'kennisvisie' niet juist is, en we hebben ook uitgelegd op welke manier ze een natuurlijke oplossing aanbood voor de situatie van Schrödingers kat. De kennisvisie deed echter meer dan een oplossing aanreiken voor Schrödingers kat, want ze gaf ook een eenvoudige 'klassieke' verklaring voor de aanwezigheid van de quantumwaarschijnlijkheid. Inderdaad, laat ons nog eens redeneren binnen de hypothese van de kennisvisie, waar de onderliggende werkelijkheid niet beschreven wordt door de golffunctie, maar door een verborgen-veranderlijken-theorie. In deze situatie vindt de quantumwaarschijnlijkheid op een natuurlijke manier zijn oorsprong in ons gebrek aan kennis over deze onderliggende werkelijkheid. Dit is ook de manier waarop de klassieke waarschijnlijkheid wordt verklaard, en we moeten dan ook niet verwonderd zijn over het bestaan van het reeds vermelde theorema, waarin bewezen wordt dat elke verborgen-veranderlijken-theorie aanleiding geeft tot een waarschijnlijkheidsmodel dat voldoet aan de axioma's van Kolmogorov. Het was immers voor de klassieke waarschijnlijkheidstheorie dat Kolmogorov deze axioma's had geformuleerd. Vermits het waarschijnlijkheidsmodel van de quantummechanica niet voldoet aan de axioma's van Kolmogorov, en als gevolg de kennisvisie niet kan worden volgehouden, moeten we een nieuwe niet-klassieke verklaring van de oorsprong van de quantumwaarschijnlijkheid zoeken. De quantumwaarschijnlijkheid is niet, zoals dat het geval is met een klassieke waarschijnlijkheid, het gevolg van een gebrek aan kennis van onszelf over een diepere werkelijkheid.

Soms wordt geopperd dat deze quantumwaarschijnelijkheden intrinsiek in de natuur zouden aanwezig zijn, en men spreekt dan over 'ontologische waarschijnlijkheden'. Maar niemand schijnt zich dit soort waarschijnlijkheden te kunnen voorstellen, en het is dan ook steeds gebleven bij het vage abstracte concept van 'ontologische waarschijnlijkheden'. Er

bestaat echter een derde mogelijkheid. In het korte bestek van deze tekst kunnen we niet vertellen op welke manier we met deze derde mogelijkheid in contact zijn gekomen, en we verwijzen naar het verhaal in [19] en [20], maar we kunnen wel uitleggen waarover het gaat. We zullen dit doen aan de hand van een voorbeeld.

Onderstel dat we het volgende experiment beschouwen: "We nemen een okkernoot uit een mandje, en we kraken de okkernoot om ze op te eten." We willen even uitwijden over de manier waarop we deze okkernoot kraken. We gebruiken geen notekraker, maar nemen ze gewoon tussen beide handen, en nijpen zo hard als we kunnen, en we zien wat er gebeurt. Iedereen die reeds okkernoten op die manier gekraakt heeft weet dat er verschillende zaken kunnen gebeuren. Een eerste voorval dat we willen identificeren is wanneer blijkt dat de okkernoot beschimmeld is. (1) Als een okkernoot na het kraken beschimmeld blijkt te zijn, dan eten we ze niet op.

Laat ons nu even onderstellen dat er zich N okkernoten in het mandje bevinden. Dat betekent dat voor een welbepaalde noot, die we aanduiden met H_k , er reeds twee mogelijke uitkomsten zijn voor ons experiment, die we zullen aanduiden met E_1 : we kraken de noot en eten ze op, en E_2 : we kraken de noot en eten ze niet op. Onderstel dat van de N noten in het mandje er M beschimmeld zijn. Dan is de waarschijnlijkheid dat ons experiment voor een noot H_k leidt tot de uitkomst E_1 gegeven door $(N-M)/N$, en de waarschijnlijkheid dat ons experiment voor de noot H_k leidt tot de uitkomst E_2 wordt gegeven door M/N . Deze waarschijnlijkheid vindt zijn oorsprong in ons gebrek aan kennis over de gehele werkelijkheid van de noot. Inderdaad, reeds voor we beginnen met het breken van de noot H_k , is deze noot beschimmeld of niet. Als we in staat waren geweest om deze kennis te bezitten zonder de noot te moeten kraken, dan konden we de waarschijnlijkheid, afkomstig van dit gebrek aan kennis, elimineren, door enkel die noten in beschouwing te nemen die niet beschimmeld zijn. De klassieke waarschijnlijkheidsrekening is gebaseerd op deze vooronderstelling over de aard van de aanwezige waarschijnlijkheid.

Iedereen die ervaring heeft met het breken van okkernoten weet dat er andere zaken kunnen gebeuren. Inderdaad, soms vernietigen we de noot door ze te breken, zodat ze helemaal gemengd is met de gebroken schaal. Als dat gebeurt, dan zullen we over het algemeen een vlugge evaluatie van de ernst van de toestand uitvoeren, en besluiten of het nog de moeite loont om de noot en de schil uit mekaar te halen. Als dit niet het geval is dat eten we de noot niet op. Zo zijn er twee nieuwe uitkomsten mogelijk voor ons experiment. Uitkomst E_3 , die overeenstemt met een 'slechtgekraakte noot', in dit geval eten we de noot niet op, en uitkomst E_4 , die overeenstemt met een 'goedgekraakte noot', en in dit geval eten we de noot wel op. Weer kunnen we stellen dat voor een welbepaalde noot H_k , de twee uitkomsten mogelijk zijn, en elke uitkomst met een zekere waarschijnlijkheid zal plaatsgrijpen. We voelen echter onmiddellijk dat dit type waarschijnlijkheid van een andere aard is dan het vorige, omdat het afhangt van de manier waarop de noot gekraakt wordt. We kunnen niet, zoals in het vorige

geval van de M okkernoten die beschimmeld zijn, en de $N-M$ okkernoten die niet beschimmeld zijn, de noten van het mandje 'op voorhand' verdelen in deze die 'goedgekraakt' zullen worden, en deze die 'slechtgekraakt' zullen worden. Zulk een verdeling bestaat niet, omdat ze gecreëerd wordt door het experiment van het kraken zelf. We hebben hier een mooi voorbeeld van hoe een deel van de werkelijkheid gecreëerd wordt door de meting zelf, namelijk het kraken van de okkernoten.

Het meest interessante is nu dat de wiskundige structuur van het waarschijnlijkheidsmodel dat nodig is om de waarschijnlijkheden te beschrijven die volgen uit het goed of slecht kraken van okkernoten, verschillend is van de wiskundige structuur van het waarschijnlijkheidsmodel dat nodig is om de waarschijnlijkheden te beschrijven die volgen uit het beschimmeld of niet-beschimmeld zijn van de okkernoten. Meer bepaald:

- De waarschijnlijkheidsstructuur die het indeterminisme beschrijft dat zijn oorsprong vindt in een gebrek aan kennis van een meer complete werkelijkheid van de gebeurtenis in kwestie is een klassiek Kolmogoroviaans waarschijnlijkheidsmodel.
- De waarschijnlijkheidsstructuur die het indeterminisme beschrijft dat zijn oorsprong vindt in het feit dat gedurende de meting een nieuwe stukje werkelijkheid wordt gecreëerd, dat niet bestond voor de meting, is een quantumachtig waarschijnlijkheidsmodel.

In het bestek van dit artikel kunnen we deze twee uitspraken niet aantonen, maar we kunnen verwijzen naar de artikels [21], waar deze uitspraken bewezen en geïllustreerd worden aan de hand van voorbeelden. We bewijzen ook in [21] dat elke quantummechanische entiteit kan bekomen worden door een beschrijving, waar de oorzaak van de quantumwaarschijnlijkheid expliciet gelegd wordt in een gebrek aan kennis over de interactie van het meetapparaat met de quantumentiteit tijdens het experiment van de meting, waarbij door de meting een nieuw stukje werkelijkheid gecreëerd wordt, dat nog niet bestond voor de meting. Dat is de uitleg voor de quantumwaarschijnlijkheid die we willen naar voren brengen.

3.3 *Ontdekking en creatie: de rol van de ruimte*

Laat ons onderstellen dat we alle beschimmelde noten hebben kunnen verwijderen uit het mandje, en we ons dus bevinden in een situatie met alleen niet-beschimmelde noten. In het jargon van de natuurkunde zullen we zeggen dat elke individuele noot zich in een zuivere toestand bevindt, ten opzichte van de eigenschap van beschimmeld zijn of niet. In de originele situatie, wanneer de beschimmelde noten nog steeds aanwezig waren, bevond een individuele noot zich in een gemengde toestand van beschimmeld en niet-beschimmeld, met gewichten M/N en $(N-M)/N$. In deze nieuwe situatie hebben we een mandje met niet-beschimmelde okkernoten, en beschouwen daarom de volgende gebeurtenis H_m ; we nemen een niet-beschimmelde okkernoot. Met de meting die erin bestaat om de okkernoot te kraken, laat ons deze meting aanduiden met C_m , kunnen we nu twee uitkomsten laten overeenkomen: $E_{m,1}$:

we kraken de okkernoot en eten ze op, of $E_{m,2}$: we kraken de okkernoot en eten ze niet op. De uitkomst hangt af van wat er gebeurt tijdens het experiment van het kraken. Daarom willen we in verband hiermee het concept 'potentieel' invoeren. Voor het geval van beschimmeld of niet-beschimmeld konden we van elke okkernoot beweren dat ze voor het experiment beschimmeld of niet-beschimmeld was. Voor het geval van 'goedgekraakt' of 'slechtgekraakt' kunnen we geen eigenschap in verband hiermee geven aan de okkernoot vóór de meting van het kraken. We kunnen wel beweren dat elke okkernoot potentieel goedgekraakt (en dan wordt ze opgegeten) of potentieel slechtgekraakt (en dan wordt ze niet opgegeten) is.

Niemand heeft enige moeilijkheid om het voorbeeld van de okkernoot te begrijpen. Ons voorstel is nu dat we de quantumwerkelijkheid op dezelfde manier moeten proberen te begrijpen. Het enige verschil is dat de metingen in de quantummechanica waar er een waarschijnlijkheid van het tweede type wordt geïntroduceerd (dus te wijten aan het feit dat er tijdens de meting een nieuw stukje werkelijkheid wordt gecreëerd), metingen zijn waarvoor we ons zulk een creatie moeilijk kunnen voorstellen. Bijvoorbeeld de detectie van een quantumentiteit is zulk een meting: terwijl we detectie intuïtief willen blijven beschouwen als 'bepaling van de positie', een positie die er reeds was voor we deze meting van bepaling begonnen, moeten we leren aanvaarden dat detectie van een quantumentiteit een gedeelte creatie van de positie van deze entiteit tijdens het proces van detectie bevat. Okkernoten zijn potentieel 'goedgekraakt' of 'slechtgekraakt', en quantumentiteiten zijn potentieel binnen een bepaald gebied van de ruimte of potentieel erbuiten. En het experiment dat erin bestaat de quantumentiteit te vinden binnen dit gebied van de ruimte of niet te vinden binnen dit gebied, gebeurt nadat de meetapparaten die nodig zijn voor deze detectie geïnstalleerd zijn in het laboratorium, en de interactie van de quantumentiteit met deze meetapparaten begonnen is. Daarvoor is de quantumentiteit potentieel aanwezig en potentieel niet-aanwezig binnen dit gebied van de ruimte.

We bemerken dat deze uitleg voor de quantummetingen ons verplicht om het concept 'ruimte' op een nieuwe manier te beschouwen. Als een quantumentiteit, in een superpositietoestand, enkele potentieel binnen een gedeelte van de ruimte aanwezig is, dan kunnen we de ruimte niet meer beschouwen als het toneel van de gehele werkelijkheid. De ruimte is veeleer een structuur die mee gegroeid is met de klassieke relaties tussen macroscopische fysische entiteiten. Deze macroscopische fysische entiteiten zijn steeds aanwezig binnen de ruimte, want de ruimte is de structuur die zo is dat ze er steeds binnen aanwezig zijn, maar voor quantumentiteiten is dit niet het geval. In een normale toestand is een quantumentiteit niet aanwezig binnen de ruimte, ze kan er enkel binnen gesleurd worden door een experiment van detectie. Dit sleuren binnen de ruimte gaat gepaard met een waarschijnlijkheid van het tweede type (zoals voor het kraken van de okkernoten) omdat de plaats van de quantumentiteit gedeeltelijk gecreëerd wordt tijdens het proces van detectie. We analyseren in detail deze verandering van het statuut van de ruimte in [19], en vermelden hier enkel kort dat we binnen dit

beeld, dat we het ontdekkings-creatie-beeld noemen, gemakkelijk de nieuwe quantumexperimenten kunnen begrijpen. Het neutron in het Rauch-experiment is niet binnen de ruimte. Het kan door een detectie gelokaliseerd worden in twee verschillende gebieden A en B van de ruimte, maar het feit dat dit steeds in deze twee gebieden kan gebeuren komt door het feit dat een experiment van detectie het neutron naar een van deze twee gebieden sleurt.

Ook de experimenten in verband met de Einstein-Podolsky-Rosen-paradox kunnen gemakkelijk begrepen worden binnen dit ontdekkings-creatie-beeld. Hier gaat het over twee quantumentiteiten S_1 en S_2 , die kunnen worden voorbereid in een superpositietoestand p_{sup} van twee componenttoestanden p_{12} en p_{21} . De componenttoestand p_{12} is een toestand waar de ene entiteit S_1 aanwezig is binnen een gebied van de ruimte A_1 en de andere entiteit S_2 binnen een gebied van de ruimte A_2 , terwijl de componenttoestand p_{21} een toestand is waar de entiteit S_2 aanwezig is binnen het gebied A_1 en de entiteit S_1 aanwezig binnen het gebied A_2 . Deze twee gebieden A_1 en A_2 zijn ver van mekaar verwijderd (12 meter in het geval van fotonenexperimenten), en men voert metingen uit binnen de gebieden A_1 en A_2 . Deze metingen leveren resultaten die zeer contradictorisch lijken indien we de situatie zouden willen interpreteren vanuit een 'kennisvisie' of 'verborgen-veranderlijken-theorie', waar we zouden onderstellen dat de twee entiteiten S_1 en S_2 reeds aanwezig zijn binnen de gebieden A_1 en A_2 voor de meting plaatsgrijpt, en we enkel maar een gebrek aan kennis hebben over waar de entiteiten zich juist bevinden. Binnen het ontdekkings-creatie-beeld, waar we aannemen dat de meting van detectie een essentiële creatie van plaats inhoudt, en dus vóór de meting het niet zo is dat de twee entiteiten S_1 en S_2 reeds aanwezig zijn binnen de vernoemde gebieden A_1 en A_2 , is er geen probleem om de meetresultaten te interpreteren. De verbreking van de Bell-ongelijkheden is zelfs een natuurlijk verschijnsel binnen dit ontdekkings-creatie-beeld, dat, zoals we tonen in [21], perfect kan geïmiteerd worden aan de hand van macroscopische fysische entiteiten.

4 Referenties

- [1] *Physics through the 1990's*, National Research Counsel, 1986. Men kan dit rapport vinden in *Physics Today* van april 1986.
- [2] Heisenberg, W., *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*, *Zeitschrift für Physik*, 33, 1925, 879.
- [3] Schrödinger, E., *Quantisierung als Eigenwertproblem*, *Annalen der Physik*, 79, 1926, 361.
- [4] Dirac, P.A.M., *The principles of quantum mechanics*, Oxford University Press, 1930.
- [5] Von Neumann, J., *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer, Berlin, 1932.

- [6] Jauch, J.M., *Foundations of Quantum Mechanics*, Addison Wesley Publishing Company, 1968, Piron, C., *Foundations of Quantum Physics*, Benjamin, 1976.
- [7] Ludwig, G., *Foundations of Quantum Physics*, Springer 1983.
- [8] Randall, C.H. and Foulis, D.G., *The operational approach to quantummechanics*, in Hooker, C.A., ed., *Physical Theories as Logico-operational Structures*, Reidel, 1979.
- [9] Mittelstaedt, P., *Philosophische Probleme der Modernen Physik*, Bibliographisches Institut, Mannheim (1963).
- [10] Segal, I.E., *Annals of Mathematics*, 48, 930, 1947, Emch, G.G., *Mathematical and conceptual Foundations of 20th century physics*, North-Holland, Amsterdam 1984.
- [11] Feynman, R.P. and Hibbs, A., *Quantum mechanics and path integrals*, MacGraw Hill, New York, 1965.
- [12] Berezin, F. and Shubin, M., *The Schrödinger equation*, Reidel, 1986, Woodhouse, N.M., *Geometric quantisation*, Oxford University Press, 1980, Lichnerowicz, A., *Deformation and Quantisation*, in *Dynamical Systems and Microphysics*, Geometry and Mechanics, ed. Avez et al., Academic Press, 1982.
- [13] Schrödinger, E., *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*, *Naturwissenschaften* 23, 1935, 807, 823 and 844.
- [14] Pitovsky, I., *Quantum Probability - Quantum Logic*, Lecture Notes in Physics, 321, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1989.
- [15] Aerts, D., *The One and the Many*, Doctoral Dissertation, Free University of Brussels, Pleinlaan 2, 1050 Brussels, Aerts, D., *Classical Theories and non-Classical Theories as special cases of a more general Theorie*, *Journal of Mathematical Physics*, 24, 1983, 2441.
- [16] Aerts, D., *Description of Many Separated Entities without the paradoxes encountered in Quantum Mechanics*, *Foundations of Physics*, 12, 1982, 1131, Aerts, D., *The description of separated systems and quantum mechanics and a possible explanation for the probabilities of quantum mechanics*, in *Micro-physical Reality and Quantum Formalism*, A. van der Merwe et al., eds., Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [17] Aerts, D., Durt, T. and Van Bogaert, B., *A physical example of quantum fuzzy sets and the classical limit*, in the proceedings of the International Conference on Fuzzy Sets, Liptovsky, 1992, Aerts, D., Durt, T. and Van Bogaert, B., *Quantum Indeterminism, the Classical Limit and Non-Locality*, in the proceedings of the Symposium of the Foundations of Modern Physics, Helsinki, World Scientific Publishing Company, 1993.
- [18] Rauch, H., *Neutron interferometric tests of quantum mechanics*, *Helvetica Physica Acta*, 61, 1988, 589, Aerts, D. and Reignier, J., *On the problem of non-locality in quantum mechanics*, *Helvetica Physica Acta*, 64, 1991, 527.
- [19] Aerts, D., *De Muze van het Leven, Quantummechanica en de Aard van de Werkelijkheid*, Pelckmans-Agora Kok, 1993.

- [20] Aerts, D., *The construction of reality and its influence on the understanding of quantum structures*, International Journal of Theoretical Physics, 31, 1992, 1815.
- [21] Aerts, D., *A possible explanation for the probabilities of quantum mechanics*, Journal of Mathematical Physics, 27, 1986, 203, Aerts, D., *The origin of the non-classical character of the quantum probability model*, in *Information, Complexity and Control in Quantum Physics*, eds. Blanquiere et al., Springer-Verlach, 1987, Aerts, D., *An attempt to imagine parts of the reality of the micro-world*, in the proceedings of the conference "Problems in Quantum Physics; Gdansk '89, eds., Mizerski et al., World Scientific Publishing Company, Signapore, 1990, Aerts, D., *A mechanistic classical laboratory situation that violates Bell inequalities exactly in the same way as the violation by the EPR-experiments*, Helvetica Physica Acta, 64, 1990, 1.