



FACULTEIT
LETTEREN EN WIJSBEGEERTE

DE ONTOLOGISCHE INTERPRETATIE
VAN
NUL-INTERACTIEMETINGEN
IN DE
QUANTUMMECHANICA

scriptie voorgelegd tot het behalen van
de graad van licentiaat in de wijsbegeerte
door **Mattias Vermeiren**

Academiejaar 2005-2006

Promotor: Prof. dr. Philip Van Loocke

**Commissarissen: Dr. Filip Kolen
Dr. Maarten Van Dyck**

INLEIDING	5
HOOFDSTUK 1	
FUNDAMENTELE RAADSELS IN DE QUANTUMMECHANICA	9
1. Inleiding	9
2. De eerste quantumfeiten	9
2.1 <i>De herkomst van de quantummechanica</i>	10
2.2 <i>Het experiment met de twee spleten</i>	12
2.2.1 Beknopte beschrijving van het experiment	13
2.2.2 De Kopenhaagse interpretatie van het experiment	16
2.2.3 Het tweespletenexperiment en Wheelers delayed-choice	19
2.2.4 Superpositie	20
3. Het formalisme van de quantumtheorie	20
3.1 <i>De vijf principes van het formalisme</i>	21
3.2 <i>De Hilbertruimte</i>	24
3.3 <i>Commuterende en niet-commuterende eigenschappen</i>	26
3.4 <i>Systemen bestaande uit meerdere deeltjes</i>	27
4. Non-lokaliteit	28
4.1 <i>Quantumverstrengeling</i>	28
4.2 <i>De EPR-paradox</i>	29
4.3 <i>De Bohm-versie van het EPR-argument</i>	31
4.4 <i>De ongelijkheid van Bell en de experimentele test</i>	32
5. Het meetprobleem	35
5.1 <i>De Schrödingervergelijking en het Projectiepostulaat</i>	37
5.2 <i>De Kat van Schrödinger</i>	37
6. Nabeschuwing	38

HOOFDSTUK 2:	
DE INTERPRETATIE VAN DE QUANTUMTHEORIE	39
1. Inleiding	39
2. De Kopenhaagse interpretatie	39
2.1 <i>Het correspondentieprincipe van Bohr</i>	40
2.2 <i>Het complementariteitsprincipe</i>	40
2.2.1 De definiëring van het complementariteitsbeginsel	41
2.2.2 Waarneming en complementariteit	43
2.3 <i>Borns probabilistische interpretatie van de golf functie</i>	44
2.4 <i>De Kopenhaagse interpretatie en non-lokaliteit: het antwoord op EPR</i>	46
2.5 <i>Kritiek op de Kopenhaagse interpretatie</i>	47
3. De veelwereldeninterpretatie	50
3.1 <i>Verwerping van het Projectiepostulaat</i>	50
3.2 <i>Ontologische implicaties</i>	51
3.3 <i>Decoherentie</i>	54
3.4 <i>De veelwereldeninterpretatie en non-lokaliteit</i>	56
3.5 <i>Een theorie en geen interpretatie</i>	56
3.6 <i>Kritiek op de veelwereldeninterpretatie</i>	57
3.4.1 Het Scheermes van Ockham	57
3.4.2 De interpretatie van waarschijnlijkheden	58
3.4.3 Het basisprobleem	59
4. Reductietheorieën	61
4.1 <i>Het GRW-model</i>	61
4.1.1 Beschrijving van het model	61
4.1.2 Kritiek op het GRW-model	63
4.2 <i>Het model van Penrose: Reductie door zwaartekracht</i>	64
4.2.1 Beschrijving van het model van Penrose	64
4.2.2 Een theorie en geen interpretatie	66
4.2.3 Kritiek op de theorie van Penrose	68
5. Nabeschuiving	69

HOOFDSTUK 3:	
NUL-INTERACTIEMETINGEN IN DE QUANTUMMECHANICA	70
1. Inleiding	70
2. Renningers nul-interactiemetingen: <i>negative-result measurements</i>	70
2.1 <i>Beschrijving van het gedachte-experiment van Renninger</i>	71
2.2 <i>De Kopenhaagse interpretatie en negative-result measurements</i>	72
3. De nul-interactiemetingen van Elitzur en Vaidman	73
3.1 <i>Beschrijving van het gedachte-experiment van Elitzur en Vaidman</i>	73
3.2 <i>Formalisme van het gedachte-experiment van EV</i>	77
4. Uiterst efficiënte nul-interactiemetingen	78
4.1 <i>Het gedachte-experiment van Kviat et al</i>	79
4.1.1 <i>Het quantum-Zeno-effect</i>	79
4.1.2 <i>Beschrijving van het gedachte-experiment</i>	80
4.2 <i>Het gedachte-experiment van Paul en Pavicic</i>	82
5. Filosofische relevantie van nul-interactiemetingen	5
5.1 <i>Nul-interactiemetingen en non-lokaliteit</i>	86
5.2 <i>Nul-interactiemetingen en counterfactuals</i>	86
5.3 <i>Nul-interactiemetingen: een nieuwe visie op quantummechanische metingen</i>	87
6. De interpretatie van nul-interactiemetingen	89
6.1 <i>Nul-interactiemetingen en de Kopenhaagse interpretatie</i>	89
6.2 <i>Nul-interactiemetingen en de interpretatie van Penrose</i>	94
6.3 <i>Nul-interactiemetingen en de veelwereldeninterpretatie</i>	97
7. Nabeschuiving	100
BESLUIT	101
BIBLIOGRAFIE	104

DANKWOORD

In een thesis kruipt per definitie heel veel werk maar gelukkig kon ik rekenen op de ondersteuning en aanmoediging van vele mensen. Al deze mensen wens ik dan ook van harte te bedanken.

Eerst en vooral wil ik mijn promotor, Prof. Dr. Van Loocke bedanken om nul-interactiemetingen als onderwerp voor deze scriptie voor te stellen. Het bleek een zeer interessante oefening om de verschillende interpretaties van de quantumtheorie op deze metingen toe te passen. Ik ben hem ook dankbaar voor het kritisch nalezen van mijn scriptie en het geven van noodzakelijke opmerkingen.

Mijn ouders wil ik bedanken omdat ze me de mogelijkheid hebben geboden om een tweede studie aan te vangen. Ik besef maar al te goed dat zulk een kans velen onder mijn medestudenten niet gegund is en ik hoop middels dit eindwerk ook aan mijn ouders te bewijzen dat ik die investering waard was. Mijn moeder, de keukenprinses, ben ik bovendien dankbaar voor al de lekkere maaltijden waarmee ze mij verwend heeft. Mijn vader verdient een dankwoord omdat hij door zijn niet aflatende interesse ervoor gezorgd heeft dat ik nooit deze scriptie uit het oog verloor.

Last but not least, wil ik mijn vriendin Kristina, mijn grootouders, mijn broer en mijn vrienden bedanken voor hun ongebreideld geloof in mijn slaagkansen.

INLEIDING

De quantumtheorie is één van de meest succesvolle theorieën uit de geschiedenis van de wetenschap. Steeds hebben de voorspellingen van de theorie de confrontatie met het experiment doorstaan. De onderliggende fysische verschijnselen die door de theorie behandeld worden, druisen echter volledig in tegen de denkbeelden uit de klassieke natuurkunde.

In deze scriptie wordt één van deze verschijnselen uitgebreid besproken en geanalyseerd. Het betreft hier de nul-interactiemeting: een meting van de lokalisatie van een object zonder een foton of enig ander deeltje te sturen naar of te ontvangen van dit object. Met andere woorden, metingen waarbij geen enkele interactie plaatsvindt tussen het object en het meetinstrument. Hoewel bepaalde nul-interactiemetingen al voordien bekend waren, stelden Elitzur en Vaidman in 1991 een nieuwe soort voor, waarvan de resultaten de klassieke visie op metingen in vraag stellen.

Elitzur en Vaidman toonden aan dat de quantummechanica toelaat een object te lokaliseren door middel van een foton, zonder dat dit foton geabsorbeerd wordt door het object. Ze maakten hun voorstel wat dramatischer door hierbij aan een ultrasensitieve bom te denken, die door de absorptie van één enkel foton tot ontploffing kan worden gebracht. Door middel van hun methode blijkt het mogelijk deze bom te lokaliseren zonder een explosie te veroorzaken.

Nul-interactiemetingen maken deel uit van de quantummechanische raadsels, die bovendien experimenteel geverifieerd zijn. Het zijn raadsels die onmogelijk door de klassieke natuurkunde verklaard kunnen worden. De nul-interactiemetingen van Elitzur en Vaidman zijn bovendien een manifestatie van twee andere fundamentele raadsels die de quantummechanica kenmerken.

Een eerste fundamenteel raadsel van de quantummechanica betreft golfdeeltjesdualiteit. Fotonen, elektronen, protonen, neutronen en zelfs atomen kunnen zowel golf- als deeltjesgedrag vertonen. Dit raadselachtig fenomeen is volstrekt onverklaarbaar volgens de klassieke natuurkunde, volgens welke golven en deeltjes verschillende entiteiten zijn.

Een tweede fundamenteel raadsel is non-lokaliteit. In bepaalde situaties blijven quantummechanische systemen met elkaar ‘verstrengeld’ waardoor de resultaten van

metingen op deze systemen niet-lokale correlaties vertonen. Deze correlaties lijken enkel verklaard te kunnen worden door een actie-op-afstand te veronderstellen, wat echter door de speciale relativiteitstheorie van Einstein wordt verboden.

Een derde fundamenteel raadsel staat los van de vorige twee, die keer op keer door experimenten bevestigd zijn. Het is een raadsel dat eigenlijk resulteert uit het quantumtheoretisch formalisme, dat twee postulaten bevat die elkaar volkomen tegenspreken. Het gaat hier om het meetprobleem, dat door het bekende gedachte-experiment van Schrödinger in de verf werd gezet.

Het probleem komt erop neer dat de Schrödingervergelijking, die volgens het ene postulaat de dynamica van quantummechanische systemen beschrijft, toelaat en zelfs voorspelt dat macroscopische objecten, zoals katten, tezelfdertijd in twee totaal verschillende toestanden kunnen bestaan – zoals katten die zich in een combinatie van ‘dood zijn’ en ‘levend zijn’ bevinden. Hoewel de quantummechanische wetten zulke toestanden voorspellen, nemen we ze nooit waar. Een bijkomend postulaat bleek nodig om aan te duiden dat zulke toestanden tijdens een meetproces nooit worden waargenomen.

Het meetprobleem laat zien dat het formalisme van de quantumtheorie met bepaalde filosofische problemen te kampen heeft, die aanleiding hebben gegeven tot diverse interpretaties. Deze interpretaties verschillen echter ontologisch volkomen van elkaar, waardoor de quantumtheorie aanleiding heeft gegeven tot de meest uiteenlopende fysische wereldbeelden. Hoewel er meer benaderingen bestaan, worden in deze scriptie slechts drie interpretaties besproken. De basis van deze interpretaties betreft het ontologisch statuut dat aan het bijkomend postulaat wordt gegeven.

De Kopenhaagse interpretatie is decennia lang de dominante interpretatie geweest. Het formalisme wordt door de deze benadering beschouwd als niets meer dan een instrument om voorspellingen van meetresultaten mee te maken. De quantumtheorie beschrijft niet de fysische realiteit, maar onze kennis over deze realiteit. Hierdoor wordt deze interpretatie door veel natuurkundigen en filosofen als positivistisch bestempeld. Ontologische vragen naar wat er zich in een quantummechanisch systeem afspeelt buiten een meetcontext, worden als betekenisloos afgeschilderd. Het bijkomend postulaat stelt dat de quantummechanische onbepaaldheid tijdens het meetproces in een bepaaldheid

wordt omgezet. Dit impliceert echter dat enkel bij meting een ontologische realiteit wordt toegekend aan het gemeten systeem.

De veelwereldeninterpretatie is daarentegen een realistische interpretatie van het formalisme van de quantumtheorie. Volgens een realistische interpretatie beschrijft het formalisme van de quantumtheorie wel degelijk de fysische werkelijkheid. Bij de veelwereldenbenadering wordt het bijkomende postulaat verworpen. Deze verwerping heeft echter verregaande ontologische implicaties, want hierdoor zou het formalisme een multiversum beschrijven. Hoewel deze benadering de Kopenhaagse interpretatie van haar dominante positie heeft verdreven, zijn er velen die haar ontologie als te ‘extravagant’ beschouwen.

De minst ‘exotische’ interpretatie is de benadering van Penrose. Penrose maakt deel uit van een groep onderzoekers die van mening is dat het bijkomend postulaat een reëel fysisch proces beschrijft. Volgens deze realistische benadering moet het formalisme op zulk een manier worden aangepast dat de twee postulaten met elkaar in overeenstemming kunnen worden gebracht. Om die reden worden zulke benaderingen *reductietheorieën* genoemd, aangezien het door de aanpassingen om een andere theorie dan de quantumtheorie gaat. Volgens Penrose beschrijft het bijkomend postulaat een proces waarin de zwaartekracht een fundamentele rol speelt.

Tot nog toe heeft geen enkel experiment kunnen uitwijzen welke van deze drie interpretaties het bij het rechte eind heeft. Wat we wel kunnen beoordelen, is in hoeverre deze interpretaties de fundamentele raadsels van de quantummechanica kunnen duiden. Meerbepaald behoeven de paradoxale resultaten van nul-interactiemetingen een duiding waarin niet alle interpretaties even goed in slagen. Op die manier vormt de ontologische interpretatie van nul-interactiemetingen een manier om bepaalde benaderingen meer geloofwaardigheid te verlenen.

De doelstelling van deze scriptie is dus niet om de juistheid van deze of gene interpretatie aan te tonen. We willen met deze scriptie enerzijds nul-interactiemetingen beschrijven en hun filosofische relevantie aantonen. Anderzijds willen we nagaan in hoeverre de verschillende voorgestelde interpretaties erin slagen deze metingen te duiden. We zullen wel zien dat niet alle interpretaties hier even goed in slagen, waardoor we aan de ene benadering meer geloofwaardigheid kunnen verlenen dan aan de andere.

Deze scriptie is als volgt ingedeeld. In het eerste hoofdstuk bespreken we uitgebreid de verschillende fundamentele raadsels van de quantummechanica: golfdeeltjesdualiteit, non-lokaliteit en het meetprobleem. We besteden hierbij eveneens kort aandacht aan de eigenaardigheden die het formalisme kenmerken.

In het tweede hoofdstuk komt de interpretatie problematiek van de quantumtheorie aan bod. We zullen de drie verschillende benaderingen voorstellen, en aantonen hoe de in het eerste hoofdstuk besproken raadsels geduid worden. Er zal ook kort aandacht worden besteed aan de specifieke problemen waarmee de interpretaties te kampen hebben.

In het derde en laatste hoofdstuk worden dan de nul-interactiemetingen voorgesteld. Niet alleen het voorstel van Elitzur en Vaidman wordt besproken. Ook efficiënte aanpassingen van hun voorstel komen aan bod. Vervolgens gaan we na op welke manier de nul-interactiemetingen van Elitzur en Vaidman door de in het tweede hoofdstuk voorgestelde interpretaties geduid worden.

HOOFDSTUK 1

FUNDAMENTELE RAADSELS

IN DE

QUANTUMMECHANICA

1. Inleiding

In dit hoofdstuk zullen we de voornaamste raadsels van de quantumtheorie bespreken. We zullen dit voornamelijk doen door bepaalde quantumfeiten te beschrijven, zoals die zich voordoen in bepaalde experimenten en gedachte-experimenten. Drie fundamentele raadsels van de quantummechanica worden belicht: golfdeeltjesdualiteit, non-lokaliteit, en het meetprobleem.

Dit hoofdstuk is als volgt gestructureerd. Eerst worden de quantumfeiten uitgebreid besproken, via een kort overzicht van de herkomst van de quantummechanica en een analyse van het tweespletenexperiment. In dit experiment wordt op archetypische wijze de golfdeeltjesdualiteit van de quantummechanische werkelijkheid aangetoond. Bovendien hebben we kort aandacht voor de specifieke wiskundige formalisatie die de quantumtheorie kenmerkt. Vervolgens komt het EPR-gedachte-experiment aan bod. Daarna bespreken wij kort het theorema van Bell, waarin werd aangetoond dat de quantumtheorie niet-lokale correlaties voorspelt. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een bespreking van het meetprobleem.

2. De eerste quantumfeiten

Ter verduidelijking van het raadsel dat schuilt achter de quantumfeiten, zoals de resultaten van het tweespletenexperiment, zullen we eerst kort ingaan op de herkomst van de quantummechanica. We zullen daarna voldoende gewapend zijn met enkele belangrijke ideeën die ons in staat moeten stellen het experiment met de twee spleten gemakkelijker te beschrijven.

2.1 De herkomst van de quantummechanica

Het startschot tot de ontwikkeling van de quantumtheorie werd in 1900 gegeven door de Duitse natuurkundige Max Planck. In een baanbrekend artikel werd door hem een oplossing voorgesteld voor een toen nog onopgelost probleem, dat de ‘ultravioletcatastrofe’ zou genoemd worden. Dit fenomeen heeft betrekking op de onmogelijkheid van de toen bestaande fysische theorieën om het vraagstuk van de straling van een zwart lichaam op te lossen (*black body radiation*). Een zwart lichaam is een voorwerp dat alle straling die erop valt, volledig absorbeert en vervolgens weer uitzendt. De berekeningen van de frequentieverdeling van deze straling door de klassieke theorieën leidden tot een onzinnige uitkomst. Zij voorspelden immers dat zich in het gebied van de allerhoogste frequenties een oneindige energie zou moeten bevinden. Planck stelde een oplossing voor door te suggereren dat de straling werd uitgezonden of geabsorbeerd in porties of energiepakketjes van een bepaalde grootte, die hij *quanta* noemde.¹

Deze oplossing van Planck stond lijnrecht tegenover de veronderstelling van de klassieke (Newtoniaanse) wetenschap dat de eigenschappen van materie op continue wijze kunnen veranderen. Planck stelde echter dat de veranderingen van de natuur op atomaire schaal discontinu en ongelijkmatig gebeuren. Deze hypothese werd in 1905 door Albert Einstein met succes overgenomen om het zogenaamde foto-elektrisch effect te verklaren.

Het foto-elektrisch effect is het verschijnsel waarbij een lichtbundel elektronen uit een metaal vrijmaakt. De manier waarop dit gebeurde, kon volgens Einstein enkel verklaard worden door de lichtbundel als een stroom van afzonderlijke quanta te beschouwen. Experimenten wezen uit dat de snelheid van de uitgestoten elektronen niet afhing van de intensiteit van de lichtbundel, maar enkel van de frequentie van het gebruikte licht. Deze relatie was volgens de klassieke denkwijze geheel onverwacht, en kon volgens Einstein enkel geïnterpreteerd worden door aan te nemen dat licht uit deeltjes (energiepakketjes/*quanta*) bestaat, die later fotonen zouden worden genoemd. Planck had reeds aangetoond dat de hoeveelheid energie in een quantum recht evenredig is met de frequentie.² Hoe hoger de frequentie van het licht, hoe meer energie de fotonen bezitten,

¹ Polkinghorne, J.C. (1987), *The Quantum World*, Penguin Books, pp. 5-6.

² $E = h\nu$, waarbij E staat voor energie, ν voor frequentie en h bekend staat als de Constante van Planck.

en hoe meer kans dat de fotonen voldoende energie hebben om elektronen te laten ontsnappen.³

Einstein was niet de eerste die de deeltjesnatuur van licht aannam. Ook Newton neigde indertijd naar het standpunt dat licht was opgebouwd uit een stroom kleine deeltjes. Christiaan Huygens, de Nederlandse natuurkundige en tijdgenoot van Newton, opperde echter dat licht net als geluid het karakter heeft van een golfbeweging. Toen in de 19^e eeuw Thomas Young in zijn bekende tweespletenexperiment had aangetoond dat licht interferentie – een karakteristiek kenmerk van golven – kan veroorzaken, leek de golfnatuur van het licht definitief bewezen. De beschrijving door Einstein van licht in termen van deeltjes druiste dus volledig in tegen de traditionele conceptie van licht. De natuurkunde bleek bijgevolg in een ernstige crisis te verkeren. Licht bleek immers te worden gekenmerkt door een golfdeeltjesdualiteit, wat de klassieke natuurkunde niet kon verklaren.

Deze golfdeeltjesdualiteit bleek zich echter niet te beperken tot licht alleen. De natuurkundigen van die tijd waren zeer geïnteresseerd in de structuur van atomen. Vooral de stabiliteit van atomen was volgens de klassieke theorieën onverklaarbaar. Wanneer elektronen in atomen rond de kern draaien, verandert hun bewegingsrichting voortdurend. Volgens de elektromagnetische theorie van Maxwell zouden deze elektronen dan een deel van hun energie in straling omzetten, waardoor ze in een neerwaartse spiraal uiteindelijk in de atoomkern zouden neerstorten.⁴

Niels Bohr paste de beginselen van Planck en Einstein toe op de stabiliteit van atomen. Hij stelde dat elektronen op baanstralen met vaste energieniveaus rond de atoomkern kunnen zwermen zonder energie te verliezen. Wanneer deze elektronen naar een ander energieniveau springen, wordt er elektromagnetische energie geabsorbeerd of uitgestoten in discrete quanta, die in feite fotonen zijn. Ook binnen het atoom werd de continuïteit van de klassieke natuurkunde door discontinuïteit vervangen.⁵

Deze inzichten bleken in overeenstemming met het theoretische werk van Louis de Broglie, die stelde dat ook elektronen zich kunnen gedragen als golven. Planck had met zijn formule $E=h\nu$ energie evenredig met frequentie gemaakt. De Broglie deduceerde

³ Polkinghorne, J.C. (1987), *o.c.*, pp. 6-7.

⁴ Polkinghorne, J.C. (1987), *o.c.*, p. 10.

⁵ Polkinghorne, J.C. (1987), *o.c.*, pp. 11-12.

hieruit, op basis van argumenten komende uit de speciale relativiteitstheorie, de relatie $p=h/\lambda$; impuls p is omgekeerd evenredig is met golflengte λ .⁶ Door deze twee vergelijkingen wordt bijgevolg een golf (gekaracteriseerd door frequentie en golflengte) geassocieerd aan een deeltje (gekaracteriseerd door energie en impuls); golf- en deeltjeseigenschappen worden symmetrisch met elkaar in verband gebracht.

Het werd snel duidelijk dat niet alleen elektronen, maar alle subatomaire deeltjes en zelfs atomen golfkenmerken kunnen vertonen.⁷ Deze golfdeeltjesdualiteit en de raadselachtige implicaties hiervan worden duidelijk geïllustreerd aan de hand van de resultaten van het experiment met de twee spleten.

2.2 *Het experiment met de twee spleten*

De natuurkunde had de eigenschappen van golven bestudeerd al lang voor de ontwikkeling van de quantummechanica op gang kwam. Het karakteristieke kenmerk van golven is dat ze kunnen interfereren. Wanneer twee onafhankelijk gevormde golven – bijvoorbeeld watergolven – elkaar ontmoeten, vormen ze samen een nieuw patroon (zie figuur 1). Dit ‘interferentiepatroon’ komt tot stand doordat twee samenkomende golf toppen elkaar versterken, twee samenkomen golfdalen elkaar afzwakken, en een samenkomende golf top en golfdal elkaar kunnen neutraliseren.

De Engelse natuurkundige Young voerde in 1801 voor het eerst het experiment met de twee spleten uit. Door een lichtbundel op een scherm met twee spleten te laten schijnen, werd op het achterste scherm een interferentiepatroon gevormd. De golfnatuur van licht zou door dit experiment voor eens en voor altijd zijn bewezen. Na ons beknopt overzicht van de herkomst van de quantummechanica, mag het duidelijk zijn dat deze conclusie voorbarig was. Met een vernieuwde technologie uitgevoerd, toont het experiment met de twee spleten immers op een klassieke manier de golfdeeltjesdualiteit van licht aan. Volgens Richard Feynman bestaat er geen betere manier om dit eigenaardige fenomeen van de quantummechanica te belichten: het is een fenomeen “*which is impossible, absolutely impossible, to explain in any classical way, and which is at the heart of quantum mechanics. In reality it contains the only mystery.*”⁸

⁶ Bohm, D. (1959), *Causality and Chance in Modern Physics*, p. 76.

⁷ Gribbin, J. (1999), *Schrodinger's Kittens*, p. 8.

⁸ Feynman, R. geciteerd in Polkinghorne, J.C. (1987), *o.c.*, p. 34; oorspronkelijke cursivering.

2.2.1 Beknopte beschrijving van het experiment

Bij het experiment gaat het om een bron die quantumentiteiten produceert, zoals een fotonenbron die een stroom fotonen afvuurt. Deze deeltjes treffen een scherm waarin zich twee spleten bevinden. Achter dit scherm wordt een detectiescherm geplaatst waarop de aankomst van de fotonen geregistreerd wordt. We stellen de fotonenbron op zulk een manier af dat er niet meer dan één foton per keer door de experimentele opstelling beweegt, en kijken wat er gebeurt.

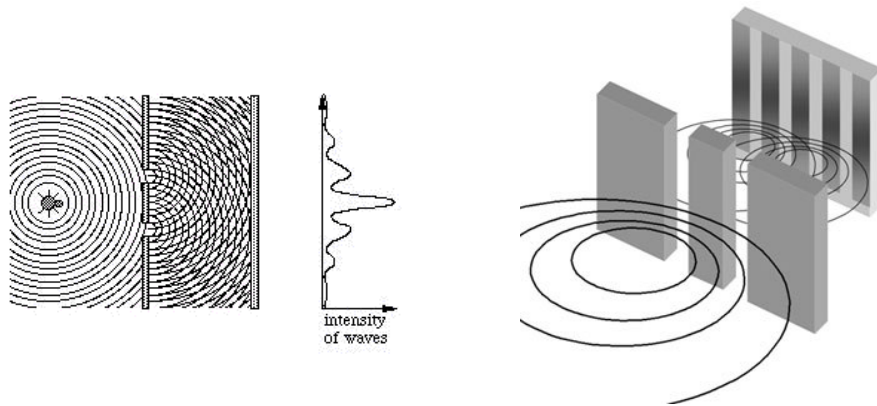
Wanneer het eerste foton inslaat op het detectiescherm verschijnt er een stip.⁹ Maar wanneer geleidelijk aan meer fotonen het detectiescherm raken en stippen vormen, gebeurt er iets vreemd. Bij een voldoende groot aantal fotonen begint er zich een patroon te vormen op het scherm (zie figuur 2). Tegenover het punt midden tussen de twee spleten zien we op het detectiescherm een donkere band met stippen, overeenkomend met de plaats waar de meeste fotonen zijn terecht gekomen. Ter weerszijden van deze centrale strook bevinden er zich afwisselend lichtere en minder donkere banden, overeenkomend met de plaatsen waar geen of minder fotonen zijn aangekomen. Dat patroon kan onmogelijk verklaard worden door fotonen enkel als deeltjes te beschouwen. Het patroon is immers een interferentiepatroon, wat erop wijst dat fotonen zich als een golf zou moeten gedragen.

Er moet worden onderstreept dat dit interferentiepatroon niet kan veroorzaakt zijn geweest door onderlinge interactie van fotonen, gezien de vuursnelheid van de fotonenbron zodanig is afgesteld dat er niet meer dan één foton per keer door de opstelling beweegt. Dit druist echter in tegen onze intuïtie: indien slechts één deeltje per keer de experimentele opstelling doorkruist, dan kan het toch door slechts één van de twee spleten gepasseerd zijn? Maar op welke manier wordt dan het interferentiepatroon veroorzaakt? Het lijkt er op dat elk individueel foton zich als een golf gedraagt: het is alsof elk foton door beide spleten gaat en met zichzelf interfereert.

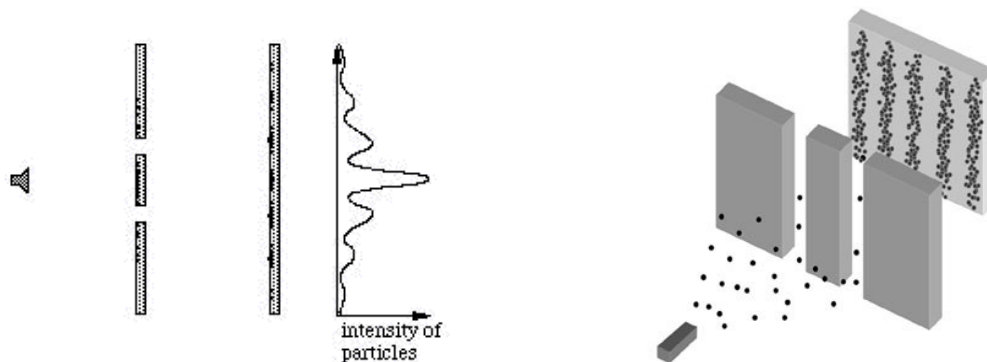
Zowel het golf- als het deeltjesmodel van het licht schiet duidelijk tekort om de resultaten van dit experiment te verklaren. Indien fotonen enkel deeltjes zijn, zou er geen interferentie plaatsvinden. De fotonen zouden door één van de twee spleten vliegen en

⁹ Het licht komt in discrete gelocaliseerde eenheden van energie aan, waarbij deze energie gerelateerd is aan de frequentie van het licht in overeenstemming met de wet van Planck: $E = h\nu$, Penrose, R. (1990), *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, p. 300.

men zou op het detectiescherm twee evenwijdige stroken waarnemen met ongeveer evenveel stippen (zie figuur 3). Fotonen gedragen zich enkel als deeltjes als slechts één van de twee spleten open is. Dan verschijnt er op het detectiescherm inderdaad een band met een gelijkmatig verdeelde hoeveelheid stippen. Ook indien enkel de andere spleet open is, nemen we zulk een patroon waar. Wanneer echter beide spleten open zijn, kunnen we deze twee patronen niet simpelweg bij elkaar optellen. Door destructieve interferentie zullen er plekken zijn waar fotonen niet meer aankomen, terwijl ze die wel bereikten wanneer slechts één spleet geopend was. Omgekeerd zullen er plaatsen op het scherm zijn waar méér fotonen gedetecteerd worden dan wanneer telkens slechts één spleet open was (zie figuur 3).



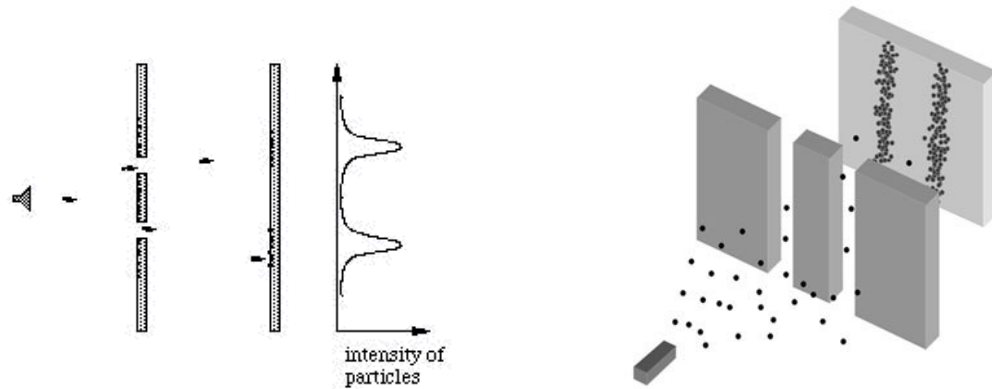
Figuur 1: Het *tweespletenexperiment met klassieke golven*¹⁰



Figuur 2: Het *tweespletenexperiment met quantumdeeltjes*¹¹

¹⁰ Bron: Linker afbeelding <http://www.integralscience.org/materialism/materialism.html>
Rechter afbeelding www.blacklightpower.com/theory/DoubleSlit.shtml

¹¹ Bron: ibidem.



Figuur 3: Het tweespletenexperiment met 'klassieke' deeltjes ¹²

In het experiment doet er zich duidelijk iets bijzonder vreemds voor. Hoewel de fotonen als deeltjes vertrekken en als deeltjes aankomen, lijken ze zich tijdens hun traject als golven te gedragen. Het lijkt alsof de fotonen tegelijkertijd door de twee spleten zijn gegaan, en vervolgens een plek uitkiest op het detectiescherm om zo minuscule bij te dragen tot het gehele interferentiepatroon dat na verloop van tijd zichtbaar wordt. Maar op welke manier slagen de fotonen erin om door beide spleten te gaan?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden, kunnen we experimenteel nagaan door welke spleet de deeltjes gevuld worden. We plaatsen een detector aan één van de spleten en houden bovendien het patroon op het detectiescherm in de gaten. Wat we nu merken in zulk een experimentele situatie, is dat elk foton zich blijkt te gedragen als een deeltje dat door de ene óf de andere spleet gaat. Maar wat vooral opvalt, is dat er geen interferentiepatroon gevormd wordt. Wanneer de fotonen aan de spleten geobserveerd worden, gedragen ze zich automatisch als deeltjes. Waarneming van de deeltjes aan de spleten doet blijkbaar het interferentiepatroon verdwijnen, en werkt in op het resultaat van het experiment.

De raadselachtige resultaten van tweespletenexperiment bekomen men niet alleen met fotonen. Uit de inzichten van de Broglie weten we dat eveneens met andere deeltjes zoals elektronen en protonen een golf kan geïdentificeerd worden. Inderdaad, men bekomen dezelfde resultaten wanneer het experiment herhaald wordt met zulke deeltjes. Men bekomen zelfs dezelfde resultaten indien men hele atomen gebruikt.¹³ Golfdeeltjesdualiteit is een karakteristiek kenmerk van de quantummechanische werkelijkheid.

¹² Bron: ibidem.

¹³ Penrose, R. (1990), *o.c.*, p. 306.

Er kan uit de resultaten van het experiment nog een epistemologische conclusie worden getrokken. Het enige dat we volgens de quantumtheorie kunnen voorspellen, is dat er vijftig procent kans bestaat dat het quantumobject aan de eerste spleet gedetecteerd wordt, en vijftig procent kans aan de tweede. Vanuit twee identieke experimentele situaties, kan men blijkbaar geen identieke resultaten verwachten.¹⁴ In de quantummechanica zijn enkel voorspellingen in termen van waarschijnlijkheid mogelijk. Volgens de klassieke Kopenhaagse interpretatie zou de quantummechanica inherent indeterministisch van aard zijn.

2.2.2 De Kopenhaagse interpretatie van het experiment

De golfdeeltjesdualiteit is een ontologisch raadsel waarvoor volgens Niels Bohr een consistente interpretatie bestaat. Twee principes staan centraal in deze interpretatie: het onzekerheids- en het complementariteitsprincipe. We zullen deze beginselen uitleggen via de resultaten van het tweespletenexperiment. Het is van belang om deze principes kort nu te belichten aangezien ze aanleiding geven tot bepaalde aspecten van de quantummechanica, namelijk indeterminisme en subjectivisme. De Kopenhaagse benadering is gedurende lange tijd de dominante interpretatie geweest, waardoor sommigen deze aspecten als quantumfeiten zijn gaan beschouwen.¹⁵ In het volgende hoofdstuk zullen we echter zien dat deze aspecten deel uitmaken van een interpretatie die een lange tijd dominant is geweest, en dat andere benaderingen de feiten op een andere manier duiden. Een wat meer uitgebreide bespreking van de Kopenhaagse interpretatie van de quantumtheorie komt in het volgende hoofdstuk aan bod.

Eén van de gevolgen van golfdeeltjesdualiteit is dat het grenzen stelt aan de hoeveelheid informatie die verkrijgbaar is over een quantumstelsel zoals het tweespletenexperiment. We kunnen hetzij de golfeigenschappen van quantumdeeltjes meten, hetzij deeltjesaspecten. Het interferentiepatroon kan enkel gemeten worden wanneer de twee spleten open zijn, en we niet detecteren door welke spleet de quantumdeeltjes zijn gegaan. Indien we de detectie van de deeltjes aan de spleten waarnemen, verliezen we kennis over het interferentiepatroon. We kunnen dus onmogelijk tegelijkertijd over zowel deeltjes- als golfaspecten van quantumdeeltjes informatie krijgen. Werner Heisenberg

¹⁴ Bij deze uitspraak hebben we een veronderstelling stilziggend aangenomen, namelijk dat “[i]n *the physical world, all the particles of the same kind appear to be identical.*”, Penrose, R. (1990), *o.c.*, p. 297. Voor een zekere nuancering zie ook Polkinghorne, J.C. (1987), *o.c.*, pp. 38-40, over het onderscheid tussen fermionen en bosonen.

¹⁵ Het onzekerheidsprincipe van Heisenberg is echter wel een experimenteel feit. De interpretatie die door Bohr aan dit principe werd gegeven, behoort echter niet tot de quantumfeiten.

zag in dat de begrenzingen aan dit soort van metingen op een specifieke manier geïnterpreteerd kunnen worden. Hij toonde aan dat de detectie van een deeltje aan één van de spleten wezenlijk neerkwam op de meting van de positie van het deeltje, terwijl de waarneming van interferentie analoog is aan de meting van de impuls. Door golfdeeltjesdualiteit wordt het dus onmogelijk gelijktijdig de positie en de impuls van een deeltje te meten.¹⁶ Dit gegeven zou leiden tot de introductie van het *onzekerheidsprincipe* door Werner Heisenberg.¹⁷

Heisenberg toonde aan dat de quantumtheorie dergelijke beperkingen in metingen van dynamische eigenschappen voorspelt. De meest bekende ongelijkheid die het onzekerheidsprincipe van Heisenberg weergeeft, is het verband tussen de onzekerheid in positie (Δx) en de onzekerheid in impuls (Δp),

$$\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$$

waarbij h de constante van Planck is.¹⁸ Hoe preciezer we de positie van deeltje willen kennen, hoe minder exact dat we de impuls kunnen bepalen. Deze relatie deed snel vragen rijzen naar haar fysische betekenis.¹⁹ Ze kreeg in het begin enkel een epistemologische interpretatie, die verbonden was met het klassieke verstoringsmodel van meting van een eigenschap van een fysisch systeem. Theoretisch was het in de klassieke natuurkunde bekend dat elke meting van een systeem noodzakelijk gepaard gaat met een verstoring van het systeem. Maar deze verstoring zou men steeds kunnen reduceren tot een verwaarloosbare afwijking. Heisenberg zou dit verstoringsmodel ook toepassen op de meting in de quantummechanica, met het fundamentele verschil dat op quantumniveau de verstoring door meting onvermijdbaar is en niet te reduceren onder een kritieke waarde.²⁰ Vanuit de epistemologische interpretatie wordt de onzekerheid dus beschouwd als een praktische grens op ons vermogen om gelijktijdig de exacte

¹⁶ Rae, A. (2000), *Quantum Physics: Illusion or Reality?*, Cambridge University Press, p. 10.

¹⁷ Heisenberg kwam niet op die manier aan zijn onzekerheidsprincipe. Hij was een theoretisch natuurkundige die zijn onzekerheidsrelaties afleidde uit het wiskundige formalisme van de quantumtheorie. In de literatuur is het echter gebruikelijk om het principe aan de hand van het tweespletenexperiment voor te stellen. Voor een goed historisch overzicht van de introductie van het onzekerheidsprincipe, zie Jammer, M. (1974), *The Philosophy of Quantum Mechanics*, John Wiley & Sons, pp. 55-85.

¹⁸ Rae, A. (2000), *o.c.*, p. 11.

¹⁹ Deze relatie bleek niet beperkt tot positie en impuls. Een andere interessante onzekerheidsrelatie is deze tussen energie (ΔE) en tijd (Δt): $\Delta E \Delta t \geq h/4\pi$, Polkinghorne, J.C., *o.c.*, p. 50. Om die reden wordt dikwijls gesproken over de 'onzekerheidsrelaties' van Heisenberg.

²⁰ Sklar, L. (1995), *Philosophy of Physics*, Oxford University Press, p. 177. Zie ook plato.stanford.edu/entries/qt-uncertainty.

waarde van twee ‘complementaire’ eigenschappen van een systeem te meten. De deeltjes in een systeem beschikken volgens deze interpretatie dus wel degelijk over precieze simultane waarden van zowel positie als impuls, maar door de onvermijdelijke verstoring ten gevolge van het meetproces, kunnen deze waarden niet tezelfdertijd bepaald worden.

Bohr was nooit tevreden met een dergelijke interpretatie van de onzekerheidsrelatie.²¹ Zoals we later zullen zien, gaf volgens Bohr de quantumtheorie een ‘volledige’ beschrijving van een systeem, zodat van onvolledige kennis geen sprake kan zijn. De onzekerheid die bestaat bij de simultane meting van twee complementaire grootheden, ontstaat niet door die meting. De onzekerheid van de waarden van de gemeten grootheden zijn inherent verbonden aan de natuur. De onzekerheid is dus niet epistemologisch maar ontologisch van aard. Om die reden wordt deze onzekerheid beter ‘onbepaaldheid’ genoemd.²² Door deze ontologische onbepaaldheid zijn enkel complementaire beschrijvingen van het systeem mogelijk. Zulke beschrijvingen zijn volgens Bohr volledig, met andere woorden, men kan er niets méér over zeggen.

Het feit dat de meting van een bepaalde grootheid van een quantumstelsel de kennis vernietigt van de precieze waarde van een andere complementaire grootheid, is een gevolg van het complementariteitsbeginsel van Bohr. Bohr zag de onzekerheidsrelaties van Heisenberg als een symbolische weergave van zijn complementariteitsbeginsel.²³ Het principe stelt dus dat twee complementaire grootheden nooit tezelfdertijd precieze waarden kunnen hebben, zodat de natuur enkel complementaire beschrijvingen toelaat door middel van elkaar uitsluitende experimentele opstellingen.

Het tweespletenexperiment kan op zulk een manier worden opgesteld dat deeltjesgedrag onderzocht wordt, en een beschrijving volgens het deeltjesmodel mogelijk wordt. Het experiment kan echter ook op een manier worden opgesteld dat golfgedrag onderzocht wordt, en een beschrijving volgens het golfmodel moet worden gegeven. Beide beschrijvingen zijn complementair, en een meer volledige beschrijving is onmogelijk. Uit deze simpele beschrijving van complementariteit manifesteert zich eveneens het subjectieve aspect van de Kopenhaagse interpretatie. De experimentele opstelling bepaalt of een quantumentiteit zich als een golf dan wel als een deeltje gedraagt. Bij de ene

²¹ Sklar, L. (1995), *o.c.*, p. 178.

²² Max Jammer onderscheidt bijvoorbeeld op deze manier de ontologische ‘onbepaaldheid’ van de epistemologische ‘onzekerheid’, Jammer, M. (1978), *o.c.*, p. 61.

²³ zie bv plato.stanford.edu/entries/qt-uncertainty.

experimentele opstelling gedragen quantumentiteiten zich als deeltjes, bij de andere als golven. Hoe deze entiteiten zich zullen gedragen is dus afhankelijk van de vraag die gesteld wordt. Op een deeltjesachtige vraag (door welke spleet gaat het quantum) krijgen we een deeltjesachtig antwoord. Op een golfachtige vraag (over het uiteindelijk patroon op het scherm) volgt een golfachtig antwoord.

Ook het deterministische wereldbeeld is niet in overeenstemming met het complementariteitsbeginsel. Volgens de theorie van Newton is het mogelijk de toekomst volledig te voorspellen als we de positie en de impuls van elk deeltje in het heelal zouden kennen. Voor quantumfysici heeft de idee van volledige voorspelbaarheid echter geen enkele betekenis meer, aangezien het volgens het complementariteitsbeginsel zelfs niet meer mogelijk is om de exacte positie en impuls van één deeltje te kennen.²⁴

2.2.3 Het tweespletenexperiment en Wheelers delayed-choice

Bij de bespreking van de resultaten van het tweespletenexperiment wordt in de literatuur soms ook Wheelers delayed-choice experiment voorgesteld. Door de aanpassing van Wheeler, wordt het experiment nog raadselachtiger. Wheeler stelde voor om het tweespletenexperiment op een specifieke manier aan te passen. Hij veronderstelde dat het mogelijk is om verplaatsbare detectoren aan de spleten te introduceren, die op een zeer snelle manier kunnen geplaatst worden of weggehaald. Wanneer de detectoren geplaatst zijn, zal het deeltje door de ene of door de andere spleet gaan. Wanneer de detectoren niet geplaatst zijn, zal het deeltje zich als een golf gedragen, door beide spleten en met zichzelf interfereren. Maar wat gebeurt er als de beslissing om de detectoren al dan niet te plaatsen wordt uitgesteld tot het moment dat het deeltje zich reeds de experimentele opstelling bevindt?

De analyse van Wheeler moet in de context van het complementariteitsbeginsel gesitueerd worden. Als de onderzoeker beslist om de detectoren te plaatsen, voert hij een experiment uit waarbij deeltjesgedrag onderzocht wordt, waardoor het deeltje slechts door één spleet zal gaan. Als hij beslist om de detectoren niet te plaatsen, wordt een experiment uitgevoerd waarin de golfeigenschappen onderzocht worden, waardoor het deeltje door beide spleten zal gaan. Het raadselachtige van de situatie van Wheeler is dat

²⁴ Voor een interessante discussie over de vraag of de onzekerheidsrelaties tot een logische weerlegging van het determinisme leidt, zie Jammer, M. (1978), *o.c.*, pp. 75-78.

welk gedrag het deeltje zal vertonen, met andere woorden of het deeltje door één of beide spleten zal gaan, bepaald wordt door een keuze die genomen is nadat het deeltje zijn weg reeds heeft aangevat.

2.2.4 Superpositie

We hebben bij de bespreking van het tweespletenexperiment gezien dat het lijkt alsof de deeltjes door beide spleten zijn gegaan. In de terminologie van de quantummechanica wordt gesteld dat elk deeltje dat door zulk een experimentele opstelling wordt gevuurd, zich in een superpositie van twee toestanden bevindt, namelijk de toestand waarbij het door de ene spleet gaat en de toestand waarbij het door de andere spleet gaat. Wat zulk een superpositie van toestanden ontologisch betekent, daarover is de wetenschap het niet eens. David Albert stelt dat superpositie in de quantummechanica niets minder is dan “*a name for something we don't understand.*”²⁵ In ieder geval is het een fenomeen dat in het tweespletenexperiment, en daarbuiten, aanleiding geeft tot interferentie.

Superpositie is eigenlijk een begrip dat bekend is van de golftheorie. Superpositie is niets anders dan het bij elkaar optellen van verschillende golven die elkaar overlappen. Dat superpositie ook in de quantummechanica een rol speelt, hoeft natuurlijk niet te verbazen, gezien het feit dat deeltjes zich eveneens als golven kunnen gedragen. Het is dan ook evident te veronderstellen dat superpositie, en dus golfdeeltjesdualiteit, op een specifieke manier zijn weergave vindt in het formalisme van de quantumtheorie, de wiskundige beschrijving van het gedrag van deze deeltjes.

3. Het formalisme van de quantumtheorie

De quantumtheorie is natuurlijk een wiskundige theorie. Voor een niet al te technische bespreking van deze theorie kan men terecht bij de uiteenzettingen van Albert (1992) of Penrose (1994).²⁶ Op basis van hun besprekingen, belichten we enkele belangrijke kenmerken van het formalisme.

²⁵ Albert, D. (1992), *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press, p. 11.

²⁶ Albert, D. (1992), *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press; Penrose, R. (1994), *Shadows of the Mind*, Oxford University Press.

Schrödinger construeerde een partiële differentiaalvergelijking voor de beschrijving van het gedrag van deeltjes. Deze golfvergelijking van Schrödinger geeft de verandering van een quantumtoestand of van de golf functie van een deeltje (ψ) weer in de tijd.²⁷ Deze vergelijking dicteert dat de golf functie zich over een groot gebied kan uitstrekken. Schrödinger interpreteerde dit op een specifieke, realistische manier. Hij opperde dat dit deeltje, net zoals de golf functie waardoor dat deeltje beschreven wordt, in de ruimte is uitgesmeerd.

Max Born suggereerde echter golf functie in termen van waarschijnlijkheden moet worden geïnterpreteerd.²⁸ Als we bijvoorbeeld de locatie van een elektron meten, zal de waarschijnlijkheid om het elektron in een bepaald gebied $d\tau$ te vinden afhankelijk zijn van de intensiteit van de golf functie in $d\tau$. Deze intensiteit wordt weergegeven door het kwadraat van de grootte van de golf functie in $d\tau$. Op die manier verkrijgen de Schrödingervergelijkingen een interpretatie als waarschijnlijkheidsgolven.

Schrödinger en Born hebben allebei bijgedragen tot de ontwikkeling van het quantumtheoretisch formalisme. De bijdrage van Schrödinger situeert zich in de beschrijving van quantummechanische toestanden buiten een meetcontext, en de bijdrage van Born bij het maken van probabilistische voorspellingen in een meetcontext.

3.1 De vijf principes van het formalisme²⁹

(1) Fysische toestanden worden beschreven door vectoren (toestandsvectoren³⁰). Een vector is een wiskundig object dat gekenmerkt wordt door een richting en een grootte.³¹ Een vector wordt geometrisch voorgesteld door een pijl die een punt met de oorsprong van een coördinatensysteem verbindt. De oneindige verzameling van vectoren geassocieerd met alle punten in zulk een coördinatensysteem, noemt men een vectorruimte. De vectorruimte die alle mogelijke fysische toestanden van een quantumstelsel moet representeren, is een Hilbertruimte.

²⁷ Wanneer we de vijf principes van het formalisme bespreken, hanteren we in overeenstemming met de uiteenzettingen van Albert en Penrose de vectorterminologie. Hoewel vectoren en golf functies niet dezelfde wiskundige entiteiten zijn, kunnen ze allebei de toestand van deeltjes beschrijven, en zijn ze in elkaar 'vertaalbaar'.

²⁸ Jammer, M. (1974), *a.c.*, p. 38-44.

²⁹ Albert, D. (1992), *a.c.*, pp. 30-38.

³⁰ We herhalen dat toestandsvectoren kunnen ook in 'golf functies' kunnen worden vertaald.

³¹ Albert, D. (1992), *a.c.*, pp. 17-18.

Elementen uit de Hilbertruimte worden meestal neergeschreven door middel van de ket-notatie van Dirac: $|\psi\rangle$ stelt een fysische toestand voor. Vectors kunnen ook bij elkaar worden opgeteld. Het feit dat zulk een optelling van twee of meer vectors eveneens een vector oplevert, heeft iets te maken met superpositie. Wanneer we bijvoorbeeld stellen dat $|A\rangle$ de toestand weergeeft dat een quantum zich op positie A bevindt, en $|B\rangle$ de toestand dat het quantum zich op positie B bevindt, dan stelt elke lineaire combinatie van deze twee toestanden $w|A\rangle + z|B\rangle$ ook een fysische toestand voor. Het is deze fysische toestand die we een superpositie noemen van $|A\rangle$ en $|B\rangle$.

(2) Meetbare eigenschappen van fysische systemen ('observabelen') worden in het algoritme weergegeven door lineaire operatoren. Een operator is een mechanisme om een nieuwe vector uit een oude te maken.³² Dit wordt op de volgende manier genoteerd: $O|A\rangle = |A'\rangle$. De operatoren in het quantumformalisme moeten een belangrijke eigenschap hebben: lineariteit. Lineaire operatoren hebben volgende eigenschappen:

$$O(|A\rangle + |B\rangle) = O|A\rangle + O|B\rangle$$

$$O(c|A\rangle) = c(O|A\rangle)$$

Wanneer het geval is bij een bepaalde operator en een bepaalde vector dat $O|B\rangle = a|B\rangle$, waarbij a een reëel getal voorstelt, dan is $|B\rangle$ een eigenvector van O , met eigenwaarde a . Welnu, eigenvectoren spelen een specifieke rol bij de representatie van observabelen in het formalisme:

If the vector associated with some particular physical state happens to be an eigenvector, with eigenvalue (say) a , of an operator associated with some particular measurable property of the system in question (in such circumstances, the state is said to be an "eigenstate" of the property in question), then that state has the value a of that particular measurable property.³³

(3) De Schrödingervergelijking geeft de dynamica van de toestandsvector in de tijd weer. Met behulp van deze vergelijking kan uit de toestand van een fysisch systeem op een initieel tijdstip, de toestand op een later tijdstip in principe worden berekend.

³² Albert, D. (1992), *o.c.*, p. 25.

³³ Albert, D. (1992), *o.c.*, p. 31.

De dynamica van een quantummechanisch systeem beantwoorden aan lineariteit. Veronderstel bijvoorbeeld dat een systeem met toestandsvector $|A\rangle$ op tijdstip t_1 evolueert tot een toestand $|A'\rangle$ op tijdstip t_2 , en dat hetzelfde systeem met toestandsvector $|B\rangle$ i.p.v. $|A\rangle$ op t_1 evolueert tot $|B'\rangle$ op t_2 . Welnu, wanneer dat systeem zich in een toestand $w|A\rangle + z|B\rangle$ bevindt, dan zal het evolueren tot $w|A'\rangle + z|B'\rangle$. Deze lineariteit ligt mede aan de basis van het meetprobleem in de quantummechanica (zie afdeling 5 van dit hoofdstuk).

(4) Indien de toestandsvector van een systeem geen eigenvector is van een operator geassocieerd met een bepaalde meetbare eigenschap, dan zal de voorspelling van de uitkomst van een meting in termen van waarschijnlijkheid geschieden. Stel $|\psi\rangle = \sum a_i |A_i\rangle$ dan zal de kans dat na meting de toestandsvector $|\psi\rangle$ gereduceerd wordt tot $|A_i\rangle$ gegeven worden door $|a_i|^2$. Dit staat bekend als de regel van Born.

(5) Nadat een meting van een bepaalde meetbare eigenschap is geschied, dan zal de toestandsvector van het gemeten systeem veranderen in de eigenvector van de operator geassocieerd met de gemeten eigenschap. Als dus een meting van een observabele O wordt uitgevoerd op een systeem S , en als de uitkomst van die meting $O=a$ is, dan zal – ongeacht wat de toestandsvector van S voor de meting moge geweest zijn – de toestandsvector van S onmiddellijk na de meting een eigenvector zijn van O met eigenwaarde a . Met andere woorden,

The effect of measuring an observable must necessarily be to *change* the state vector of the measured system, to ‘collapse’ it, to make it ‘jump’ from whatever it may have been just prior to the measured system into some eigenvector of the measured observable operator.³⁴

Het is dit vijfde principe – het ‘Projectiepostulaat’ – dat veel kopzorgen veroorzaakte bij natuurkundigen. In de klassieke natuurkunde is een meting of een waarneming immers een passief proces dat enkel een reduceerbare verstoring van het systeem met zich meebrengt. Maar volgens het Projectiepostulaat zijn metingen en waarnemingen uitermate actieve processen, die niet zomaar een kwestie van informatiewinning zijn, maar die op drastische wijze het waargenomen systeem doen veranderen. Dit proces wordt een ‘reductie van de toestandsvector’ genoemd.

³⁴ Albert, D. (1992), *o.c.*, p. 36; oorspronkelijke cursivering.

Volledigheidshalve moet bij dit alles nog een opmerking worden gemaakt. Alles wat we hier verteld hebben over vectoren en operatoren kan vertaald worden in de taal van golffuncties.³⁵ Dit is de reden waarom er zowel gesproken wordt over ‘de ineenstorting van de golffunctie’ als over ‘de reductie van de toestandsvector’. De twee begrippen kunnen door elkaar worden gebruikt; beide vormen een wiskundige voorstelling van een fysische toestand. We zullen in onze uiteenzetting beide formuleringen door elkaar hanteren.

3.2 De Hilbertruimte

De verzameling van alle mogelijke toestanden van een quantumstelsel kunnen door een Hilbertruimte worden beschreven. Voor bepaalde meetbare eigenschappen kan de Hilbertruimte een eindig aantal dimensies hebben, zoals voor ‘spin’. Voor andere observabelen – zoals positie – heeft de Hilbertruimte een oneindig aantal dimensies. Elke alternatieve positie dat een quantum kan innemen, maakt een aparte dimensie uit. Een Hilbertruimte is een vectorruimte die twee belangrijke eigenschappen heeft. De eerste en belangrijkste eigenschap is dat het een *complexe* vectorruimte betreft. De tweede belangrijke eigenschap is dat op elk paar vectoren uit de Hilbertruimte een *Hermitisch scalair product* kan worden toegepast.

De eerste belangrijke eigenschap van de Hilbertruimte betekent dat we combinaties van vectoren kunnen nemen waarvan de wegingcoëfficiënten complexe getallen zijn.³⁶ We hebben gezien dat dergelijke combinaties superposities weergeven. Welnu, het blijkt dat complexe getallen een belangrijke rol spelen bij de beschrijving van superposities in het formalisme. Laten we het voorbeeld hernemen over een elektron dat zich in een superpositie van positie A en positie B bevindt, m.a.w. $w|A\rangle + z|B\rangle$ waarbij w en z complexe getallen zijn. Indien w en z enkel reële getallen mogen zijn, dan kunnen we deze combinatie beschouwen als een representatie van de gewogen som van de relatieve waarschijnlijkheden dat we het elektron op positie A of B vinden. De verhouding $w:z$ zou dan de verhouding zijn tussen de waarschijnlijkheid dat het elektron zich op positie A bevindt en de waarschijnlijkheid dat het elektron zich op positie B bevindt. Als bijvoorbeeld $w = 0$, dan zou het zeker zijn dat het elektron zich op positie B bevindt. Maar zulk een representatie in termen van relatieve waarschijnlijkheden is niet mogelijk,

³⁵ Albert, D. (1992), *o.c.*, p. 47.

³⁶ Penrose, R. (1994), *o.c.*, p. 279.

daar waarschijnlijkheden altijd reële getallen moeten zijn terwijl w en z complex zijn. De toestand $w|A\rangle + z|B\rangle$ stelt dus een superpositie van toestanden voor.

Wanneer we nu het elektron observeren om te weten waar het zich bevindt, dan weten we dat we dergelijke superpositie nooit zullen zien. We zullen óf het elektron op positie A vinden, óf op positie B. Volgens het vierde principe van het formalisme kunnen we de uitkomst van dergelijke observatie enkel in termen van waarschijnlijkheid berekenen. Er bestaat een zeer simpele regel om deze waarschijnlijkheden te bepalen. Deze regel stelt dat bij elke meting van een systeem in toestand $w|A\rangle + z|B\rangle$, waarbij moet bepaald worden of het systeem zich in $|A\rangle$ of $|B\rangle$ bevindt, de verhouding van de waarschijnlijkheid dat het systeem zich in $|A\rangle$ bevindt op de waarschijnlijkheid dat het systeem zich in $|B\rangle$ bevindt, wordt weergegeven door $|w|^2 : |z|^2$ waarbij $|w|^2$ en $|z|^2$ de gekwadrateerde moduli zijn van w en z .³⁷ Enkel bij metingen komen dus waarschijnlijkheden in het spel. Op de vraag waarom dit zo geschiedt, geeft de quantumtheorie geen bevredigend antwoord. Een systeem in superpositie dat onderworpen wordt aan een meting zal dus op een bepaald moment tot één der gesuperposeerde toestanden gereduceerd worden, waarbij de relatieve waarschijnlijkheden op bovenstaande manier berekend worden. Tot welke toestand het systeem uiteindelijk gereduceerd wordt is volledig onbepaald. Twee principes van het formalisme, (2) en (5), kunnen moeilijk met elkaar in overeenstemming worden gebracht. Uiteraard is dit aspect van het formalisme zeer problematisch:

(...) there is something not altogether satisfactory about the matter of *when* – an indeed *why* – the quantum rules should be changed from quantum-level complex-number-weighted determinism to classical-level probability-weighted non-deterministic alternatives, characterized mathematically by the taking of the squared moduli of the complex numbers involved.³⁸

De tweede eigenschap van de Hilbertruimte betreft het Hermitisch scalair product, dat op elk paar vectoren uit de Hilbertruimte kan worden toegepast om een enkel complex getal te bepalen. Deze operatie stelt ons in staat twee belangrijke zaken uit te drukken: de notie ‘gekwadrateerde lengte’ en de notie ‘orthogonaliteit’.³⁹ De ‘gekwadrateerde lengte’ is

³⁷ Stel $z = x + iy$ waarbij x en y reële getallen zijn. De gekwadrateerde modulus van z is dan $|z|^2 = x^2 + y^2 = (x + iy)(x - iy) = zz'$ waarbij $z' (=x - iy)$ de complex toegevoegde van z wordt genoemd.

³⁸ Penrose, R. (1994), *o.c.*, p. 267, oorspronkelijke cursivering. De ideeën van Penrose komen in het volgende hoofdstuk aan bod.

³⁹ Penrose, R. (1994), *o.c.*, p. 280.

het scalair product van een vector met zichzelf, en een genormaliseerde toestand wordt beschreven door een vector uit de Hilbertruimte met een gekwadrateerd lengte gelijk aan één. Van ‘orthogonaliteit’ tussen verschillende vectoren uit de Hilbertruimte spreken we als het scalair product tussen deze vectoren gelijk is aan nul, wat betekent dat de toestanden die ze voorstellen onafhankelijk zijn van elkaar. Dit concept is van groot belang in het formalisme van de quantumtheorie, want het blijkt dat de verschillende alternatieve uitkomsten van een meting steeds orthogonaal zijn ten opzichte van elkaar. Met andere woorden, wanneer een meting wordt uitgevoerd op een systeem, dan zullen de verschillende mogelijke quantumtoestanden die tot onderscheidbare meetresultaten leiden, orthogonaal zijn ten opzichte van elkaar.⁴⁰

3.3 Commuterende en niet-commuterende eigenschappen

Zoals reeds gezegd worden meetbare eigenschappen door operatoren voorgesteld. Beschouwen we het geval van twee operatoren A en B. Er zijn dan twee gevallen mogelijk. A en B ‘commuteren’, of dat doen ze niet.⁴¹

Als A en B commuteren dan verkrijgt men hetzelfde resultaat door op een bepaalde toestandsvector hetzij B en vervolgens A toe te passen, hetzij A en vervolgens B. Duiden wij met a en b twee eigenwaarden van respectievelijk A en B aan. Men kan dan aantonen dat de operatoren een gemeenschappelijke eigenvector hebben, die met deze twee waarden correspondeert. Dat wil zeggen dat de eigenschappen die door A en B worden voorgesteld gelijktijdig meetbaar zijn. Na de meting bevindt het systeem zich in de toestand met waarden a en b: $|a, b\rangle$.

Als A en B daarentegen niet commuteren, dan zijn de eigenschappen niet tezelfdertijd meetbaar. Dat is zoals we gezien hebben het geval voor impuls en positie. Iedere nauwkeurige meting van de ene grootte verstoort de waarde van de andere. Een meting van A brengt het systeem in een bepaalde toestand $|a\rangle$. Meet men dan vervolgens B, dan kan men om het even welke corresponderende eigenwaarde vinden.

⁴⁰ Penrose, R. (1994), *o.c.*, p. 282.

⁴¹ Penrose, R. (1994), *o.c.*, p.

3.4 Systemen bestaande uit meerdere deeltjes

De quantumtheoretische beschrijving van systemen bestaande uit meerdere deeltjes is een stuk gecompliceerder dan de beschrijving van de toestand van één deeltje. Toch kunnen we een eenvoudige algemene notatie voorstellen van zulke systemen. Stel bijvoorbeeld dat $|a\rangle$ de toestand van het deeltje a voorstelt, en $|b\rangle$ de toestand van deeltje b. De toestand van het systeem waarin de toestand van deeltje a $|a\rangle$ is en de toestand van deeltje b $|b\rangle$, kan worden beschreven door $|a\rangle|b\rangle$. Zulk een ‘producttoestand’ $|a\rangle|b\rangle$ moet dus steeds op de volgende manier geïnterpreteerd worden: ‘Het eerste systeem heeft de toestand $|a\rangle$ en het tweede systeem heeft toestand $|b\rangle$ ’.⁴²

De twee systemen kunnen zich echter ook in superpositie bevinden. De toestand van het totale systeem kan bijvoorbeeld $|a\rangle|b\rangle + |c\rangle|d\rangle$ zijn. Dit betreft een lineaire superpositie tussen de eerste conjunctie ($|a\rangle$ én $|b\rangle$) en de tweede ($|c\rangle$ én $|d\rangle$). Zulk een toestand kan van dien aard zijn dat ze ‘verstrengeld’ is. Wanneer men bij zulk een verstrengelde toestand op één van de systemen een meting uitvoert, zal volgens het formalisme niet alleen de toestand van dat ene systeem gereduceerd worden, maar ook de toestand van het andere systeem. Wat deze situatie zo opmerkelijk maakt, is dat ze een ander fundamenteel raadsel aan het licht brengt: non-lokaliteit.

4. Non-lokaliteit

Eén van de experimentele uitkomsten van de quantumtheorie die voer zijn voor interpretatiekwesties, is gebaseerd op het werk van John S. Bell. Bell’s werk bouwt voort op dat van Albert Einstein, Boris Podolsky en Nathan Rosen (in het vervolg ‘EPR’). Zij verzonden hun gedachte-experiment, dat nog steeds bekend staat als de EPR-paradox, om aan te tonen dat de quantummechanica niet compleet kon zijn. Het begrip lokaliteit speelt daarbij een essentiële rol. Het is de hypothese dat de eigenschappen van een bepaald systeem niet ogenblikkelijk kunnen worden beïnvloed door een ander systeem dat zich ver weg bevindt. Zoals David Albert het op zijn manier verwoordt:

⁴² Penrose, R. (1990), *o.c.*, p. 357.

The assumption says that I can't punch you in the nose unless my fist gets to where your nose is.⁴³

Het is natuurlijk mogelijk dat mijn vuist een causale keten in gang zet met uw bloedneus als uiteindelijk gevolg. 'Lokaliteit' stelt echter dat geen enkele fysische invloed zich in deze causale keten kan voortplanten met een snelheid groter dan die van het licht. Elke '*faster-than-light-signalling*' wordt door de speciale relativiteitstheorie verboden, en dus leek 'lokaliteit' geen eis die fysici gemakkelijk wilden laten varen. Het hoeft dan ook geen verbazing dat Einstein niet geloofde in zulk een actie-op-afstand. Voor hem was lokaliteit een onbetwistbare voorwaarde waaraan elke natuurkundige theorie moest voldoen. EPR zagen echter in dat in bepaalde situaties, meerbepaald in situaties waarbij twee systemen met elkaar verstrengeld zijn, de meting op het ene systeem een niet-lokale verandering impliceert in de toestand van het andere systeem.

4.1 Quantumverstrengeling

Quantumverstrengeling is een aspect van de quantumtheorie dat voor het eerst werd opgemerkt door Schrödinger. Hij beschreef het fenomeen op de volgende manier:

When two systems, of which we know the states by their respective representatives, enter into temporary physical interaction due to known forces between them, and when after a time of mutual influence the systems separate again, then they can no longer be described in the same way as before, viz. by endowing each of them with a representative of its own. I would not call that *one* but rather *the* characteristic trait of quantum mechanics, the one that enforces its entire departure from classical lines of thought. By the interaction the two representatives [the quantum states] have become entangled.⁴⁴

Verstrengelde systemen hebben de eigenschap dat ze een invloed op elkaar kunnen uitoefenen. Als twee systemen S_1 en S_2 met elkaar in een bepaalde causale interactie zijn geweest zullen ze steeds, zelfs al houdt deze interactie op en bevinden ze zich op willekeurig grote afstand, met elkaar gecorreleerd blijven (zodat een inwerking op het S_1 gevolgen zal hebben voor S_2). Op zulk een situatie baseerden EPR hun gedachte-experiment.

⁴³ Albert, D. (1992), *o.c.*, p. 64.

⁴⁴ Schrodinger, E. geciteerd in Bub, J. (2005), Quantum Entanglement and Information, Stanford on-line Encyclopedia of Philosophy, zie <http://plato.stanford.edu/entries/qt-entangle/>

4.2 De EPR-paradox

In de jaren dertig van de vorige eeuw baseerde de dominante interpretatie van de quantumtheorie zich vooral op het complementariteitsbeginsel van Bohr. Het fysisch wereldbeeld van Einstein druiste echter volledig in tegen de filosofie van het complementariteitsbeginsel. Het lag dan ook in de lijn der verwachtingen dat Einstein een manier trachtte te vinden om het beginsel te weerleggen. Hierdoor wou hij de onvolledigheid van de quantumtheorie aantonen. Het EPR-artikel werd de bekendste en meest besproken poging.

In het eerste deel van het artikel wordt een epistemologische voorwaarde voorgesteld voor de ‘volledigheid’ van een natuurkundige theorie:

(a₁) *“every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory”*⁴⁵

Er wordt gesteld dat slechts van ‘volledigheid’ sprake is als elk ‘element van de realiteit’ door de golf functie beschreven wordt. De vraag kan dan gesteld worden wat als een element van de realiteit beschouwd kan worden. Om deze vraag te kunnen beantwoorden introduceerden de auteurs een voldoende voorwaarde voor fysische werkelijkheid (*‘criterion of reality’*):

(a₂) *“If, without any way of disturbing the system, we can predict with certainty (that is with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical unity”*⁴⁶

In het tweede gedeelte van hun artikel vatten EPR de quantumtheoretische beschrijving samen in termen van golf functies, en merken op dat bij twee fysische eigenschappen die door niet-commuterende operatoren, zoals positie en impuls, worden voorgesteld, kennis van de ene de kennis van de andere uitsluit. Er wordt bovendien in de vorm van een logische disjunctie geopperd dat, *“either (1) the quantum mechanical description of reality given by the wave function is not complete or (2) when operators corresponding to two physical quantities do not commute the two quantities cannot have simultaneous reality.”*⁴⁷

⁴⁵ Einstein, Podolsky en Rosen (1934) geciteerd in Jammer, M. (1974), *o.c.*, p. 181.

⁴⁶ Ibidem.

⁴⁷ Ibidem.

In het derde gedeelte van hun artikel tonen EPR aan dat, bij bepaalde systemen bestaande uit twee deeltjes 1 en 2, de meting van de impuls van 1 toelaat de impuls van 2 met zekerheid voorspellen zonder 2 te verstoren, en dat het even goed mogelijk is uit de meting van de positie van 1 met zekerheid de positie van 2 te voorspellen, zonder 2 te verstoren.

In het vierde gedeelte worden conclusies uit de eerste drie delen van het artikel getrokken. Stel dat (1) uit de logische disjunctie van het tweede gedeelte vals is, met andere woorden stel dat de quantumtheoretische beschrijving volledig is. Dan zullen de resultaten uit het derde gedeelte tot het besluit leiden dat de twee fysische eigenschappen impuls en positie, die niet-commuterende operatoren hebben, beide gelijktijdig een element van de werkelijkheid zijn. De negatie van (1) leidt bijgevolg tot de negatie van (2), waardoor we moeten besluiten dat de quantumtheoretische beschrijving onvolledig is.

Maar kunnen we de twee voorspelde waarden *tezelfdertijd* aan deeltje 2 toeschrijven? EPR menen van wel, via een veronderstelling die eerder stilzwijgend wordt aangenomen. Deze veronderstelling, die een uitdrukking is van het lokaliteitsbeginsel, stelt dat als “*at the time of measurement [...] two systems no longer interact, no real change can take place in the second system in consequence of anything that may be done to the first system.*”⁴⁸ Door het beginsel van lokaliteit verstoort de positiemeting van 1 wel de impuls van 1, maar niet van 2 – dat in principe lichtjaren van 1 verwijderd kan zijn. Immers, volgens dit principe kan de waarde van een fysische eigenschap van 2 niet afhankelijk zijn van metingen waaraan 1 onderworpen wordt. Er wordt dus verondersteld dat de impuls van 2 niet door de meting van de positie van 1 verstoord of bepaald kan worden, zodat we ervan kunnen uitgaan dat de afgeleide waarde van de impuls van 2 dezelfde is als vóór de meting op 1. De negatie van deze veronderstelling, dat een meting op 1 een niet-lokaal effect heeft op 2, is volgens EPR absurd:

This makes the reality [on the second system] depend upon the process of measurement carried out on the first system, which does not in any way disturb the second system. No reasonable definition of reality could be expected to permit this.⁴⁹

⁴⁸ Einstein, Podolsky en Rosen (1934) geciteerd in Jammer, M. (1974), o.c., p. 185.

⁴⁹ EPR, geciteerd in Fine, A. (2004), The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory, Plato Stanford on-line Encyclopedia of Philosophy, zie <http://plato.stanford.edu/entries/qt-epr>.

De conclusie die getrokken wordt uit het EPR-argument, mag men dus niet beschouwen als een bewijs van de ‘onvolledigheid’ van de quantumtheorie. De conclusie van EPR is veeleer dat quantumtheorie een dilemma stelt tussen ‘volledigheid’ en lokaliteit.⁵⁰ Beiden kunnen niet waar zijn, vandaar de benaming EPR-paradox. Voor EPR had dit dilemma echter een duidelijke oplossing. Aangezien non-lokaliteit voor hen ondenkbaar is en zij dus in geen geval het principe van lokaliteit willen laten vallen, kan volgens hen slechts één besluit worden genomen: de quantumtheorie is ‘onvolledig’.

4.3 De Bohm-versie van het EPR-argument

In het begin van de jaren vijftig bracht David Bohm een boek uit over de quantumtheorie, waarin hij een eigen versie voorstelde van het EPR-argument.⁵¹ Bohm vraagt de lezer zich een molecule in te beelden die bestaat uit twee atomen waarvan de gezamenlijke spin nul bedraagt.⁵² Wanneer zulk een molecule dissocieert in twee atomen, door middel van een proces dat de totale spin van de twee atomen onveranderd laat, vliegen deze twee atomen in tegengestelde richting met een spin die exact tegengesteld is aan elkaar. Nadat ze zeer ver van elkaar verwijderd zijn, wordt vervolgens de spin van een van de atomen gemeten. De onderzoeker kan dan in principe de X-, Y- of Z-component van de spin van dat atoom meten. We kunnen dan hieruit de spin van het andere atoom afleiden, dat even groot en tegengesteld is aan de spin van het gemeten atoom – een perfecte anticorrelatie. De toestand van het systeem dat aan een meting wordt onderworpen, kan als volgt voorgesteld worden:

$$1/\sqrt{2} (|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2)$$

Net zoals impuls en positie, zijn ook de verschillende componenten van de spin niet-commuterende eigenschappen in de quantummechanica. De golffunctie kan dan ook slechts één van deze componenten met een volledige precisie beschrijven. De onderzoeker heeft echter de keuze welke component van de spin van het atoom dat hij aan een meting wil onderwerpen, en hieruit volgt telkens de waarde van de spin-component van het andere atoom. Wanneer de onderzoeker in elk van de richtingen de spin meet van het ene atoom, kent hij dus de spin in elk van de richtingen met een

⁵⁰ Fine, A. (1996), *The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory*, The University of Chicago Press, p. 38.

⁵¹ Bohm, D. (1954), *Quantum Theory*, London: Constable and Company Ltd.

⁵² ‘Spin’ is een eigenschap die men het best vergelijkt met de omwenteling van de aarde om haar as.

volledige precisie van het andere atoom. Welnu, aangezien er wordt voorondersteld dat aan deze afgeleide spin-waarden van het tweede atoom een realiteit beantwoordt die niet kan veroorzaakt zijn door niet-lokale effecten van de metingen op het eerste atoom (lokaliteit), mogen we ervan uitgaan dat het tweede niet gemeten atoom voor elke component van de spin een exacte waarde heeft. Daar de golf functie van het tweede atoom slechts één van deze componenten met een volledige nauwkeurigheid kan weergeven, geeft ze een ‘onvolledige’ beschrijving van de quantummechanische werkelijkheid.

Bohms versie van het EPR-gedachte-experiment vormde de basis voor een voorstel om het gedachte-experiment te realiseren in een reëel experiment. Door technische moeilijkheden werden echter geen onmiddellijke pogingen gedaan om het experiment daadwerkelijk uit te voeren.⁵³ In ieder geval zouden de niet-lokale effecten die onderzocht moesten worden, voortaan ook bekend staan als EPRB-effecten.

4.4 De ongelijkheid van Bell en de experimentele test

De Ierse natuurkundige John S. Bell verschafte onderzoekers een manier om de EPRB-effecten proefondervindelijk te testen. Hij deed dit door de correlaties die in een EPRB-experiment zouden kunnen gemeten worden, aan een wiskundige analyse te onderwerpen. Algemeen gesteld toont de ongelijkheid aan dat de correlatiegraad in een EPRB-experiment aan een bepaalde grens onderhevig is als men een ‘lokaal-realistische’ interpretatie van de quantummechanica onderschrijft. De quantumtheorie voorspelt echter een correlatiegraad die deze grens overschrijdt.

Bell ging uit van een aantal vooronderstellingen die eigen zijn aan een lokaal-realistische interpretatie van de quantummechanica.⁵⁴ Ten eerste wordt een ‘objectieve realiteit’ voorondersteld, m.a.w. een werkelijkheid die onafhankelijk van onze waarneming bestaat. Volgens deze met onze klassieke intuïtie strokende conceptie hebben grootheden welgedefinieerde waarden die onafhankelijk van onze waarnemingen bestaan. De tweede vooronderstelling is ‘lokaliteit’.

⁵³ Fine, A. (2004), o.c., zie <http://plato.stanford.edu/entries/qt-epr/>

⁵⁴ Davies, P.C.W en Brown, J.R (2005), *The Ghost in the Atom*, Cambridge University Press, p. 48.

Laten we naar het gedachte-experiment van EPRB terugkeren. We hebben dus een paar deeltjes met spin $\frac{1}{2}$, die in een gecombineerde toestand met spin 0 verkeerd hebben en daarna uit elkaar vliegen in tegenovergestelde richting naar respectievelijk detector L (links) en detector R (rechts). We veronderstellen dat elke detector in staat is om de spin van het naderende deeltje in een bepaalde richting te meten, waarbij de keuze *welke* richting slechts bepaald wordt wanneer de deeltjes ver genoeg ruimtelijk van elkaar gescheiden zijn. Bell analyseerde zulk een situatie en onderzocht of de voorspellingen van de quantumtheorie konden worden gereproduceerd door een model waarin de deeltjes zich gedragen als onverbonden en onafhankelijke entiteiten, die niet meer met elkaar kunnen ‘communiceren’ nadat ze van elkaar gescheiden zijn.

Uit de analyse van Bell blijkt dat zulk een ‘lokaal-realistisch’ model in deze situatie de voorspellingen van de quantumtheorie *niet* kan reproduceren. De beschrijving van het wiskundig bewijs van de ongelijkheid van Bell, valt buiten het bestek van deze uiteenzetting.⁵⁵ We kunnen ons tevreden stellen met een weergave van de algemene gedachtegang van het bewijs. We hebben gezien dat de spin kan gemeten worden in verschillende richtingen, waarbij het resultaat van een meting telkens een positieve waarde ($+1/2$, *spin-up*) of een negatieve waarde oplevert ($-1/2$; *spin-down*). Laten we de volgende notatie introduceren: (, , ; , ,). De drie open plaatsen voor de puntkomma corresponderen met het linker deeltje en de drie na de puntkomma met het rechter. Elke plaats aan elk van de zijden van de puntkomma correspondeert met een meetrichting, A, B of C. Een + betekent dat de meting van de spin in de richting die correspondeert met de plaats waar de + staat, een spin-up heeft; een – betekent een spin-down. Een 0 betekent + 0 of –, zolang het resultaat consistent is met de plussen en minnen op de andere plaatsen. We hebben gezien dat de spinwaarden van de deeltjes in een EPRB-situatie een perfecte anticorrelatie vertonen, zodat een + op de eerste plaats links van de puntkomma een – op de eerste plaats na de puntkomma impliceert. Het symbool (+,0,0;0,0,+) staat dan voor de waarschijnlijkheid dat de spinmeting van het eerste deeltje in de A-richting spin-up als resultaat heeft, *en* dat de meting van het tweede deeltje in de C-richting spin-up als resultaat heeft. We kunnen nu volgende gelijkheid opstellen:

$$AC: (+,0,0;0,0,+) = (+,+,-;-,-,+) + (+,-,-;-+,+)$$

⁵⁵ Zie bv. Shimony, A. (2005), Bell's Theorem, The Stanford on-line Encyclopedia of Philosophy <http://plato.stanford.edu/entries/bell-theorem/>, voor een uiteenzetting of Rae, A. (2000), *o.c.*, pp. 37-42 of Herbert, N. (1987), *Quantum Reality*, Anchor Books, pp. 211-231, voor een minder technische beschrijving. We baseren ons op de uiteenzetting van Sklar, L. (1995), *o.c.*, pp. 218-223.

We hebben ons op twee zaken gebaseerd: (1) als het eerste deeltje in een bepaalde richting een spin-up heeft, dan heeft het tweede deeltje in die richting een spin-down; (2) gegeven de spin-up van het eerste en tweede deeltje in respectievelijk de A- en de C-richting, zijn er slechts twee mogelijkheden open voor de spin van de deeltjes in B-richting. De totale waarschijnlijkheid dat het eerste deeltje spin-up heeft, *en* dat het tweede deeltje in de C-richting spin-up heeft na een meting in de A-richting, is gelijk aan de waarschijnlijkheid dat dit gebeurt én dat het eerste deeltje in de B-richting een spin-up heeft (en dus dat het tweede deeltje een spin-down in de B-richting heeft) PLUS de waarschijnlijkheid dat dit gebeurt én dat het eerste deeltje in de B-richting een spin-down heeft (en dus dat het tweede deeltje een spin-up in de B-richting heeft). Door middel van dezelfde redenering worden de volgende gelijkheden afgeleid:

$$BC: (0,+;0;0,0,+) = (+,+;-,-,+) + (-,+;-;+,-,+)$$

$$AB: (+,0;0;0,+,0) = (+,-,+;-,+,-) + (+,-;-;+,-,+)$$

We zien dat de eerste term van het rechterlid van AC ook in het rechterlid van BC verschijnt, en dat de tweede term van het rechterlid van AC eveneens in het rechterlid van XY verschijnt. De overblijvende termen van BC en AB moeten groter of gelijk zijn aan nul, aangezien waarschijnlijkheden nooit een negatieve waarde kunnen hebben. Wanneer we dus de linkerleden van BC en AB met elkaar optellen, moeten we een nummer krijgen dat minstens even groot is als het linkerlid van AC, want

$$(0,+;0;0,0,+) + (+,0;0;0,+,0) = (+,0;0;0,0,+) + (-,+;-;+,-,+) + (+,-,+;-,+,-)$$

Hieruit volgt de ongelijkheid

$$(0,+;0;0,0,+) + (+,0;0;0,+,0) \geq (+,0;0;0,0,+)$$

Welnu, het blijkt dat de waarschijnlijkheden die voorspeld worden door de quantumtheorie deze ongelijkheid schendt. De quantumtheorie voorspelt dat in bepaalde richtingen A, B en C, de probalistische correlatie van richting A met richting C $[(+,0;0;0,0,+)]$ *groter* zal zijn dan de som van de probalistische correlatie van richting A met een andere richting B en de probalistische correlatie van die richting B met richting C. Het blijkt dus dat de vooronderstellingen – waarvan lokaliteit de belangrijkste is – waarop de ongelijkheid gebaseerd is, niet compatibel zijn met de quantumtheoretische

voorspellingen. De quantumtheoretische beschrijving van de fysische werkelijkheid lijkt het lokaliteitsbeginsel met de voeten te treden.

De ongelijkheid van Bell opende de weg naar een reële experimentele test ervan. Intussen zijn al veel testen uitgevoerd waarvan resultaten de ongelijkheid schenden. De quantumtheoretische voorspellingen werden dus steeds bevestigd. Het experiment dat voor de eerste keer zeer duidelijk aantoonde dat de ongelijkheid van Bell werd geschonden, is dat van Aspect en zijn collega's in 1981. Zij onderzochten in hun alom bekend experiment de correlaties tussen de polarisaties⁵⁶ van paren fotonen, nadat deze twaalf meter van elkaar verwijderd waren. Hun resultaten waren in perfecte overeenstemming met de quantumtheorie. De quantummechanische werkelijkheid gedraagt zich blijkbaar niet-lokaal.

Een belangrijke opmerking is hier op zijn plaats. We hebben reeds vermeld dat de non-lokaliteit die door de quantumtheorie wordt voorspeld, door de speciale relativiteitstheorie van Einstein wordt verboden. Toch hoeven beide theorieën elkaar niet tegen te spreken. De niet-lokale invloeden die twee of meer verstrengelde systemen op elkaar uitoefenen, zijn immers van een zeer subtiele aard. Deze invloeden zijn immers zodanig subtiel dat ze niet kunnen gebruikt worden voor de transmissie van signalen, en dus voor *faster-than-light-signalling*. Men kan er met andere woorden geen informatie mee doorsturen, waardoor de speciale relativiteitstheorie niet wordt geschonden.⁵⁷

5. Het meetprobleem

Het meetprobleem is wellicht het belangrijkste probleem van de quantumtheorie. De oorzaak van het probleem zijn we al tegengekomen: de niet-lineaire stochastische 'reductie van de toestandsvector' of 'ineenstorting van de golf functie' die met elk meetproces gepaard gaat is niet compatibel met de lineaire deterministische Schrödingervergelijking. We zullen in dit gedeelte wat dieper ingaan op dit aspect, en zullen afsluiten met een bekend gedachte-experiment van Schrödinger, waarin de problematiek zich in alle duidelijkheid manifesteert.

⁵⁶ Polarisatie is een eigenschap van fotonen, die – hoewel verschillend – in een aantal kenmerken gelijkaardig is aan de spineigenschap van andere deeltjes. In het hoofdstuk over nul-interactiemetingen bespreken we kort polarisatie in de context van het quantum-zeno-effect.

⁵⁷ Albert, D. (1992), *o.c.*, p. 72. Voor een uitgebreide discussie over het conflict tussen non-lokaliteit en relativiteit, zie Maudlin, T. (2002), *Quantum Non-Locality and Relativity*, Blackwell Publishing.

5.1 De Schrödingervergelijking en het Projectiepostulaat

Het meetprobleem van de quantummechanica ontstaat door het feit dat verschillende principes uit het formalisme van de theorie elkaar lijken tegen te spreken. Meer bepaald valt een contradictie op tussen het determinisme en de lineariteit van de dynamica van de Schrödingervergelijking (principe 3) en het indeterminisme en de niet-lineariteit van het Projectiepostulaat (principe 5). David Albert verwoordt het probleem als volgt:

The dynamics and the postulate of collapse are flatly in contradiction with one another [...] the postulate of collapse seems to be right about what happens when we make measurements, and the dynamics seems to be bizarrely *wrong* about what happens when we make measurements, and yet the dynamics seems to be *right* about what happens whenever we *aren't* making measurements.⁵⁸

Het probleem ligt in de lineariteit van de Schrödingervergelijking, waardoor een meetinstrument dat een systeem in superpositie van toestanden aan een meting onderwerpt, zich ook in superpositie zou moeten bevinden. Immers, daar het meetinstrument uiteindelijk ook is samengesteld uit quantumentiteiten, kan een golffunctie of toestandsvector worden geassocieerd met het gecombineerd systeem van meetinstrument *en* gemeten systeem. Die golffunctie zou dan door de lineariteit van de dynamica van de Schrödingervergelijking ook een superpositie van verschillende meetuitkomsten moeten beschrijven. Zulk een superpositie van verschillende meetuitkomsten nemen we echter nooit waar.

Vooronderstel bijvoorbeeld een elektron dat zich in een superpositie van impuls A en impuls B bevindt. De toestandsvector is dus een som van de twee vectoren die het elektron met respectievelijk impuls A en B beschrijven: $|\psi\rangle_e = w|A\rangle_e + z|B\rangle_e$. Wanneer nu dit systeem aan een meting wordt onderworpen, dan zal het totale systeem (meetinstrument + systeem) beschreven kunnen worden als $|\psi\rangle_m|\psi\rangle_e = |\psi\rangle_m(w|A\rangle_e + z|B\rangle_e) = w|\psi\rangle_m|A\rangle_e + z|\psi\rangle_m|B\rangle_e$. Indien we nu vooronderstellen – in overeenstemming met de dynamica van de Schrödingervergelijking – dat het meetinstrument een wijzer heeft die de impuls aangeeft, zodat $|\psi\rangle_m|A\rangle_e$ evolueert tot $|\psi^A\rangle|A\rangle_e$ en $|\psi\rangle_m|B\rangle_e$ tot $|\psi^B\rangle|B\rangle_e$ waarbij respectievelijk $|\psi^A\rangle$ en $|\psi^B\rangle$ de toestand weergeeft van de wijzer in respectievelijk richting A en B, dan zal het totale

⁵⁸ Albert, D. (1992), *o.c.*, p. 79, oorspronkelijke cursivering.

systeem evolueren tot $w|\psi^A\rangle_m|A\rangle_e + z|\psi^B\rangle_m|B\rangle_e$. Volgens de Schrödingervergelijking zou het meetinstrument zich dus in een superpositie van twee richtingen moeten bevinden. Een bijkomend postulaat is dus nodig, aangezien we zulk een macroscopische superpositie nooit waarnemen. Door dit postulaat van de reductie van de toestandsvector, evolueert het totale systeem tot ofwel $|\psi^A\rangle|A\rangle_e$, ofwel $|\psi^B\rangle_m|B\rangle_e$. Dat de Schrödingervergelijking een macroscopische superpositie voorspelt, werd door Schrödinger onderstreept in zijn alom bekend gedachte-experiment.

5.2 De Kat van Schrödinger

Het gedachte-experiment van Schrödinger dat het meetprobleem zeer expliciet beschrijft, gaat als volgt. We stellen ons een doos voor die een bron van radioactiviteit bevat, een detector die de aanwezigheid van radioactieve deeltjes registreert, een fles met gif en een levende kat. De apparatuur in de doos is zodanig afgesteld dat gedurende de tijd waarin de detector is ingeschakeld, de kans dat één van de atomen in het radioactieve materiaal zal vervallen (en dus dat de detector dit zal registreren) vijftig procent is. Als de detector radioactief verval waarneemt, wordt de giffles gebroken en sterft de kat.

In zulk een experimentele situatie bevindt het atoom zich volgens de quantumtheorie in een superpositie van vervallen en niet-vervallen. Maar we kunnen de quantumtheorie toepassen op heel de doos, en dit impliceert dat ook de detector in een superpositie is van registreren en niet-registreren, de giffles in een superpositie van breken en niet-breken, en ten slotte de kat in een superpositie van dood en leven. Met andere woorden, tot we in de doos kijken en de situatie observeren, is het volgens de theorie onjuist te stellen dat de kat levend of dood is. Het Projectiepostulaat stelt immers dat slechts bij waarneming of meting deze superpositie gereduceerd zal worden. Vóór deze waarneming moet we echter aannemen dat de kat zich in een morbide superpositie van dood en leven bevindt. Zulk een macroscopische superpositie is ridicuul:

It may be possible (if difficult) to think of a photon as in a superposition of path states or an electron in a superposition of spin states, but isn't it manifestly absurd to think of the cat as neither dead or alive but 'in a combination of both states with equal weight'?⁵⁹

⁵⁹ Sklar, L. (1995), o.c., p. 185.

6. Nabeschuwing

Het meetprobleem heeft een hevig debat doen ontstaan. Aangezien macroscopische superposities nooit worden waargenomen, moeten er een verklaring worden gevonden waarom en wanneer de reductie van de superpositie plaatsvindt. De verschillende oplossingen die werden voorgesteld leidden tot uiteenlopende interpretaties van de quantumtheorie.

Ook de andere fundamentele raadsels van de quantumtheorie, golfdeeltjesdualiteit en non-lokaliteit, worden door de verschillende interpretaties anders geduid. We hebben in dit hoofdstuk gezien dat deze raadsels op een specifieke manier wiskundig worden gearticuleerd in het quantumtheoretisch formalisme. Fysische toestanden worden in dat formalisme weergegeven door toestandsvectoren of golffuncties. We hebben gezien dat hiermee ook respectievelijk superpositie en verstrengelde toestanden kunnen worden beschreven, die aanleiding geven tot respectievelijk golfdeeltjesdualiteit en non-lokaliteit.

Het hoeft dan ook niet te verbazen dat de benaderingen die in het volgende hoofdstuk aan bod komen, zich van elkaar onderscheiden door de ontologische interpretatie die aan de golffunctie verleend wordt. Bovendien wijken de benaderingen fundamenteel van elkaar af wat betreft het ontologisch statuut van het Projectiepostulaat. De reductie van de toestandsvector die door dit postulaat gedictieerd wordt, geeft immers een zeer eigenaardig beeld van de fysische werkelijkheid. Desalniettemin maakt het postulaat deel uit van het formalisme, wat Penrose als het meest raadselachtige aspect van de quantumtheorie beschouwt.

This jumping that the state vector indulges in – or at least *seems* to indulge in – is the most puzzling aspect of quantum theory. It is probably fair to say that most quantum physicists either find ‘jumping’ very *hard* to accept as a feature of actual physical reality, or else refuse *altogether* to accept that reality can behave in this absurd way. Nevertheless, it is an essential feature of the quantum formalism, whatever viewpoint one might hold to as to the ‘reality’ involved.⁶⁰

⁶⁰ Penrose, R. (1994), *o.c.*, pp. 283-284; oorspronkelijke cursivering.

HOOFDSTUK 2

DE INTERPRETATIE

VAN DE

QUANTUMTHEORIE

1. Inleiding

In dit hoofdstuk zullen we de voornaamste interpretaties van de quantumtheorie beschrijven, en enkele voor- en nadelen van elke interpretatie belichten. Zoals we zullen zien, is de interpretatieproblematiek in de quantummechanica filosofisch uitermate relevant, niet alleen vanuit wetenschapsfilosofisch oogpunt maar ook – en misschien vooral – vanuit ontologisch oogpunt. Want welke interpretatie we ook in beschouwing nemen, de implicaties voor ons fysisch wereldbeeld zijn telkens verbijsterend.

Max Tegmark houdt zich af en toe bezig met het afnemen van informele peilingen bij natuurkundigen. Hierbij wordt de vraag gesteld welke interpretatie volgens de respondent de juiste is. De interpretaties in dit hoofdstuk blijken de ‘populairste’ benaderingen te zijn. Van negentig respondenten zijn er dertig aanhanger van de veelwereldenbenadering, vier van de Kopenhaagse interpretatie en vier van een reductietheorie.⁶¹ Vijftig respondenten bleken echter geen mening te hebben. De andere minder populaire benaderingen blijven buiten het bestek van deze uiteenzetting.

2. De Kopenhaagse interpretatie

De Kopenhaagse interpretatie kan beschouwd worden als de eerste poging om een coherent en consistent begrip te vormen van de quantummechanische verschijnselen en van de theorie. De Kopenhaagse interpretatie is echter met verschillende namen verbonden, die er niet altijd dezelfde denkbeelden op nahielden. Vandaag wordt de Kopenhaagse interpretatie gezien als een verzamelnaam voor Bohrs correspondentie- en complementariteitsprincipe, en Borns probalistische interpretatie van de golffunctie.⁶²

⁶¹ Tegmark, M. en Wheeler, J.A. (2001), 100 Years of the Quantum, arXiv: quant-ph/0101077 v1 17 Jan 2001

⁶² Faye, J. (2002), The Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics, Stanford on-line Encyclopedia of Philosophy, zie <http://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen>.

2.1 *Het correspondentieprincipe van Bohr*

John Faye geeft in de *Stanford Encyclopedia of Philosophy* de volgende beschrijving van het correspondentieprincipe of -regel:

The correspondence rule was a heuristic principle meant to make sure that in areas where the influence of Planck's constant could be neglected the numerical values predicted by such a theory should be the same as if they were predicted by classical radiation theory⁶³

Hoewel in het begin de correspondentieregel een methodologisch principe bleef, gaf Bohr het een bredere betekenis. Het principe werd gebaseerd op de idee dat klassieke concepten onontbeerlijk zijn voor ons begrip van de fysische natuur. Het gebruik van klassieke concepten zoals positie en impuls, zijn dus ook onmisbaar voor de beschrijving van de quantummechanische werkelijkheid. Werner Heisenberg opperde dat dit dé paradox is waarop Kopenhaagse interpretatie gebaseerd is.⁶⁴ Want hoewel deze klassieke concepten onontbeerlijk zijn en hun betekenis onveranderd moest blijven, werd hun toepassing in de quantummechanische werkelijkheid noodzakelijk beperkt door de onzekerheidsrelaties. Deze fundamentele grens op de toepasbaarheid van klassieke concepten op de beschrijving van de quantummechanische werkelijkheid, vormde de basis van het complementariteitsprincipe van Bohr.

2.2 *Het complementariteitsprincipe*

Hoewel we in het vorige hoofdstuk het complementariteitsbeginsel reeds vermeld hebben, zullen we er nu wat dieper op ingaan. Het beginsel vormt immers de kern van de Kopenhaagse interpretatie, en legt de basis van de anti-realistische en subjectieve aspecten die deze benadering kenmerken. We zullen eerst het begrip trachten te definiëren. Vervolgens besteden we aandacht aan de rol die waarneming heeft bij complementariteit.

⁶³ Faye, J. (2002), o.c., zie <http://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen>.

⁶⁴ Heisenberg, W. (1989), *Physics and Philosophy*, Penguin Books, p. 32.

2.2.1 De definiëring van het complementariteitsbeginsel

Bohr gaf aan zijn complementariteitsprincipe zelf nooit een scherp omliggende definitie.⁶⁵ David Bohm geeft in zijn boek *Quantum Theory* de volgende algemene beschrijving van het principe:

*At the quantum level, the most general physical properties of any system must be expressed in terms of complementary pairs of variables, each of which can be better defined only at the expense of a corresponding loss in the degree of definition of the other.*⁶⁶

Het beginsel houdt dus een manifeste breuk in met de klassieke natuurkunde, waar een systeem volledig kan worden beschreven door alle relevante variabelen tezelfdertijd met een willekeurige precisie te bepalen. In de quantummechanica echter, kan een systeem slechts volledig beschreven worden door complementaire grootheden achtereenvolgens goed te definiëren. Een quantumstelsel kan dus enkel door meer dan één beschrijving volledig worden beschreven.

We hebben het beginsel al ontmoet in de context van het tweespletenexperiment. Hoewel Heisenberg zijn onzekerheidsrelaties uit het formalisme van de quantumtheorie afleidde, kunnen deze ook toegepast worden op het tweespletenexperiment. Bohr vertrok echter van de analyse van dat experiment, en beschouwde de onzekerheidsrelaties als een wiskundige vertaling van het feit dat ons begrip van de quantummechanische verschijnselen is gebaseerd op complementaire beschrijvingen.⁶⁷ De beschrijvingen zijn complementair omdat men zich moet bedienen van klassieke concepten die door de onzekerheidsrelaties in het quantumdomein slechts een beperkte toepassingsgraad hebben. De algemene idee achter complementariteit is dus dat een quantummechanisch systeem op verschillende klassieke manieren kan en moet worden beschreven. In het tweespletenexperiment kan het systeem beschreven worden aan de hand van een golfmodel of een deeltjesmodel. Golf- en deeltjesaspecten zijn complementair. Op dezelfde manier zijn soms twee aspecten van een dynamische beschrijvingen van een systeem – zoals positie en impuls – complementair.

⁶⁵ Jammer, M. (1974), *o.c.*, p. 95.

⁶⁶ Bohm, D. (1954), *o.c.*, p. 160.

⁶⁷ Faye, J. (2002), *o.c.*, zie <http://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen>.

Bohr en Heisenberg beschouwden de ruimtetijd-beschrijving van een systeem complementair met een causale beschrijving.⁶⁸ Volgens Jammer is ‘deze’ complementariteit de meest algemene, die in de meeste gevallen door Bohr expliciet vermeld wordt. De andere vormen van complementariteit zouden dan een concrete specificatie zijn van deze algemene vorm. De causale beschrijving wordt gegeven door de Schrödingervergelijking die de continue verandering van de golf functie in de tijd bepaalt. Na waarneming van het systeem is een beschrijving van het systeem in de ruimte en tijd mogelijk, maar dit veroorzaakt een discontinue verandering van de golf functie waardoor een causale beschrijving onmogelijk wordt. Bij deze beschrijvingen in ruimte en tijd moet men zich bedienen van klassieke concepten, die telkens elkaar uitsluitende experimentele opstellingen vergen. Jammer verwoordt de gedachtegang van Bohr op de volgende manier:

Bohr contended that descriptions in terms of space time coordinates and descriptions in terms of energy-momentum transfers or, more briefly, spaciotemporal and causal descriptions cannot both be operationally significant at the same time, since they require mutually exclusive experimental arrangements. [...] Such experimental arrangements may be called “complementary”, for although mutually exclusive, they are jointly necessary – or complement each other – for an exhaustive description of the physical situation.⁶⁹

Volgens Bohr waren het ‘quantum postulaat’⁷⁰ en de oncontroleerbare interactie tussen object en meetinstrument de oorzaak van de noodzaak aan complementaire beschrijvingen. De causale beschrijving van een fysisch systeem vergt de eliminatie van eender welke externe verstoring van het systeem. Maar hierdoor wordt waarneming – die een interactie tussen systeem en instrument en dus oncontroleerbare verstoring van het systeem veronderstelt – onmogelijk, en dus ook een spatiotemporele beschrijving. Deze spatiotemporele beschrijving vergt een waarneming waarbij we een oncontroleerbare interactie tussen systeem en instrument moeten toelaten, waardoor “*an unambiguous definition of the state of the system is naturally no longer possible, and there can be no question of causality in the ordinary sense of the word.*”⁷¹

⁶⁸ Heisenberg, W. (1989), *o.c.*, p. 37.

⁶⁹ Jammer, M. (1974), *o.c.*, p. 96.

⁷⁰ Het ‘quantum postulaat’ is een postulaat, “which attributes to any atomic process an essential discontinuity, or rather individuality, completely foreign to the classical theories and symbolized by Planck’s quantum of action.”, Jammer, M. (1974), *o.c.*, p.90.

⁷¹ Bohr, N. (1934) geciteerd in Jammer, M. (1974), *o.c.*, p. 91.

2.2.2 Waarneming en complementariteit

We hebben in het vorige hoofdstuk gezien dat complementariteit als een ontologische interpretatie van de onzekerheidsrelaties moet beschouwd worden. Wanneer de waarde van een bepaalde grootte van een deeltje van een systeem – bijvoorbeeld impuls van een elektron – na waarneming exact bepaald wordt, dan zal haar complementaire ‘partner’ – in casu positie – niet meer een welgedefinieerde grootte zijn. Het is niet zozeer dat we de exacte waarde van de positie niet meer kunnen kennen; het deeltje heeft geen precieze positie meer. De positie wordt na precieze bepaling van de impuls niet meer dan een ‘potentiële’ eigenschap van het elektron. Wanneer het deeltje niet wordt waargenomen en dus ook de impuls niet nader bepaald wordt, zijn volgens het complementariteitsbeginsel zowel impuls als positie niet meer dan ‘potentiële’ complementaire eigenschappen van het elektron:

Thus, an individual electron must be regarded as being in a state where these variables are actually not well defined but exist only as opposing potentialities. These potentialities complement each other, since each is necessary in a complete description of the physical processes through which the electron manifests itself; hence, the name ‘principle of complementarity’.⁷²

Tijdens de waarneming vindt dan de overgang van het ‘mogelijke’ naar het ‘actuele’ plaats.⁷³ Dit wordt één van de vreemdste aspecten van de Kopenhaagse interpretatie van de quantumtheorie beschouwd. Want blijkbaar is het de waarneming zélf die een waargenomen systeem dwingt een keuze te maken voor één optie, die daarmee ‘werkelijkheid’ wordt. Dit benadrukt het subjectieve aspect van deze standaardinterpretatie: welke grootte ‘werkelijk’ wordt, is afhankelijk van de keuze welke grootte we willen waarnemen. Bovendien kunnen we stellen dat volgens de Kopenhaagse interpretatie dynamische eigenschappen van een elektron zoals positie en impuls *contextueel* zijn: welke eigenschappen het elektron heeft is afhankelijk van wat er gemeten wordt en welk meetinstrument gebruikt wordt.⁷⁴ De eigenschappen van het elektron behoren gezamenlijk tot het meetinstrument en het elektron. Hieruit blijkt eveneens het anti-realistische aspect van deze interpretatie:

⁷² Bohm, D. (1954), *o.c.*, p. 159.

⁷³ Heisenberg, W. (1989), *o.c.*, p. 42.

⁷⁴ Voor het meten van de impuls van een deeltje moet men een ander instrument hanteren dan voor het meten van de positie.

When a Copenhagenist says, ‘There is no deep reality,’ she means that there is no hidden value of position that the electron ‘really has’ when it is not being measured. Since position is an attribute that belongs jointly to the electron and its measuring device, when you take away the measuring device you take away the electron’s position too.⁷⁵

Het anti-realisme dat de Kopenhaagse interpretatie kenmerkt moet toch enigszins genuanceerd worden. Statische eigenschappen van een deeltje, zoals de massa en lading van een elektron, behoren ook volgens de Kopenhaagse interpretatie niet gezamenlijk tot het elektron en het meetinstrument. Zoals Max Born het verwoordt:

Though an electron does not behave like a grain of sand in every respect, it has enough invariant properties to be regarded as just as real.⁷⁶

Toch heeft de Kopenhaagse interpretatie een anti-realistische houding tegenover variabele, dynamische eigenschappen van een systeem. Een systeem dat zich in een superpositie bevindt van twee verschillende dynamische toestanden, bijvoorbeeld van positie, zal door de Kopenhaagse interpretatie dan ook op een anti-realistische manier geïnterpreteerd worden. Men moet immers volgens deze interpretatie een deeltje in superpositie van verschillende posities beschouwen als een toestand waarbij men geen enkele betekenisvolle uitspraak kan doen met betrekking tot de positie van het deeltje.⁷⁷ Dit heeft natuurlijk te maken met de manier waarop de golffunctie geïnterpreteerd wordt in de Kopenhaagse benadering.

Aangezien we weten dat de dynamische eigenschappen worden weergegeven door een golffunctie, en aangezien het reëel zijn van deze eigenschappen afhankelijk is van waarneming, kunnen we afleiden dat de Kopenhaagse benadering geen realistische interpretatie geeft aan de golffunctie van een niet waargenomen systeem, dat zich meestal in een superpositie van verschillende toestanden bevindt. Inderdaad, Borns probabilistische en anti-realistische interpretatie van de golffunctie vormt één van de pijlers van de Kopenhaagse interpretatie.

⁷⁵ Herbert, N. (1987), *o.c.*, p. 46.

⁷⁶ Born, M. geciteerd in Jammer, M. (1978), *o.c.*, p. 163.

⁷⁷ Albert, D., *o.c.*, p. 38.

2.3 Borns probabilistische interpretatie van de golffunctie

Born zag in dat de intensiteit van de golffunctie als een maatstaf kan beschouwd worden van de kans dat een fysische waarneembare eigenschap één van haar mogelijke waarden aanneemt.⁷⁸ De golffunctie kan als een functie van verschillende variabelen worden voorgesteld, bijvoorbeeld als een functie van de positie of van de impuls. Afhankelijk van de gekozen voorstelling, kunnen de waarschijnlijkheden worden berekend dat een deeltje zich in een bepaald gebied zal bevinden als de positie wordt gemeten, of dat het deeltje een bepaalde impuls heeft als de impuls wordt gemeten. We moeten enkel naar de intensiteit van de golffunctie kijken in het gebied waarvan we de waarschijnlijkheid willen berekenen. Die intensiteit wordt weergegeven door het kwadraat van de amplitude van de golffunctie in dat gebied.

Born opperde dus dat de golffunctie waarmee een deeltje wordt geassocieerd niet moet beschouwd worden als een objectief-realistische voorstelling van een deeltje, maar als een voorstelling van de waarschijnlijkheid dat na meting de waarden van de impuls of de positie van het deeltje zich binnen een bepaald interval zullen bevinden. De golffunctie waarmee een systeem geassocieerd wordt, mag dus volgens de statistische interpretatie niet beschouwd als de voorstelling van de fysische toestand van het systeem, maar als de voorstelling van onze *kennis* van het systeem.

Indien de golffunctie op deze manier wordt geïnterpreteerd, kan het probleem van de ineenstorting van de golffunctie worden vermeden. Immers, als de golffunctie van een systeem enkel onze kennis van dat systeem voorstelt, dan is het normaal dat een meting de golffunctie doet instorten. Volgens de Kopenhaagse interpretatie vormt de ineenstorting van de golffunctie dus geen ontologisch probleem, maar een epistemologische normaliteit:

Since through the observation our knowledge of the system has changed discontinuously, its mathematical representation also has undergone the discontinuous change and we speak of a 'quantum jump.' When the old adage 'Natura non facit saltus' is used as a basis for criticism of quantum theory, we can reply that certainly our knowledge can change suddenly and that this fact justifies the use of the term 'quantum jump.'⁷⁹

⁷⁸ Sklar, *o.c.*, p.164.

⁷⁹ Heisenberg, W. (1989), *o.c.*, p. 42.

2.4 De Kopenhaagse interpretatie en non-lokaliteit: het antwoord op EPR

Om de repliek van de Kopenhaagse interpretatie – in casu Bohr – op de EPR-paradox te begrijpen, benadrukken we eerst dat EPR een objectief-realistische interpretatie van het formalisme hanteren. Ze nemen immers aan dat de resultaten van een meting op een quantummechanisch systeem corresponderen met objectieve eigenschappen van dat systeem. Zoals we gezien hebben, is dit volgens Bohr een verkeerde voorstelling van zaken. Dynamische eigenschappen van een deeltje zoals positie en impuls hebben slechts een contextuele betekenis die bepaald wordt door de gehele experimentele opstelling in rekening te nemen. Dit wil zeggen dat men aan het niet gemeten deeltje enkel eigenschappen kan toeschrijven, indien men de experimentele opstelling waaraan het gemeten deeltje wordt onderworpen, in rekening neemt. Wat EPR met andere woorden als een ‘element van de realiteit’ van het niet gemeten deeltje beschouwen, maakt voor Bohr geen deel uit van die werkelijkheid daar geen rekening wordt gehouden met deze experimentele opstelling op het gemeten deeltje.

Toch heeft Bohr naar aanleiding van de EPR-situatie zijn denkbeelden rond de contextualiteit van eigenschappen moeten aanpassen.⁸⁰ Voordien had hij die contextualiteit immers op een *interactionele* manier beschouwd, in de zin dat de interactie tussen systeem en meetinstrument de eigenschappen bepaalt. Aangezien EPR indirecte metingen gebruiken om objectieve eigenschappen aan een deeltje toe te schrijven, wordt door Bohr overgestapt naar een *relationele* contextualiteit, in de zin dat er slechts een relatie moet bestaan tussen het indirect gemeten deeltje en het meetinstrument dat enkel met het andere deeltje in interactie treedt. Deze verschuiving in de interpretatie van contextualiteit had echter verregaande gevolgen, daar de objectieve eigenschappen van het niet gemeten deeltje in een niet-lokale, holistische relatie worden gebracht met het meetinstrument waaraan het andere deeltje onderworpen wordt. Met andere woorden de relationeel-contextuele benadering van dynamische eigenschappen van een systeem door de Kopenhaagse interpretatie is inherent niet-lokaal.

⁸⁰ De Muynck, W. (2003), Towards a Neo-Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics, quant-ph0307235v1, p. 20. Zie ook Jammer, M. (1974), o.c., pp. 197-211, over “The Relational Conception of Quantum States” als antwoord van Bohr op EPR.

2.5 Kritiek op de Kopenhaagse interpretatie

De Kopenhaagse interpretatie is niet gevrijwaard gebleven van kritiek. Hoewel het jarenlang de dominerende interpretatie was, konden veel fysici zich niet tevreden stellen met de ontologische en wetenschapsfilosofische aspecten ervan. De Kopenhaagse interpretatie wordt immers gekenmerkt door een nogal vreemde ontologie met logisch empiristische trekjes, waarbij enkel realiteit wordt toegekend aan wat geobserveerd wordt. Deze speciale rol die waarneming krijgt binnen de Kopenhaagse interpretatie, is volgens veel natuurkundigen en filosofen ontologisch problematisch.

Omdat volgens de interpretatie enkel wat waargenomen wordt reëel is, wordt elke ontologische uitspraak zinloos. De Kopenhaagse interpretatie vond ondersteuning in de filosofische leer van het logisch empirisme van de Wiener Kreis. Deze filosofische stroming staat zeer vijandig tegenover ontologische uitspraken. Immers, om cognitief zinvol te zijn moet een propositie volgens het logisch empirisme in principe verifieerbaar zijn.⁸¹ Op dezelfde manier vinden aanhangers van de Kopenhaagse interpretatie elke vraag naar wat er gebeurt in een niet waargenomen quantummechanisch systeem eveneens zinloos. Heisenberg stelt dan ook resoluut dat,

If we want to describe what happens in an atomic event, we have to realize that the word 'happens' can apply only to the observation, not to the state of affairs between two observations.⁸²

Volgens de Kopenhaagse interpretatie is het dus zinloos te vragen wat een quantumentiteit 'werkelijk' is of doet in afwezigheid van waarneming. De natuurkunde kan immers op zulk een vraag geen antwoord geven. De Kopenhaagse interpretatie stelt zich door haar instrumentalistische visie op wetenschap tevreden met de onkunde van de natuurkunde om zulke vragen te beantwoorden. Bohr was bijvoorbeeld van mening dat de natuurkunde geen beschrijving geeft van de werkelijkheid zelf, maar enkel van wat we kunnen zeggen over die werkelijkheid.⁸³ De taak van de natuurkunde ligt volgens deze visie alleen in het maken van juiste voorspellingen.

⁸¹ Weber, E. (2005), *Kennis ontrafeld*, Garant, p. 99.

⁸² Heisenberg, W. (1989), *o.c.*, p. 42.

⁸³ "There is no quantum world. There is only an abstract quantum physical description. It is wrong to think that the task of physics is to find out how nature *is*. Physics concerns what we can say about nature.", Bohr geciteerd in Jammer, M. (1978), *o.c.*, p. 204; oorspronkelijke cursivering.

We moeten wel opmerken dat soms wordt gesteld dat een quantumentiteit ‘werkelijk’ wordt wanneer de interactie tussen de entiteit en het meetinstrument plaatsvindt. De overgang van het ‘mogelijke’ naar het ‘actuele’ moet derhalve geenszins verbonden worden met de registratie van het meetresultaat door een bewuste waarnemer.⁸⁴ Hierdoor worden de problemen echter niet ontweken. Meetinstrumenten krijgen nu immers een zeer speciale rol toegekend: ze creëren de realiteit van de eigenschappen van de entiteit. Maar waarom zouden er zulke magische dingen bestaan, wanneer alles – zoals de theorie beweert – als een quantumstelsel beschouwd kan worden. Ook meetinstrumenten zijn immers samengesteld uit quantumentiteiten, en zouden dus door de theorie moeten beschreven worden.

Dit is de grootste inconsistentie waarmee de Kopenhaagse interpretatie te kampen heeft. Deze inconsistentie maakt eigenlijk de kern uit van het meetprobleem, dat door de Kopenhaagse interpretatie niet bevredigend kan worden opgelost. Als meetinstrumenten zijn samengesteld uit quantumentiteiten, dan zal tijdens het meetproces de onbepaaldheid van de gemeten entiteit zich voortzetten in het meetinstrument – wat aanleiding geeft tot het meetprobleem. De Kopenhaagse interpretatie ontwijkt dat probleem op een intellectueel onbevredigende manier door meetinstrumenten en – processen een speciaal statuut toe te kennen. De vraag waarom meetprocessen door de theorie anders moeten worden behandeld dan andere fysische processen, krijgt echter geen degelijk antwoord. Bovendien wordt nergens gespecificeerd wat een meting eigenlijk inhoudt.⁸⁵

Er kunnen bovendien vraagtekens worden gesteld bij de probalistische interpretatie van de golffunctie. Indien de golffunctie enkel de waarschijnlijkheden bepaalt van verschillende meetuitkomsten in verschillende experimentele situaties, heeft het superpositiebeginsel geen enkele fysische betekenis. Maar hoe kan een superpositie van nog niet gerealiseerde potentialiteiten het verschijnsel van interferentie verklaren?

Beschouwen we bijvoorbeeld een bepaald punt op het detectiescherm van het tweespletenexperiment waar een deeltje gedetecteerd is. We kunnen dan uit de golffunctie die de toestand van het deeltje voorstelt wanneer enkel de eerste spleet open is, de kans berekenen dat het deeltje op dat punt zal terechtkomen. We kunnen hetzelfde doen met de

⁸⁴ Heisenberg, W. (1989), *o.c.*, p. 43.

⁸⁵ Albert, D. (1992), *o.c.*,

golffunctie die de toestand van het deeltje voorstelt wanneer enkel de tweede spleet open is. Maar wanneer beide spleten open zijn treedt er door de superpositie van deze twee golffuncties interferentie op, waardoor de kans dat het deeltje op dat punt zal terechtkomen *kleiner* kan zijn dan de som van de berekende waarschijnlijkheden.⁸⁶ Als de golffunctie enkel een waarschijnlijkheidsgolf voorstelt waaraan verder geen enkele fysische betekenis wordt gegeven, hoe kan dan zulk een destructieve interferentie optreden?⁸⁷

Superpositie is een fundamenteel verschijnsel in de quantummechanica, dat de basis vormt voor veel quantummechanische toepassingen – ook voor de nul-interactiemetingen die we in het volgende hoofdstuk zullen bespreken. Het is moeilijk om deze toepassingen te begrijpen en te duiden wanneer de golffunctie enkel onze kennis voorstelt en geen enkele fysische betekenis heeft.

Ten slotte heeft de Kopenhaagse interpretatie te kampen met een fundamentele inconsistentie. Aangezien deze benadering de quantumtheorie als volledig beschouwt, en dus elk systeem door deze theorie beschreven kan worden, moet ze ook toepasbaar zijn op het universum als geheel. Hier zit de Kopenhaagse interpretatie echter met een groot conceptueel probleem: hoe kan de universele quantumtheorie toegepast worden op heel het universum wanneer volgens de theorie meetprocessen op een speciale manier behandeld worden? In de quantumkosmologie, waarbij men de inzichten van de quantummechanica wil toepassen op het gehele universum om het mysterie van haar oorsprong te ontrafelen, vormt dit aspect van deze benadering een fundamenteel probleem. Indien het volledige universum beschouwd wordt als een quantumstelsel, dan bestaat er immers geen extern meetinstrument dat in staat is de golffunctie van het universum te doen ineensorten. Bijgevolg kan volgens de Kopenhaagse interpretatie er ook geen ‘realiteit’ aan worden toegekend.

⁸⁶ Deze kans kan berekend worden uit de nieuwe golffunctie die de toestand van het deeltje voorstelt wanneer beide spleten open zijn. Deze nieuwe golffunctie is een superpositie van de twee golffunctie die het deeltje voorstellen wanneer de eerste resp. de tweede spleet open is.

⁸⁷ Ook Jammer wijst erop dat Borns interpretatie van de golffunctie het interferentiepatroon van het tweespletenexperiment niet kan verklaren: “Since this double slit experiment can be carried out at such reduced radiation intensities that only one particle passes the apparatus at a time, it becomes clear, on mathematical analysis, that the ψ -wave associated with each particle interferes with itself and the *mathematical* interference is manifested by the *physical* distribution of the particles on the screen. The ψ -function must therefore be something *physically real* and not merely a representation of our knowledge.”, Jammer, M. (1978), *o.c.*, p. 44; oorspronkelijke cursivering.

3. De veelwereldeninterpretatie

De veelwereldeninterpretatie neemt het meetprobleem en de golffunctie wel zeer serieus. De interpretatie is ontstaan als oplossing van het meetprobleem. Meerbepaald wordt er geen speciale rol toegekend aan meetprocessen en krijgt de golffunctie een objectieve en realistische interpretatie. Bovendien ondergaat deze golffunctie volgens de veelwereldenbenadering nooit een reductie. Het projectiepostulaat wordt dus verworpen.

3.1 Verwerping van het Projectiepostulaat

Hugh Everett III, die als eerste een veelwereldeninterpretatie formuleerde, vond de rol en het statuut van het Projectiepostulaat bij de standaardinterpretatie absurd. Het leek hem, *“unreal that there should be a ‘magic’ process in which something quite drastic occurred (collapse of the wave function), while all other times systems were assumed to obey perfectly natural continuous laws.”*⁸⁸

Everett vond het Projectiepostulaat een smet op het formalisme. Hij kon niet geloven dat de golffunctie van een systeem moet instorten van zodra het aan een meting onderworpen wordt. Hij trachtte deze reductie te vermijden door een interpretatie te ontwikkelen die op slechts twee beweringen gebaseerd is:⁸⁹ (I) De golffunctie van een geïsoleerd systeem beschrijft de volledige fysische realiteit van dat systeem. (II) De golffunctie evolueert enkel in overeenstemming met de Schrödingervergelijking. Een gevolg van bewering (I) is dat het volledige universum volgens de Schrödingervergelijking evolueert, daar het universum per definitie een geïsoleerd systeem is. De golffunctie van het universum wordt de ‘universele golffunctie’ genoemd. Een gevolg van bewering (II) is dat er geen ineenstorting van de golffunctie kan plaatsvinden, aangezien dit een contradictie zou inhouden met bewering (I). Het Projectiepostulaat van het quantumformalisme wordt dus verworpen.

De ontologische implicaties van de verwerping van het Projectiepostulaat zijn verbijsterend. We zullen echter zien dat de verschillende aanhangers van de veelwereldenbenadering er niet steeds dezelfde ontologische denkbelden op nahouden.

⁸⁸ Everett, H. geciteerd door Jammer, M. (1974), o.c., p. 505.

⁸⁹ Albert, D. en Loewer, B. (1989), Two No-Collapse Interpretations of Quantum Theory, *Noûs*, Vol. 23, N°2, p. 179.

3.2 Ontologische implicaties

De Witt⁹⁰, die de benadering van Everett jaren later herontdekte en er een eigen interpretatie aan gaf, verwoordt de ontologische consequenties van de reductieloze Schrödingerdynamica van de universele golf functie (of toestandsvector) als volgt:

This state vector never collapses, and hence reality as a whole is rigorously deterministic. This reality, which is described jointly by the dynamical variables and the state vector, is not the reality we customarily think of, but is a reality composed of many worlds. By virtue of the temporal development of the dynamical variables the state vector decomposes naturally into orthogonal vectors, reflecting a continual splitting of the universe into a multitude of mutually unobservable but equally real worlds, in each of which every good measurement has yielded a definite result and in most of which the familiar statistical quantum laws hold.⁹¹

Om dit te illustreren beschouwen we alweer het tweespletenexperiment. Wanneer beide spleten geopend zijn, is de golf functie Ψ die de toestand van het deeltje voorstelt de som van twee simpelere golf functies – die ook takken worden genoemd – die de toestand van het deeltje voorstelt als respectievelijk de eerste (Ψ_1) en de tweede (Ψ_2) spleet open is. Het deeltje bevindt zich in een superpositie. We plaatsen nu een detector aan beide spleten om te zien door welke spleet het deeltje gaat. De quantumtheorie voorspelt dat er vijftig procent kans bestaat dat het deeltje aan de eerste spleet gedetecteerd wordt, en vijftig procent kans aan de tweede. Volgens de Kopenhaagse interpretatie zal Ψ gereduceerd worden *ofwel* tot Ψ_1 *ofwel* tot Ψ_2 , afhankelijk van waar het deeltje gedetecteerd wordt. Welnu, volgens de veelwereldeninterpretatie vindt deze reductie van superpositie *niet* plaats, en hebben beide takken Ψ_1 en Ψ_2 van de oorspronkelijke golf functie Ψ evenveel ‘recht’ op bestaan. Er wordt helemaal geen deel van de golf functie bij detectie ‘weggesneden’ zoals dat bij de Kopenhaagse interpretatie het geval is. Beide componenten van de golf functie blijven na deze meting bestaan, en met beide componenten correspondeert een werkelijkheid.

Maar wanneer aan beide componenten van de golf functie een werkelijkheid correspondeert, hoe komt het dan dat we er telkens slechts één van waarnemen? We

⁹⁰ De Witt heeft de meest ‘populaire’ lezing van Everett ontwikkeld, waarbij de wereld bij elke meting zich ‘splijt’ in evenveel werelden als er meetuitkomsten zijn. Vandaar de benaming ‘veelwereldeninterpretatie’, die eveneens van De Witt afkomstig is.

⁹¹ De Witt, B. geciteerd door Barrett, J. (1997), On Everetts formulation of quantum mechanics, *Monist*, Vol 80, N°1, p. 75.

horen immers nooit dat beide detectoren tegelijkertijd ‘klikken’. De veelwereldeninterpretatie stelt dat in zulk een experiment het universum zich vertakt, in de woorden van De Witt zich splitst, in twee verschillende werelden waarin beide experimentele uitkomsten gerealiseerd worden. Ook de waarnemer vertakt of splitst zich in twee exacte kopieën die elk een verschillende uitkomst waarnemen, zonder zich van elkaar bewust te zijn.

Indien we deze inzichten toepassen op heel het universum, dan zegt de veelwereldeninterpretatie dat de overlappende takken van de universele golf functie van het totale universum, dat dus een multiversum is, niet ineensorten. Met deze takken corresponderen alternatieve werkelijkheden waarvan interactie op het quantumniveau meetbare interferentie oplevert. Wat er nu gebeurt wanneer we een meting verrichten waarbij verschillende uitkomsten mogelijk zijn, dan vertakt het universum in evenveel werelden als er uitkomsten zijn. Elke uitkomst wordt dan in een andere tak waargenomen. De veelwereldeninterpretatie is dus een deterministische⁹² universele theorie over de werkelijkheid waarin elke mogelijkheid in een afzonderlijk universum geactualiseerd wordt.

We kunnen nu inzien op welke manier de veelwereldeninterpretatie het meetprobleem in de quantummechanica oplost. Beschouwen we het gedachte-experiment van Schrödinger, waarin het systeem in superpositie tot twee verschillende toestanden kan evolueren: een dode en een levende kat. Volgens de veelwereldeninterpretatie splitst het universum zich in twee werelden, waarbij de ene een levende kat en de andere een dode kat bevat. Beide werelden bevatten eveneens een kopie van de waarnemer, die in de ene wereld een dode kat en in de andere een levende observeert. Daarom observeren we ook nooit zulk een absurde superpositie van een levende en dode kat – hoewel superposities nooit worden gereduceerd.

Max Tegmark wijst erop dat veel natuurkundigen de gemeenschappelijke misvatting hebben dat de veelwereldeninterpretatie een bijkomend postulaat behoeft die stelt dat, “*At certain magic instances, the world undergoes some kind of metaphysical ‘split’ into two branches that subsequently never interact*”.⁹³ Deze uitspraak is een gevolg van De Witts interpretatie van Everett. De verschillende takken kunnen in bepaalde situaties echter wél in interactie

⁹² De universele golf functie wordt immers geleid door de deterministische Schrodinger vergelijking.

⁹³ Tegmark, M. (1997), Many Worlds or Many Words, arXiv: quant-ph/9709032 v1 15 Sept 1997, p. 2.

treden met elkaar, meerbepaald in situaties waarin interferentie optreedt. Volgens David Deutsch vormt het interferentieverschijnsel zelfs een directe aanwijzing voor het bestaan van een multiversum.⁹⁴ De visie van Deutsch verschilt hierin fundamenteel van die van De Witt, want volgens Deutsch kunnen twee universa die met elkaar geïnterfereerd hebben, weer fuseren.

De visie van Deutsch op het multiversum neemt dus een andere vorm aan dan die van Everett of later De Witt. Volgens De Witt splitst het universum zich letterlijk in meerdere werelden, waarbij in elke wereld een mogelijkheid gerealiseerd wordt. Volgens Deutsch daarentegen bestaan er een enorm groot aantal universa parallel – waarvan een enorm groot aantal identiek zijn – naast elkaar. De oorspronkelijke visie van Everett – de ‘*relative-state*’-formulering – ligt waarschijnlijk ergens tussenin. Everett beschouwde in tegenstelling tot Deutsch een verzameling van identieke universa als één universum.⁹⁵ Als er zich een quantummechanische keuze voordoet, zal volgens de conceptie van Everett het universum zich splitsen in evenveel universa als er opties zijn. Deutsch daarentegen oppert dat telkens zich in het multiversum een keuze voordoet in de quantummechanische werkelijkheid – bijvoorbeeld in het tweespletenexperiment de eerste of de tweede spleet – het multiversum zich zal ‘differentiëren’ in zoveel groepen van universa als er keuzemogelijkheden zijn.

Deutsch hamert er eveneens op dat in bepaalde omstandigheden verschillende universa nog met elkaar in interactie kunnen treden. Wanneer we geen detector plaatsen aan de spleten, weten we dat er interferentie zal optreden. Deutsch stelt dat zulk een interferentie enkel kan optreden tussen universa die bijna identiek zijn aan elkaar:

The detection of interference between any two universes requires an interaction to take place between *all the particles whose position and other attributes are not identical* in the two universes. In practice this means that interference is strong enough to be detected only between universes that are very alike.⁹⁶

⁹⁴ Deutsch, D. (1997), *The Fabric of Reality*, London: Penguin, p. 50, oorspronkelijke cursivering. Volgens Deutsch hebben we zelfs geen theorie nodig om in parallelle werelden te geloven; een loutere beschouwing van het tweespletenexperiment is voldoende: “*we don’t need deep theories to tell us that parallel universes exist – single particle interference phenomena tell us that.*”

⁹⁵ Davies, P. en Brown, J. (2005), o.c., p. 85.

⁹⁶ Deutsch, D. (1998), o.c., p. 48, oorspronkelijke cursivering.

Als deze universa enkel met elkaar op quantumniveau interfereren, en er geen verstoring in de omgeving wordt veroorzaakt, kunnen ze weer fuseren. Dikwijls wordt echter wel een verstoring in de omgeving veroorzaakt. Wanneer de universa dan ophouden met elkaar te interfereren, daar vertelt de theorie van decoherentie ons meer over. Hoewel deze theorie geen bewijs levert dat de veelwereldeninterpretatie de enige juiste benadering is, geeft ze er een goede ondersteuning aan. Sinds de theorie werd ontwikkeld, zijn dan ook steeds meer natuurkundigen aanhanger geworden van de veelwereldeninterpretatie. We zullen daarom in dit gedeelte het fenomeen van decoherentie kort belichten.

3.3 Decoherentie

Uit het postulaat van Everett volgt dat er nooit een reductie van de superpositie optreedt. Waarom nemen we dan nooit dergelijke superpositie waar; met andere woorden, waarom oogt onze wereld dan klassiek? Op die vraag kon de theorie van decoherentie een antwoord geven. Om die reden won de interpretatie van Everett veel aantrekkingskracht.

De theorie van de decoherentie onderzoekt de interactie tussen een systeem met diens omgeving, waarbij interferentie-effecten door deze interactie worden onderdrukt. In het bijzonder zal een systeem in superpositie, waarbij interferentie optreedt tussen de verschillende toestanden, na interactie met de omgeving – bijvoorbeeld een meetinstrument – met deze omgeving verstrengelen. Hierdoor zal de oorspronkelijke superpositie zich voortzetten in de omgeving, maar zullen de interferentie-effecten van deze superpositie verdwijnen.⁹⁷

Beschouwen we bijvoorbeeld de situatie bij onze bespreking van het meetprobleem (zie hoofdstuk 1, afdeling 5), waarbij een deeltje zich in superpositie bevindt van twee impulsen $w|A\rangle + z|B\rangle$. Bij meting evolueert deze toestand tot $w|\psi^A\rangle_m|A\rangle_e + z|\psi^B\rangle_m|B\rangle_e$, waarbij respectievelijk $|\psi^A\rangle_m$ en $|\psi^B\rangle_m$ de toestand van het meetinstrument na meting voorstellen. Dit is een verstrengelde toestand, waarbij de theorie van decoherentie leert dat de twee samenstellende takken $w|\psi^A\rangle_m|A\rangle_e$ en $z|\psi^B\rangle_m|B\rangle_e$ zeer kort na het meetproces zullen ophouden met elkaar te interfereren.

⁹⁷ Van Loocke, P. (2006), *Het Universum waarin we leven. Mogelijkheden en beperkingen van de huidige wetenschap met betrekking tot de constructie van een wereldbeeld*, cursus gedoceerd aan de 2^{de} licentie Wijsbegeerte aan de Universiteit van Gent, Hoofdstuk 3.

Deze toestand kan echter ook de toestand van een waarnemer bevatten. Stel dat deze toestand wordt voorgesteld als respectievelijk $|\Phi^A\rangle_w$ en $|\Phi^B\rangle_w$ als de waarnemer respectievelijk de toestand $|\psi^A\rangle_m|A\rangle_e$ en $|\psi^B\rangle_m|B\rangle_e$ waarneemt. De volledige toestand wordt dan beschreven door $w|\Phi^A\rangle_w|\psi^A\rangle_m|A\rangle_e + z|\Phi^B\rangle_w|\psi^B\rangle_m|B\rangle_e$. Welnu, decoherentie leert dat natuurlijk dat ook deze twee takken ($|\Phi^A\rangle_w|\psi^A\rangle_m|A\rangle_e$ en $|\Phi^B\rangle_w|\psi^B\rangle_m|B\rangle_e$) kort na het meetproces ophouden met elkaar te interfereren. Hierdoor stelt elke tak een specifieke werkelijkheid voor die klassiek oogt. Een waarnemer in de ene tak krijgt immers geen informatie uit de andere tak, aangezien interferentie de enige manier is waarmee verschillende takken elkaar kunnen beïnvloeden. Daar elke tak volgens de veelwereldeninterpretatie een ander universum voorstelt, kan decoherentie dus verklaren waarom men deze universa niet waarneemt en waarom elk universum klassiek oogt. De idee achter decoherentie is dus dat een quantumstelsel en een meetinstrument, samen met de omgeving – die allemaal evolueren volgens de Schrödingervergelijking – zich zullen gedragen *alsof* er een reductie plaatsvond wanneer de effecten van het meetproces verstrengeld geraken met de omgeving.

3.4 De veelwereldeninterpretatie en non-lokaliteit

Eén van de grote voordelen van de veelwereldeninterpretatie is dat in deze benadering non-lokaliteit vermeden wordt. David Deutsch ontwikkelde een wiskundig bewijs waarin dit werd aangetoond.⁹⁸ We kunnen aan de hand van de EPRB-situatie zien dat een bepaalde veronderstelling die Bell maakte, niet opgaat in de context van de veelwereldeninterpretatie.

Bell veronderstelde namelijk dat metingen in een EPRB-experiment slechts één uitkomst kunnen hebben.⁹⁹ In de veelwereldeninterpretatie is dit echter niet het geval. Indien de linkerdetector de spin van het ene deeltje meet, zal het universum zich vertakken en zullen beide uitkomsten + en – geregistreerd worden. Ook aan de rechterdetector zal bij de meting van de spin van het andere deeltje het universum zich vertakken en zullen beide resultaten worden gemeten. Alles gebeurt in volledige overeenstemming met de Schrödingervergelijking, en er komen geen niet-lokale correlaties aan te pas.

⁹⁸ Bruce, C. (2004), *o.c.*, p. 176. Het artikel waarin Deutsch, samen met een collega, dit wiskundig bewijs levert betreft, Deutsch, D. en Hayden, P. (2000), Information flow in entangled quantum systems, *Proceedings of the Royal Society of London*, Ser. A 456, pp. 1759-1774.

⁹⁹ Albert, D. (1992), *o.c.*, p.131.

Wanneer de resultaten van zulke metingen in één universum bij elkaar worden gebracht, kan onderzocht worden in hoeverre de resultaten van beide detectoren met elkaar gecorreleerd zijn. De correlaties die gevonden zullen worden, zijn precies dezelfde die door de quantumtheorie voorspeld zijn. In de context van de veelwereldenbenadering impliceren deze correlaties echter geen non-lokaliteit.¹⁰⁰

3.5 Een theorie en geen interpretatie

We hebben reeds vermeld dat Deutsch een andere visie heeft op het multiversum dan De Witt. Dit heeft een interessante epistemologische implicatie: de multiversumversie van Deutsch kan, in tegenstelling tot die van De Witt, in de verre toekomst aan een experimentele test onderworpen worden.

Het experiment dat door Deutsch wordt voorgesteld betreft een gewoon interferentie-experiment, waarbij de initiële toestand van het systeem zich vertakt in twee verschillende toestanden die, indien het systeem niet verstoord wordt, terug gecombineerd worden om één enkele toestand te vormen. Een superbrein met een geheugen op quantumniveau observeert het systeem, en zal volgens de veelwereldeninterpretatie zelf vertakken in twee kopieën in twee universa en vervolgens weer fuseren. Het experiment van Deutsch komt erop neer om interferentie in dit artificieel superbrein waar te nemen:

This can be done [...] by his trying to remember various things so that he can conduct an experiment on his own brain while it's working [...] And what he tries to observe is an interference phenomenon between different states of his own brain. In other words, he tries to observe the effect of different internal states of his brain in different universes interacting with each other.¹⁰¹

Op het moment dat er twee toestanden en twee universa zijn, moet het superbrein noteren dat het één en slechts één van de twee mogelijkheden waarneemt. Vervolgens treedt er interferentie op, zowel tussen de twee toestanden van het systeem als tussen de toestanden van het brein in de twee universa. De resultaten van het experiment moeten

¹⁰⁰ Albert, D. (1992), *o.c.*, p. 131-132. Albert bespreekt non-lokaliteit in de context van zijn eigen interpretatie van Everett, de *'Many Minds Interpretation'*. De bespreking van deze interpretatie valt buiten het bestek van deze uiteenzetting.

¹⁰¹ Deutsch, D. geciteerd in Whitaker, A. (1996), *Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma*, Cambridge University Press, p. 279.

aantonen dat beide quantummechanische toestanden en beide breintoestanden wel degelijk bestonden vooraleer interferentie de universa tot één universum doet fuseren.

Volgens de Kopenhaagse interpretatie zal het systeem echter gereduceerd worden van zodra het wordt waargenomen door het superbrein. Er zal geen interferentie optreden, waardoor een andere experimentele voorspelling wordt gedaan dan de veelwereldeninterpretatie. Het experiment van Deutsch is weliswaar met de huidige stand van de technologie onmogelijk uit te voeren.

3.6 Kritiek op de veelwereldeninterpretatie

Ook de veelwereldeninterpretatie is niet gespaard gebleven van kritiek. Eerst en vooral vinden veel natuurkundigen de metafysische bagage van deze interpretatie onaanvaardbaar. Bovendien zijn er enkele technische problemen aan verbonden. Twee technische problemen duiken regelmatig in de literatuur op: het ‘basisprobleem’ en het ‘probleem van de interpretatie van waarschijnlijkheden’.

3.6.1 Het Scheermes van Ockham

Ockham ontwikkelde een alom bekend methodisch principe dat stelt dat entiteiten niet verder mogen toenemen dan noodzakelijk is om een bepaald fenomeen te verklaren. Als twee concurrerende theorieën een verschijnsel even adequaat verklaren, verdient de meest eenvoudige de voorkeur. Het principe wordt door veel natuurkundigen gehanteerd om de veelwereldeninterpretatie te verwerpen. Het bestaan van een enorm groot aantal universa wordt immers gepostuleerd, om bepaalde quantummechanische verschijnselen te verklaren. Aangezien ook andere interpretaties deze verschijnselen kunnen duiden, wordt aan deze ‘ontologisch zuinigere’ benaderingen de voorkeur gegeven.

Voorstanders van de veelwereldeninterpretatie brengen echter een andere visie op het principe naar voor. Ze leggen de nadruk op het feit dat – door de verwerping van het Projectiepostulaat – hun interpretatie minder vooronderstellingen heeft dan de andere interpretaties. We worden dus voor de wetenschapsfilosofische keuze gesteld tussen zuinigheid in werelden en zuinigheid in vooronderstellingen. Want zoals Paul Davies het verwoordt, is de veelwereldeninterpretatie “*cheap on assumption, but expensive on universes*”.¹⁰²

¹⁰² Davies, P. en Brown, J. (2005), *o.c.*, p. 84.

3.6.2 De interpretatie van waarschijnlijkheden

Er bestaat in de context van de veelwereldeninterpretatie een belangrijk probleem met betrekking tot de interpretatie van (relatieve) waarschijnlijkheden. De quantumtheorie voorspelt uitkomsten van experimenten door middel van relatieve waarschijnlijkheden. Wanneer bijvoorbeeld een experiment wordt uitgevoerd waarbij de theorie voorspelt dat er tachtig procent kans bestaat dat de eerste mogelijkheid zich voordoet en twintig procent kans dat de tweede gerealiseerd wordt, heeft het zin om in termen van waarschijnlijkheden te spreken. In de context van de veelwereldeninterpretatie daarentegen, waarin elke mogelijkheid geactualiseerd wordt in een afzonderlijk universum, hebben zulke uitspraken in termen van waarschijnlijkheid geen betekenis. Wat voor zin heeft het immers te stellen dat de eerste uitkomst vier keer meer kans heeft om gerealiseerd te worden als beide uitkomsten zich voordoen in een afzonderlijk universum?

De Israëliëse natuurkundige Lev Vaidman – die we ook in het volgende hoofdstuk in de context van interactievrije metingen zullen ontmoeten – heeft een oplossing voorgesteld waarbij waarschijnlijkheid in de veelwereldeninterpretatie in termen van onwetendheid moet geïnterpreteerd worden.¹⁰³ Een cruciaal concept bij de interpretatie van relatieve waarschijnlijkheden is de ‘maat van bestaan’ (*measure of existence*). Dit is een concept dat reeds door Everett werd geïntroduceerd om betekenis te kunnen verlenen aan waarschijnlijkheidsuitspraken.¹⁰⁴ We kunnen intuïtief gemakkelijk aanvoelen wat met dit begrip bedoeld wordt. In het voorbeeld van hierboven zal de ‘maat van bestaan’ van het universum waarin de eerste uitkomst zich voordoet bijvoorbeeld vier maal groter zijn dan die van het universum waarin de tweede uitkomst zich voordoet. Om de waarde van een relatieve waarschijnlijkheid van een bepaalde uitkomst te kennen in de context van de veelwereldeninterpretatie, is nu wel een extra waarschijnlijkheidspostulaat nodig dat stelt dat,

The probability of an outcome of a quantum experiment is proportional to the total measure of existence of all worlds with that outcome.¹⁰⁵

¹⁰³ Vaidman, L. (2002), The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics, Stanford online Encyclopedia of Philosophy, zie <http://plato.stanford.edu/entries/qm-manyworlds/>

¹⁰⁴ Bruce, C. (2004), *Schrödingers Rabbits. The Many Worlds of Quantum*, New York: National Academy Press, p. 171. Everett gaf het concept de naam ‘*measure*’.

¹⁰⁵ Vaidman, L. (2002), *o.c.*, zie <http://plato.stanford.edu/entries/qm-manyworlds/>

Hoewel het vanuit objectief oogpunt zinloos lijkt te vragen naar de kans dat de eerste of de tweede uitkomst gerealiseerd zal worden, is in de volgende situatie de vraag wel sensicaal. Stel dat Lev het experiment uitvoert, en vooraleer hij zich bewust wordt van de uitkomst een slaappil krijgt toegediend.¹⁰⁶ Afhankelijk van de uitkomst wordt hij in een eerste of een tweede kamer gelegd en wakker gemaakt. Vooraleer hij zijn ogen geopend heeft, wordt aan Lev gevraagd wat de kans is dat hij zich in de eerste kamer bevindt (en dat hij dus in de eerste wereld is wakker geworden). Hoewel wij weten in welke wereld Lev zich bevindt, is hij hierover onwetend. Ongeacht in welke wereld hij is wakker geworden zal Lev aan de hand van het waarschijnlijkheidspostulaat stellen dat de kans tachtig procent is, ook wanneer hij zich in de tweede wereld zou bevinden. Met andere woorden,

Since Lev before the measurement is associated with two 'Lev's after the measurement who have identical ignorance probability concepts for the outcome of the experiment, I can define the probability of the outcome of the experiment to be performed as the ignorance probability of the successors of Lev for being in a world with a particular outcome.¹⁰⁷

Aangezien de deductie van de relatieve waarschijnlijkheden een extra postulaat vergt, zijn er andere pogingen ondernomen om de probabiliteitscalculi af te leiden uit het formalisme van de veelwereldeninterpretatie. De aantrekkingskracht van deze interpretatie lag immers voornamelijk in haar zuinigheid in postulaten. De bespreking van deze pogingen vallen echter buiten het bestek van deze uiteenzetting. Voor een kort overzicht verwijzen we naar Bruce (2004).¹⁰⁸

3.6.3 Het basisprobleem

Er bestaan altijd verschillende manieren om de quantummechanische toestand van een systeem te beschrijven als de som van vectoren in de Hilbertruimte. Het formalisme van de quantumtheorie laat dus toe om de universele toestandsvector of golffunctie op verschillende manieren te ontbinden in een superpositie van orthogonale toestanden.¹⁰⁹ Het formalisme schrijft echter niet voor welke ontbinding, met andere woorden welke basis, we moeten kiezen om de toestand van het multiversum te beschrijven. Elke

¹⁰⁶ Het argument staat om die reden in de literatuur bekend als het *'sleeping pill argument'*.

¹⁰⁷ Vaidman, L. (2002), o.c., zie <http://plato.stanford.edu/entries/qm-manyworlds/>

¹⁰⁸ Bruce, C. (2004), *o.c.*, pp. 170-178.

¹⁰⁹ Vaidman, L. (2002), o.c., zie <http://plato.stanford.edu/entries/qm-manyworlds/>

ontbinding stelt echter een verschillende vertakking van het multiversum voor, waarbij dus afhankelijk van de gekozen ontbinding verschillende variabelen een welgedefinieerde waarde hebben in verschillende parallele universa. Aangezien er geen enkele basis om formele redenen de voorkeur verdient, kan het multiversum naar believen op verschillende manieren in universa worden vertakt, wat telkens een compleet anders beeld van de werkelijkheid oplevert. Bovendien verkrijgt de MWI hierdoor een fundamenteel gebrek aan voorspellingskracht.

Henry Stapp stelt dat vooraleer er een veelwereldeninterpretatie kan bestaan, het basisprobleem moet worden opgelost. Dit vereist de afleiding van wiskundige regels die specificeren,

- (1), when the full reality splits into these distinct worlds, or branches, (2), what these separate parts are, and (3), which variables associated with these different worlds, or branches, acquire, or possess, definite values in each such world, or branch.¹¹⁰

De meeste aanhangers van de veelwereldeninterpretatie zijn van mening dat de theorie van decoherentie het basisprobleem oplost. Stapp wijst er echter op dat het decoherentiemechanisme er wel voor zorgt dat geen interferentie tussen de verschillende takken optreedt, maar dat dit gegeven het basisprobleem niet oplost.¹¹¹ Decoherentie enkel gecombineerd met de unitaire Schrödingerdynamica (zoals in de veelwereldeninterpretatie) geeft immers aanleiding tot een continuüm van verschillende takken die elkaar overlappen, en dus niet orthogonaal zijn ten opzichte van elkaar. Het probleem voor de veelwereldeninterpretatie betreft het feit dat deze takken *“do not enjoy the locality and quasi-classicality properties of the states defined by environmental decoherence effects, and hence are not satisfactory preferred basis states. This core problem needs to be addressed and resolved before a many-worlds-type interpretation can be said to exist.”*¹¹²

Desalniettemin zijn veel natuurkundigen ervan overtuigd dat decoherentie de baan effent voor een definitieve oplossing. Vooraleer echter zulk een definitieve oplossing van het probleem wordt voorgesteld, kan de veelwereldeninterpretatie niet als een afgewerkte theorie beschouwd worden.

¹¹⁰ Stapp, H. (2002), The Basis Problem in Many Worlds Theories, quant-ph/0110148v2

¹¹¹ Stapp, H. (2002), o.c., p.10.

¹¹² Stapp, H. (2002), o.c., p.1.

4. Reductietheorieën

Reductietheorieën zijn theorieën die niet enkel de golffunctie op een objectief-realistische manier interpreteren, maar eveneens de reductie van de golffunctie. Volgens deze theorieën is de quantumtheorie een onvolledige theorie, en zal ze slechts volledig zijn wanneer ze het ook mechanisme beschrijft dat verantwoordelijk is voor de ineenstorting van de golffunctie. De eerste serieuze poging om zulk een reductiemechanisme te definiëren werd ondernomen door Ghirardi, Rimini en Weber (GRW). Ook de theorie van Roger Penrose moet geplaatst worden binnen deze context. Hij zal het mechanisme van de ineenstorting van de golffunctie verbinden aan de zwaartekracht. Hoewel er meer voorstellen van reductiemechanismen bestaan, zullen we ons in onze uiteenzetting beperken tot een beknopte bespreking van GRW en Penrose.

4.1 *Het GRW-model*

4.1.1 Beschrijving van het model

De idee achter de theorie van GRW was dat het quantumformalisme moest aangepast worden, zodat micro- én macroprocessen worden geleid door eenzelfde verenigde dynamica. Er diende een mechanisme te worden gezocht dat verantwoordelijk kon zijn voor een dynamische reductie van de golffunctie. Dat het formalisme moet aangepast worden, kan men gemakkelijk inzien, daar de lineaire en deterministische Schrödinger-vergelijking niet compatibel is met de niet-lineaire en stochastische reductie. GRW opperden dan ook dat er een niet-lineaire modificatie van de Schrödinger-vergelijking vereist is om een dynamische reductie van een systeem te veroorzaken.¹¹³

Zulk een theorie heeft net zoals de veelwereldeninterpretatie te kampen met het basisprobleem. Indien het formalisme een universeel reductiemechanisme moet incorporeren, naar welke basis moet de golffunctie dan door het reductiemechanisme worden gedreven; met andere woorden (in het jargon van de Kopenhaagse interpretatie) welke ‘potentialiteiten’ moeten door het reductiemechanisme worden geactualiseerd? Volgens GRW zijn macroscopische superposities van verschillende lokalisaties – bijvoorbeeld een wijzer van een meetinstrument die zich in een superpositie van twee

¹¹³ Ghirardi, G. (2002), Collapse Theories, Stanford on-line Encyclopedia of Philosophy. Zie <http://plato.stanford.edu/entries/qm-collapse/>

verschillende aanduidingen bevindt – het meest ‘*embarrassing*’. In een objectief-realistische beschrijving van de fysische natuur moeten macroscopische objecten nu eenmaal welgedefinieerde posities hebben. Het GRW-model moet bijgevolg voorzien in de mogelijkheid van een spontaan proces dat superposities van verschillende gelokaliseerde toestanden onderdrukt.¹¹⁴

Beschouwen we nu een golffunctie van een gelokaliseerd vrij deeltje. Volgens de Schrödingervergelijking zal deze golffunctie zich in alle richtingen in de ruimte verspreiden naarmate de tijd voortschrijdt. Het deeltje zal bijgevolg steeds minder gelokaliseerd zijn en bevindt zich in een superpositie van (oneindig) veel verschillende gelokaliseerde toestanden. De nieuwe vooronderstelling die GRW nu maken is dat in zulk een situatie er op willekeurige ogenblikken een spontane reductie optreedt tot een willekeurig gelokaliseerde toestand. Ze stellen namelijk dat er een zeer kleine kans bestaat dat deze uitgespreide golffunctie plots vermenigvuldigd wordt met een speciale *Gauss*-functie (de golffunctie ondergaat een ‘*hit*’). Hierdoor wordt de golffunctie van het deeltje weer sterk gelokaliseerd, waarna het zich terug kan beginnen verspreiden. De vorm van deze Gauss-functie wordt zo gekozen, dat de kans dat de piek ervan zich op een bepaalde plaats bevindt evenredig is met het kwadraat van de waarde van de golffunctie op deze plaats. Op deze manier worden zijn de resultaten van het GRW-schema in overeenstemming met de waarschijnlijkheidsvoorspellingen van de quantumtheorie.

Wanneer men maar één deeltje in beschouwing neemt, zal volgens de predicties van het GRW-schema gemiddeld slechts om de honderd miljoen jaar een spontane lokalisatie (reductie) optreden. De kans dat er binnen een periode van één seconde een reductie zich voordoet, bedraagt dan minder dan 10^{-15} . Wanneer we echter een macroscopisch object beschouwen, dat bijvoorbeeld uit 10^{25} deeltjes is samengesteld, wordt de kans dat één van die deeltjes een spontane lokalisatie ondergaat enorm vergroot. Er kan dan berekend worden dat in zulk een object een deeltje in ongeveer 10^{-10} sec een *hit* ondergaat.¹¹⁵ Zulk een spontane reductie van één van die deeltjes zou een verandering van de volledige toestand van het object veroorzaken, aangezien men kan verwachten dat de toestand van het betrokken deeltje verstrengeld is met de toestand van de andere deeltjes waaruit het object is samengesteld. Door de spontane reductie van één van de

¹¹⁴ Ghirardi, G. (2002), *o.c.*, zie <http://plato.stanford.edu/entries/qm-collapse/>

¹¹⁵ Penrose, R. (1994), *o.c.*, p. 333.

samenstellende deeltjes van het object, zal dus heel het object een spontane lokalisatie ondergaan.¹¹⁶

In het tweespletenexperiment met beide spleten open zal de kans dat één enkel deeltje een spontane lokalisatie ondergaat gedurende de fractie van een seconde dat het door de experimentele opstelling vliegt, verwaarloosbaar klein zijn. Het golfgedrag van het deeltje zal tot uiting komen. Indien er echter een detector wordt geplaatst zodat we kunnen waarnemen door welke spleet het deeltje is gegaan, zal door het feit dat deze detector uit 10^{25} tot 10^{26} deeltjes bestaat en het deeltje met deze detector verstrengeld is, wél een spontane lokalisatie plaatsvinden. Het deeltje zal zich bijgevolg niet meer als een golf kunnen gedragen. Wanneer we het gedachte-experiment van Schrödinger beschouwen, kunnen we gemakkelijk inzien dat de één van de 10^{27} deeltjes waaruit de kat is samengesteld, een spontane lokalisatie zal ondergaan. Aangezien de toestand van dat deeltje verstrengeld is met de andere deeltjes in de kat, zal de reductie van dat ene deeltje de andere eveneens doen reduceren, waardoor de kat in een toestand van ‘dood’ of ‘levend’ wordt gesleurd. Door een fysisch reductiemechanisme te veronderstellen, kan met andere woorden het meetprobleem worden opgelost.

4.1.2 Kritiek op het GRW-model

Men kan natuurlijk tegen het GRW-schema inbrengen dat de vorm die de Gauss-functie bijzonder *ad hoc* is. Deze vorm wordt immers zodanig gekozen dat de voorspellingen die de GRW-theorie maakt in overeenstemming zijn met de voorspellingen van de quantumtheorie.

De sterkste kritiek op de GRW-theorie komt waarschijnlijk van Albert en Vaidman, die een gedachte-experiment ontwikkelden waarin de uitkomst van een meting geen betrekking heeft op de macroscopische positieverandering van een onderdeel van een meetinstrument, zoals bijvoorbeeld de positiewijziging van een wijzer. Hoewel er in hun gedachte-experiment wel degelijk een uniek meetresultaat bestaat, tonen Albert en Vaidman aan dat de theorie van GRW niet kan voorzien in zulk een uniek resultaat.¹¹⁷

¹¹⁶ We kunnen gemakkelijk inzien dat zulk een proces, waarbij de spontane lokalisatie van één van de deeltjes een verandering van de toestand van het volledige object teweegbrengt, inherent niet-lokaal is.

¹¹⁷ Albert, D. en Vaidman, L. (1988), On a proposed postulate of state-reduction, *Physics Letters A*, Vol. 139, pp. 1-4. De beschrijving van het gedachte-experiment wordt eveneens weergegeven in Albert, D. (1992), *o.c.*, pp. 100-111.

Een andere kritiek betreft het mechanisme dat verantwoordelijk is voor de spontane lokalisatie. In het model van GRW wordt niet gespecificeerd – behoudens dat de golffunctie moet worden vermenigvuldigd met een specifieke Gauss-functie – welk fysisch proces verantwoordelijk is voor zulk een spontane lokalisatie. Roger Penrose heeft daarentegen wel een mechanisme voorgesteld dat een spontane reductie kan veroorzaken.

4.2 Het model van Penrose: Reductie door zwaartekracht

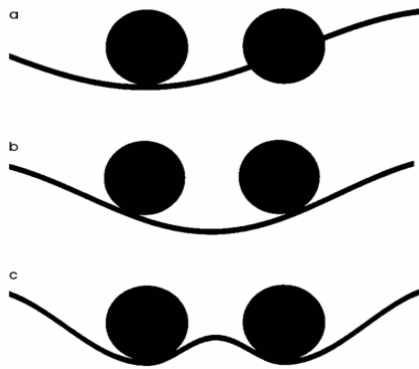
4.2.1 Beschrijving van het model van Penrose

Penrose is van mening dat wanneer de reductie van de golffunctie als een objectief-realistisch fysisch proces wordt beschouwd, de zwaartekracht hierbij een fundamentele rol moet spelen. Het is goed bekend dat de quantumtheorie niet in overeenstemming kan worden gebracht met de algemene relativiteitstheorie. Hoewel beide theorieën hun experimentele slagvaardigheid hebben bewezen, verwachten veel fysici dat bij unificatie één van de theorieën op een subtiele manier gewijzigd zal moeten worden. In tegenstelling tot veel van zijn collega's oppert Penrose dat het de quantumtheorie is die een modificatie vereist.¹¹⁸

De zwaartekracht wordt volgens de algemene relativiteitstheorie veroorzaakt door een kromming van de ruimtetijd. In de literatuur wordt dit meestal met een analogie gevisualiseerd door een rubberen doek waarop een zware bal wordt gelegd. Deze bal veroorzaakt een plooiing van het doek, zodat een veel kleinere bal in de plooiing op de bal zal rollen – net zoals objecten naar het aardoppervlak getrokken worden. Alle materie met massa veroorzaakt zulk een kromming van de ruimtetijd, ook quantumentiteiten.¹¹⁹ Maar wat gebeurt er met de kromming van de ruimtetijd wanneer een deeltje zich in een superpositie van twee gelokaliseerde toestanden bevindt?

¹¹⁸ Penrose, R. (1994), *o.c.*, p. 335. Voor de redenen waarom Penrose deze mening is toegedaan, zie Penrose, R. (1990), *o.c.*, hoofdstuk 7 en 8.

¹¹⁹ Fotonen dus niet, omdat dit massalozes deeltjes zijn.



Figuur 2.1.¹²⁰ (a) de kromming van de ruimtetijd indien slechts het linker deeltje een massa heeft
 (b) de kromming van de ruimtetijd indien de massa van het deeltje in het middelpunt van de twee mogelijke posities ligt
 (c) de kromming van de ruimtetijd indien beide deeltjes een massa hebben.

Volgens Penrose veroorzaakt een deeltje in superpositie van twee locaties een situatie als in (c). In superpositie bevindt de massa van het deeltje zich dus letterlijk op beide plaatsen en brengt op beide plaatsen een kromming van de ruimtetijd teweeg. Het deeltje veroorzaakt in superpositie twee verschillende ruimtetijdrommingen. Dit impliceert echter dat de onderliggende kromming van de ruimtetijd zich eveneens in superpositie bevindt.¹²¹

Penrose stelt zich dan de vraag of er een punt bestaat waarop deze twee krommingen voldoende van elkaar verschillen zodat er een reductie plaatsvindt tot een van de twee locaties. Hij denkt dat er een criterium bestaat dat bepaalt dat de superpositie van de kromming van de ruimtetijd instabiel wordt, waardoor de superpositie gereduceerd wordt. De splitsing van de kromming van de ruimtetijd door de superpositie moet volgens Penrose van de orde van de Planck-lengte zijn – 10^{-33}cm – om instabiel te zijn.¹²² Indien E beschouwd wordt als de energie die nodig is wanneer we de massa's in superpositie willen laten samenvallen in een gemeenschappelijk zwaartekrachtcentrum, speculeert Penrose dat de reductietijd van een geïsoleerd systeem van de orde $h/2\pi E$ is.¹²³

¹²⁰ Overgenomen uit Bruce, C. (2005), o.c., p. 202.

¹²¹ Penrose, R. (1994), o.c., p. 337.

¹²² Penrose, R. (1994), o.c., p. 337.

¹²³ Penrose, R. (1994), o.c., p. 339.

Voor een geïsoleerd deeltje in superpositie zal de verwachte reductietijd veel langer zijn dan die van een macroscopisch object. Penrose weet echter dat in een experimentele situatie een deeltje in superpositie de omgeving kan verstoren dat met het deeltje verstrengeld is, waardoor ook met de gevolgen voor de kromming van de ruimtetijd door die omgeving moet worden rekening gehouden:

Indeed, in almost any practical measuring process it would be very likely that large numbers of microscopic particles in the surrounding environment would be disturbed [...] Once there is a sufficient disturbance in the environment, according to the present ideas, reduction will rapidly *actually* take place in that environment – and it would be accompanied by reduction in any ‘measuring apparatus’ with which that environment is entangled.¹²⁴

4.2.2 Een theorie en geen interpretatie

Net zoals de veelwereldenbenadering gaat het bij de interpretatie van Penrose om een theorie, en niet om een interpretatie. Dit is evident, aangezien Penrose suggereert dat de Schrödingervergelijking een niet-lineaire aanpassing vereist zodat ook het objectieve reductieproces met behulp van deze vergelijking kan worden beschreven.¹²⁵ Penrose geeft echter toe dat een volwaardige theorie nog steeds ontbreekt en dat hij nog geen feitelijke dynamica van de toestandsreductie heeft ontwikkeld.¹²⁶ Desalniettemin heeft hij een voorstel gedaan om in de toekomst een actueel experiment uit te voeren waarin zijn reductiemechanisme aan een sluitende test onderworpen wordt.

Het gaat hier om het FELIX-voorstel.¹²⁷ De experimentele opstelling van dit voorstel wordt in figuur 2.2 geschetst. Het cruciale object is een minuscule spiegel M die in een superpositie van twee licht verschillende locaties geplaatst wordt. Deze superpositie wordt bewerkstelligd door een foton die vanuit een X-stralenbron L naar een half-doorlatende spiegel B gestuurd wordt. Een deel van de golf functie van het foton zal worden gereflecteerd, en een deel zal worden doorgelaten en tegen M botsen waardoor ook deze spiegel in superpositie wordt gebracht. Er wordt verondersteld dat de spiegel

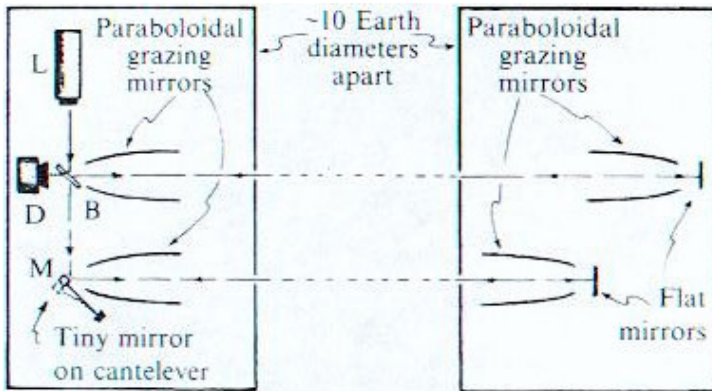
¹²⁴ Penrose, R. (1994), o.c., p. 342, oorspronkelijke cursivering

¹²⁵ In *The Road to Reality* noemt Penrose deze gewijzigde Schrödingervergelijking de *Schrödinger-Newton equation*, doordat deze een Newtoniaans zwaartekrachtsveld incorporeert. Penrose, R. (2003), *The Road to Reality*, Knopf Borzoi Books, p. 854.

¹²⁶ Om die reden noemt hij zijn voorstel “a ‘minimalist’ one”, Penrose, R.(2003), o.c., p. 855.

¹²⁷ FELIX staat voor *Free-orbit Experiment with Laser-Interferometry X-rays*. Een aantal technische vereisten voor het experiment laten we hier buiten beschouwing. Voor meer uitleg en aanpassingen van zijn voorstel, zie Penrose, R. (2003), o.c., pp. 856-860.

zich na 0,1 sec terug in haar normale positie bevindt. Intussen worden twee delen van de golffunctie naar een vlakke reflecterende spiegel gestuurd, waarbij de lengtes van de paden zodanig gekozen worden dat deze twee delen op hetzelfde moment B terug bereiken. Bovendien wordt de lengte van het pad van het doorgelaten deel van de golffunctie dusdanig bepaald dat het foton er 0,1 sec over doet om het pad heen en weer te doorkruisen. Door deze bepalingen wordt het fysisch proces van het foton precies omgekeerd, en zullen volgens de quantumtheorie beide gedeeltes in M met elkaar interfereren, waardoor het foton met zekerheid nooit detector D zal bereiken.



Figuur 2.1 Het FELIX-voorstel van Penrose¹²⁸

De theorie van Penrose voorspelt echter iets anders. De spiegel M zal zich 0,1 sec in superpositie bevinden, waarbij – volgens het reductiemechanisme door zwaartekracht – de toestand van M spontaan zal gereduceerd worden tot ‘verplaatst worden’ óf ‘niet verplaatst worden’. Aangezien de toestand van het foton verstrengeld is met die van M, zal vanaf het ogenblik dat de toestand van M gereduceerd wordt, ook de golffunctie van het foton ineenstorten. Het foton zal zich nu ofwel in het ene ofwel in het andere pad bevinden. Wanneer het foton B nu terug bereikt, zal het evenveel kans hebben om D als L te bereiken. De theorie van Penrose voorspelt dus in tegenstelling tot de quantumtheorie dat, bij herhaling van het experiment, in vijftig procent van de gevallen het foton in D zal aankomen.

Penrose beseft wel dat het mogelijk is dat zijn theorie door dit experiment gefalsifieerd wordt, en dat de quantumtheorie de zoveelste experimentele test doorstaat. Toch zou het hem enorm verwonderen mocht dit het geval zijn:

¹²⁸ Overgenomen uit Penrose, R. (2004), *o.c.*, p. 856.

My personal reaction to this would be considerable bewilderment, despite the fact that many physicists with whom I have discussed this issue have expressed the firm expectation that conventional quantum mechanics must again come through unscathed. My own bewilderment would arise primarily from a conviction that present-day quantum mechanics has no credible ontology, so that it must be seriously modified in order for the physics of the world to make sense.¹²⁹

4.2.3 Kritiek op de theorie van Penrose

De voornaamste kritiek op de theorie van Penrose is dat ze intrinsiek niet-lokaal is. Dit is natuurlijk een gevolg van het feit dat het reductieproces dat door de theorie van Penrose moet beschreven worden, een niet-lokaal proces is. Indien dit als een reëel fysisch proces wordt beschouwd, betreft dit een soort non-lokaliteit die een fundamentele aanpassing vereist van onze visie op de geometrie van de ruimtetijd. Penrose beseft dit wel degelijk, maar naar zijn mening hebben we nu eenmaal fundamenteel nieuwe theorie over de fysische realiteit nodig:

Any totally satisfactory scheme would, I believe, have to involve some very radical new ideas about the nature of space-time geometry, probably involving an essentially non-local description. One of the most compelling reasons for believing this comes from the EPR-type experiments, where an ‘observation’ at one end of the room can effect the simultaneous reduction of the state-vector at the other end. The construction of a fully objective theory of state-vector reduction which is consistent with the spirit of relativity is a profound challenge, since ‘simultaneity’ is a concept which is foreign to relativity. It is my opinion that our present picture of physical reality [...] is due or a grand shake up – even greater, perhaps, than that which has already been provided by present-day relativity and quantum mechanics.¹³⁰

Dit brengt ons bij een wetenschapsfilosofische kritiek op de theorie van Penrose. Want uit onvrede met de ontologische implicaties van de quantumtheorie, en dus vanuit metafysische overwegingen, pleit hij voor een fundamentele aanpassing van de quantumtheorie. De vraag kan gesteld worden of het wetenschappelijk verantwoord is om op basis van dit soort overwegingen te sleutelen aan één van de meest succesvolle theorieën uit de geschiedenis van de wetenschap.

¹²⁹ Penrose, R. (2003), *o.c.*, p. 860.

¹³⁰ Penrose, R. (1990), *o.c.*, p. 480.

5. Nabeschuwing

De drie benaderingen die in dit hoofdstuk aan bod zijn gekomen, verschillen fundamenteel van elkaar wat betreft de ontologische interpretatie van de golffunctie en de reductie ervan. Alle benaderingen hebben te kampen met specifieke problemen.

De Kopenhaagse benadering verleent aan de golffunctie van een systeem een probalistische interpretatie. Deze golffunctie stelt enkel onze kennis van de fysische realiteit voor, waardoor het normaal is dat deze golffunctie gereduceerd wordt van zodra een meting op het systeem wordt uitgevoerd, en onze kennis van het systeem gewijzigd wordt. Het probleem is dat de onbepaaldheid in de toestand van het systeem, die door Bohr als een ontologische bepaaldheid wordt beschouwd, slechts door een meting in bepaaldheid wordt omgezet. Meetinstrumenten hebben dus volgens deze benadering de eigenschap dat ze de toestand van het systeem reëel maken. Bovendien kan interferentie niet verklaard worden door een probalistische interpretatie van de golffunctie.

De veelwereldenbenadering geeft een realistische interpretatie aan de golffunctie, en verwerpt het Projectiepostulaat. Volgens deze benadering vindt er nooit een reductie van de golffunctie plaats, waardoor ze een multiversum beschrijft in plaats van een universum. Naast een nogal extravagante ontologie heeft de veelwereldeninterpretatie met een aantal technische problemen te kampen die haar weg naar een volwaardige theorie in de weg staan. Desalniettemin slaagt deze benadering erin de fundamentele raadsels van de quantummechanica goed te duiden. Door het verwerpen van het Projectiepostulaat, geeft ze een specifieke oplossing van het meetprobleem. Indien de evolutie alle quantummechanische systemen geleid worden door de lineaire Schrödingervergelijking, bestaan superposities van macroscopische toestanden wel degelijk. Een dergelijke macroscopische superpositie doet zich echter niet voor in één universum, maar elke toestand komt in een verschillend universum voor.

Volgens de benadering van Penrose maken superposities van verschillende toestanden ook deel uit van de fysische realiteit. Deze superposities doen zich echter in één universum voor. Ten gevolge van zijn reductiemechanisme nemen we echter nooit macroscopische superposities waar. Het voornaamste probleem is dat zulk een reductie intrinsiek niet-lokaal is. Penrose voelt zich dan ook genoodzaakt om naar een nieuwe theorie te zoeken die ons een fundamenteel nieuw beeld zal geven van de fysische werkelijkheid.

HOOFDSTUK 3

NUL-INTERACTIEMETINGEN

IN DE

QUANTUMMECHANICA

1. Inleiding

In dit hoofdstuk analyseren we de paradoxale effecten van nul-interactiemetingen. Dit zijn metingen waarbij een object in een gebied gelokaliseerd wordt zonder een signaal te sturen naar of te ontvangen van uit dit gebied. Zoals we zullen zien, zijn nul-interactiemetingen gebaseerd op golfdeeltjesdualiteit. De resultaten van nul-interactiemetingen zijn dan ook op geen enkele manier met de ideeën van de klassieke natuurkunde verklaarbaar. Maar wat deze metingen vanuit wetenschappelijk en filosofisch oogpunt zo interessant maakt, is dat niet alle interpretaties van de quantumtheorie de paradoxen ervan even goed kunnen duiden. De ontologische interpretatie van nul-interactiemetingen vormen dus een middel om bepaalde benaderingen meer geloofwaardigheid te verlenen.

In dit hoofdstuk zullen we de nul-interactiemetingen van Elitzur en Vaidman uitgebreid bespreken. Ook de meer efficiënte methodes komen aan bod. Vervolgens wijzen we op enkele aspecten van nul-interactiemetingen, die de filosofische relevantie van zulke metingen aantonen. Hierna gaan we na in hoeverre de interpretaties erin slagen de nul-interactiemetingen te duiden. We beginnen dit hoofdstuk met een bespreking van *negative-result measurements*.

2. Renningers nul-interactiemetingen: *negative-result measurements*

Hoewel de *negative-result measurements* van Renninger minder paradoxaal zijn dan de nul-interactie metingen van Elitzur en Vaidman (EV), verdienen ze toch onze aandacht in deze uiteenzetting. Enerzijds, omdat het wel degelijk gaat om nul-interactiemetingen. Anderzijds, omdat we dan de verschillen met de nul-interactiemetingen van Elitzur en Vaidman beter kunnen belichten. Op die manier komen de paradoxen van de EV-nul-interactiemetingen beter tot hun recht. We zullen immers zien dat, in tegenstelling tot de nul-interactiemetingen van EV, de *negative-result measurements* geen probleem vormen voor de Kopenhaagse interpretatie van de quantumtheorie.

2.1 Beschrijving van het gedachte-experiment van Renninger

Renninger beschreef in 1960 een gedachte-experiment dat een bijzonder kenmerk van het reductieproces blootlegde. Hij beschouwde immers een situatie waarbij het uitblijven van een detectie een reductie van de toestandsvector veroorzaakt. Vandaar dat men dit *negative-result measurements* noemt, metingen waarbij informatie wordt gewonnen over een systeem door de afwezigheid van een detectie.¹³¹

We beelden ons een bron in die een enkel deeltje uitstoot in een willekeurige richting. Deze bron bevindt zich in het midden van een lege bol, waarvan de oppervlakte aan de binnenkant bedekt is met een materiaal dat een flits produceert op het punt waar het deeltje gedetecteerd wordt. De quantumtheorie zegt dat de toestand van het deeltje zal worden beschreven door een golffunctie die zich in alle richtingen rond de bron verspreidt. Wanneer het deeltje de binnenste oppervlakte van de bol bereikt, zal de golffunctie gereduceerd worden tot het punt waar de flits verschijnt.

Vervolgens veronderstellen we dat halverwege tussen de bron en de bol er een hemisferisch schild geplaatst wordt, dat precies de helft van de weg van de bron tot de bol blokkeert. Ook dit schild wordt bedekt met een materiaal dat een flits produceert van zodra er een deeltje tegen botst. We stellen ons de vraag wat er gebeurt met de golffunctie van een deeltje in zulk een situatie.

In deze situatie heeft het deeltje even veel kans om de binnenste sfeer als de buitenste sfeer te bereiken, namelijk vijftig procent. We wachten lang genoeg om te kunnen waarnemen of het deeltje al dan niet de binnenste sfeer heeft bereikt, maar kort genoeg om al dan niet een flits te zien op de buitenste sfeer. Wanneer we op dat moment nog geen flits hebben waargenomen op de binnenste sfeer, zal de golffunctie van het deeltje gereduceerd worden tot een nieuwe golffunctie van een deeltje dat met honderd procent zekerheid de buitenste sfeer zal bereiken. Dit gedachte-experiment toont dus aan dat er absoluut geen registratie door een meetinstrument moet plaatsvinden om de golffunctie te reduceren. Een loutere niet-registratie heeft kennelijk hetzelfde reductie-effect op de golffunctie als een registratie.

¹³¹ We beschrijven in wat volgt de licht gewijzigde versie van Renningers gedachte-experiment door Gribbin in Gribbin, J. (1999), *o.c.*, p. 143-144.

2.2 De Kopenhaagse interpretatie en *negative-result measurements*

De Kopenhaagse interpretatie kan ons inzien door twee van haar kenmerken de *negative-result measurements* verklaren. Ten eerste wordt sinds het EPR-gedachte-experiment aan attributen van een quantummechanisch systeem een relationeel-contextuele betekenis gegeven. Ten tweede wordt aan de golffunctie een anti-realistische interpretatie gegeven. De golffunctie stelt immers volgens de Kopenhaagse interpretatie niet de realiteit maar onze kennis over deze realiteit voor.

In het vorige hoofdstuk hebben we gezien dat Bohr ten gevolge van de EPR-paradox zijn interactionele benadering van contextualiteit verving door een relationele benadering. Door deze verschuiving moet geen interactie plaatsvinden tussen systeem en meetinstrument om de golffunctie van het systeem te reduceren. Eigenlijk kan men de nul-interactiemetingen in het gedachte-experiment van hetzelfde type beschouwen als de metingen in de EPR-situatie. De indirecte meting van de eigenschappen van het niet gemeten deeltje geschiedt immers eveneens zonder interactie tussen het meetinstrument en het deeltje, en kunnen dus gezien worden als ‘nul-interactiemetingen’.¹³²

De tweede reden waarom de Kopenhaagse interpretatie het gedachte-experiment van Renninger volledig kan verklaren, is fundamenteeler van aard. Want hoewel *negative-result measurements* paradoxaal blijven binnen het formalisme van de quantumtheorie,¹³³ zal een interpretatie die de golffunctie niet beschouwt als een voorstelling van de realiteit maar van onze *kennis* over deze realiteit, het paradoxale van de situatie volledig kunnen vermijden. Immers, *negative result measurements* voorzien ons van een zekere informatie over een systeem die onze kennis van dat systeem doet veranderen. Aangezien deze kennis wordt voorgesteld door de golffunctie, is het evident dat die zal ineenstorten. De enige reden waarom de golffunctie is ineengestort, is dus dat onze kennis over het systeem gewijzigd is.

¹³² Elitzur, A. en Vaidman, L. (1993), Quantum mechanical interaction-free measurements, arXiv:hep-th/9305002 v2 05may93, p. 2.

¹³³ Het vijfde principe van het formalisme – het Projectiepostulaat – stelt immers dat bij een meting de golffunctie gereduceerd wordt. Bij *negative-result measurements* kan de golffunctie ook gereduceerd worden bij ontstentenis van een meting.

De *negative-result measurements* zijn intuïtief gemakkelijk te begrijpen, aangezien ze een klassieke tegenhanger hebben. Veronderstel dat we met zekerheid weten dat een object zich ofwel in doos A ofwel in doos B bevindt. We openen doos A, en zien dat ze leeg is. Hieruit kunnen we met zekerheid afleiden dat het object zich in doos B bevindt. Net als in deze situatie worden *negative-result measurements* gekarakteriseerd door de voorgaande informatie waarover we beschikken. We weten dat het deeltje zich in de bol bevindt, net zoals we weten dat het object in één van de dozen te vinden is. In de EPR-situatie weten we dat de deeltjes verstrengeld zijn, en dat ze een perfecte anticorrelatie vertonen. De nul-interactiemetingen van EV hebben echter geen enkele klassieke tegenhanger, en zijn daarom veel meer paradoxaal. Ze geven immers een bevestigend antwoord op volgende vraag:

Is it possible to obtain knowledge about the existence of an object in a certain place using interaction-free measurements *without any prior information* about the object?¹³⁴

Er is nog een ander verschilpunt met de nul-interactiemetingen van EV. *Negative-result measurements* veranderen de golffunctie, en dus de toestand van het object zonder interactie. EV hebben echter een methode gevonden om informatie te verkrijgen over dat object zonder de toestand ervan te veranderen.¹³⁵

3. De nul-interactiemetingen van Elitzur en Vaidman

In 1962 opperde de natuurkundige Dennis Gabor, uitvinder van de holografie, de schijnbaar onbenullige bewering dat geen enkele waarneming kan geschieden zonder dat een foton of een ander deeltje tegen het waargenomen object botst. EV ontwikkelden echter een gedachte-experiment waarmee deze bewering weerlegden.

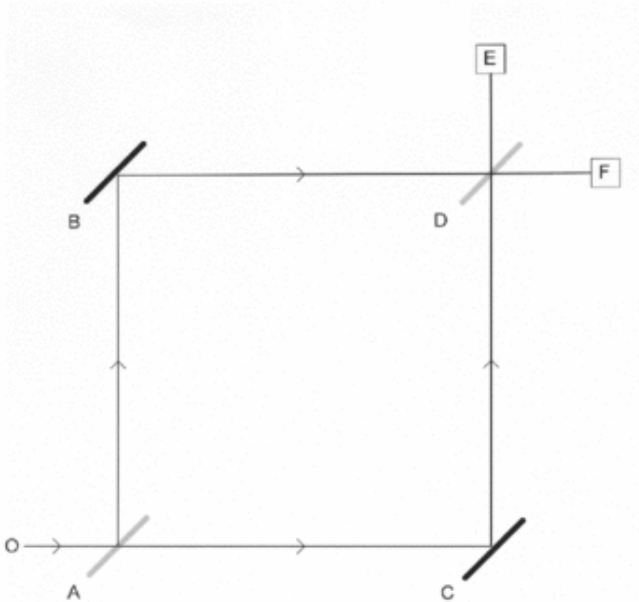
3.1 Beschrijving van het gedachte-experiment van Elitzur en Vaidman

De methode van EV om nul-interactiemetingen uit te voeren is gebaseerd op de Mach-Zehnder interferometer. Dit toestel toont de golfdeeltjesdualiteit van quantumentiteiten nog duidelijker aan dan het tweespletenexperiment. De interferometer bestaat uit twee halfdoorlatende spiegels (A en D in figuur 3.1) en twee perfecte spiegels (B en C). In

¹³⁴ Elitzur, A. en Vaidman, L. (1993), o.c., p. 3, oorspronkelijke cursivering.

¹³⁵ Vaidman, L. (2001a), The Paradoxes of the Interaction-free Measurements, arXiv:quant-ph/0102049 v1 09feb2001, p.2.

principe werkt de interferometer met alle quantumentiteiten, maar om slechts één deeltje door het apparaat te sturen moet men gebruik maken van een fotonenbron.¹³⁶ Eén enkel foton vertrekt vanuit de bron O naar de eerste halfdoorlatende spiegel. Een halfdoorlatende spiegel laat de helft van het licht door, en reflecteert de helft ervan. Het foton zal dan evenveel kans hebben om te worden weerkaatst naar B als te worden doorgelaten naar C, namelijk vijftig procent.



Figuur 3.1 *De Mach-Zehnder interferometer*¹³⁷

We veronderstellen eerst dat het foton zich als een klassiek deeltje zal gedragen. Het foton zal dan ofwel worden weerkaatst en het traject ABD volgen, ofwel zal het worden doorgelaten en het traject ACD volgen. In beide gevallen zal het foton aan de tweede halfdoorlatende spiegel evenveel kans hebben om te worden gereflecteerd als te worden doorgelaten. De kans dat het foton detector E bereikt is even groot als de kans dat het detector F bereikt. We weten echter dat een foton een quantumentiteit is, en dus ook golfgedrag vertoont. Een deel van de golf functie van het foton zal in A gereflecteerd worden, en een deel zal worden doorgelaten. De twee takken van de golf functie zullen in D terug samenkomen, en er zal interferentie optreden.

¹³⁶ Elitzur, A. en Vaidman, L. (1993), o.c., p. 4.

¹³⁷ Overgenomen uit Bruce, C. (2004), o.c., p. 141.

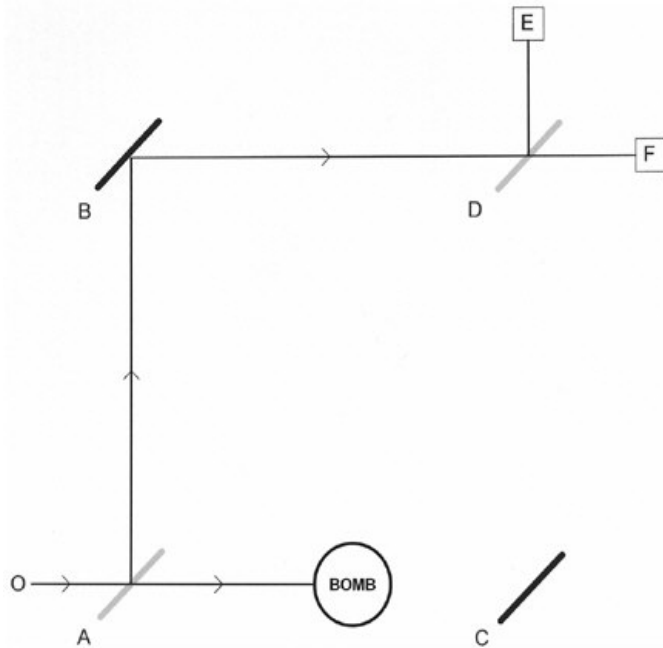
We passen de geometrie van de opstelling aan, zodat we deze interferentie-effecten kunnen aantonen. De trajecten BD en AC laten we exact even lang zijn. We zien onder deze omstandigheden dat er tussen de twee takken destructieve interferentie optreedt, zodat het foton met zekerheid detector F zal bereiken.¹³⁸

EV zagen in dat zulk een interferentie een aanwijzing vormt dat geen enkel object zich op één van de trajecten van de interferometer bevindt. Net zoals in het tweespletenexperiment het interferentiepatroon verdwijnt wanneer we aan één van de spleten een detector plaatsen, zal geen interferentie meer optreden wanneer één van de armen van de interferometer door een object geblokkeerd wordt. Uit het al dan niet optreden van interferentie zal men dus kunnen afleiden of er een object aanwezig is in de interferometer. Wanneer in de situatie hierboven beschreven detector E een foton ontvangt, en er dus geen interferentie is opgetreden, weten we dat in het traject ACDF een object aanwezig is.

Wanneer een object aanwezig is in het traject ACDF, zal dat object de fotonen absorberen die in A zijn doorgelaten. Elitzur en Vaidman zijn afkomstig uit Israël, en misschien zijn ze door de precaire politieke situatie in hun land geïnteresseerd in bomdetectie. Om de situatie enigszins te dramatiseren, veronderstellen ze dat het object een ontsteker is, die verbonden is met een ultragevoelige bom. Elke interactie, zelfs met maar één foton, doet de bom ontploffen. EV vragen zich af of het mogelijk is om deze bom te lokaliseren zonder een explosie te veroorzaken.

De interferometer wordt op zulk een manier geplaatst dat het traject AC door een gebied gaat waar de bom zich zou kunnen situeren (zie figuur 3.2). Eén enkel foton wordt door het apparaat gestuurd. Als er zich geen bom in AC bevindt, dan treedt er destructieve interferentie op en wordt het foton in detector F geregistreerd. Maar wat gebeurt er als er wel een bom aanwezig is?

¹³⁸ Voor een bevattelijke uitleg over hoe deze destructieve interferentie zich manifesteert, zie Zeilinger, A. (2005), *Toeval!*, Veen Magazines, pp. 179-183.



Figuur 3.2 *Het gedachte-experiment van Elitzur en Vaidman.*¹³⁹

Als er in AC een bom aanwezig is, dan bestaat er vijftig procent kans dat het foton in A wordt doorgelaten en de bom doet ontploffen. We hebben de bom wel gelokaliseerd, maar met een explosie. Onze doelstelling is dus mislukt. Maar er is eveneens vijftig procent kans dat het foton in A gereflecteerd wordt en D bereikt. Aangezien één van de armen van de interferometer geblokkeerd wordt, zal er geen interferentie optreden. Het foton heeft nu evenveel kans om in E te worden geregistreerd als in F. Als het foton detector E heeft bereikt, weten we dat er een bom aanwezig is in de interferometer. We hebben de ultragevoelige bom gelokaliseerd zonder deze bom te doen ontploffen.

De methode is echter niet bijster efficiënt: er bestaat vijftig procent kans dat de bom explodeert. Indien de bom niet ontploft, heeft het foton ook slechts één kans op twee om detector F te bereiken. We hebben dus slechts één kans op vier om de bom te detecteren zonder ontploffing. De kans dat de bom ontploft is met andere woorden twee maal zo groot als de kans dat we de bom zonder explosie detecteren. Dit doet natuurlijk geen afbreuk aan het raadselachtige aspect van deze realisatie. Blijkbaar klopt de triviale bewering van Dennis Gabor niet: we hebben de bom waargenomen zonder een foton er tegen te laten botsen. De klassieke natuurkunde schiet eens te meer tekort om dit

¹³⁹ Overgenomen uit Bruce, C. (2004), *o.c.*, p. 142.

verschijnsel te verklaren. Bovendien werd de voorspelling dat nul-interactiemetingen in de quantummechanica mogelijk zijn experimenteel geverifieerd. Kort na de introductie van hun gedachte-experiment werden deze nul-interactiemetingen immers experimenteel gerealiseerd.^{140,141}

3.2 Formalisme van het gedachte-experiment van EV

Het formalisme van de quantumtheorie kan zeer gemakkelijk worden toegepast op het gedachte-experiment van EV. We veronderstellen dat de toestand van het foton dat zich in de x-richting voortbeweegt, wordt voorgesteld door $|x\rangle$. De toestand van het foton dat in de y-richting vliegt, wordt door $|y\rangle$ weergegeven.¹⁴² Elke keer het foton gereflecteerd wordt, zal de fase van haar golf functie met $\pi/2$ gewijzigd worden. Hierdoor zal de corresponderende toestand bij reflectie telkens met de factor ‘i’ vermenigvuldigd worden.¹⁴³

De perfecte spiegels B en C zullen de toestand dus als volgt wijzigen:

$$|x\rangle \rightarrow i|y\rangle, |y\rangle \rightarrow i|x\rangle$$

De halfdoorlatende spiegels A en D zullen de toestand als volgt wijzigen:

$$|x\rangle \rightarrow 1/\sqrt{2}(|x\rangle + i|y\rangle)$$

$$|y\rangle \rightarrow 1/\sqrt{2}(|y\rangle + i|x\rangle)$$

We kennen nu de regels, zodat we de evolutie van de toestand van het foton dat uit O vertrekt kunnen volgen. Deze begintoestand is $|x\rangle$ aangezien het foton in horizontale toestand vliegt. Indien er zich geen object in de interferometer bevindt, zal de complete evolutie van $|x\rangle$ gegeven worden door de volgende stappen:

¹⁴⁰ Kwiat, P., Weinfurter, H., Herzog, T., Zeilinger, A., and Kasevich, M. (1995), Interaction-free quantum measurements, *Physical Review Letters*, Vol. 74, pp. 4763-4766.

¹⁴¹ du Marchie Van Voorthuysen, E.H. (1997), Realization of an interaction-free measurement of the presence of an object in a light beam, *American Journal Physics*, Vol. 64, N°12, pp. 1504-1507.

¹⁴² De x- en y-richting zijn respectievelijk de horizontale en verticale richting, zoals in een Euclidisch xy-assenstelsel.

¹⁴³ Penrose, R. (1994), *o.c.*, p. 261.

$$|x\rangle \rightarrow 1/\sqrt{2}(|x\rangle + i|y\rangle) \rightarrow 1/\sqrt{2}(i|y\rangle - |x\rangle) \rightarrow 1/2(i|y\rangle - |x\rangle) - 1/2(|x\rangle + i|y\rangle) = -|x\rangle$$

Het foton zal de interferometer dus in de x-richting verlaten en met zekerheid detector F bereiken. Indien er echter een bom aanwezig is tussen A en C, dan zal de evolutie van het foton worden gegeven door:

$$|x\rangle \rightarrow 1/\sqrt{2}(|x\rangle + i|y\rangle) \rightarrow 1/\sqrt{2}|Explosie\rangle - 1/\sqrt{2}|x\rangle \rightarrow 1/\sqrt{2}|Explosie\rangle - 1/2(|x\rangle + i|y\rangle) = 1/\sqrt{2}|Explosie\rangle - 1/2|x\rangle - 1/2i|y\rangle,$$

waarbij $|Explosie\rangle$ de toestand van het foton bij explosie voorstelt. Volgens het formalisme zullen de detectors deze toestand reduceren:

$$1/\sqrt{2}|Explosie\rangle - 1/2|x\rangle - 1/2i|y\rangle \rightarrow \begin{array}{ll} |y\rangle, & \text{E registreert, kans} = 1/4 \\ |x\rangle, & \text{F registreert, kans} = 1/4 \\ |Explosie\rangle & \text{kans} = 1/2 \end{array}$$

We zien dus dat enkel wanneer de bom aanwezig is, het foton detector E kan bereiken. De registratie door detector E bezorgt ons bijgevolg de informatie dat de bom zich in de interferometer bevindt. Het valt echter op dat de methode weinig efficiënt is: als de bom aanwezig is, hebben we slechts 25 procent deze zonder explosie te ontdekken. Nadat EV hun artikel publiceerden, werden echter veel meer economische procedures ontwikkeld.

4. Uiterst efficiënte nul-interactiemetingen

Omdat de werkwijze van EV nogal oneconomisch was, werden later efficiëntere methodes bedacht. Kwiat et al. kunnen in hun gedachte-experiment via het quantum Zeno-effect de efficiëntiegraad theoretisch verhogen tot 100 procent.¹⁴⁴ Paul en Pavicic bedachten een zeer efficiënte methode die bovendien gemakkelijk experimenteel te realiseren is.¹⁴⁵

¹⁴⁴ Kwiat et al. (1999), High-efficiency quantum interrogation measurements via the quantum Zeno effect, arXiv: quant-ph/9909083 v1 27 sept 1999

¹⁴⁵ Paul, H. en Pavicic, Nonclassical interaction-free detection of objects in a monolithic total-internal-reflection resonator, arXiv:quant-ph/9908023 v1 5 Aug 1999.

4.1 Het gedachte-experiment van Kwiat et al.

Kwiat et al. ontwikkelden in hun gedachte-experiment een meer economische methode om ultragevoelige bommen te detecteren. Deze methode kan beschouwd worden als een mengvorm van de EV-nul-interactiemeting en het quantum Zeno-effect.

4.1.1 Het quantum-Zeno-effect

Het quantum Zeno-effect is een paradoxale implicatie van de impact van metingen op een quantumstelsel. Door een quantumstelsel herhaaldelijk aan eenzelfde meting te onderwerpen, kunnen we ten gevolge van de reductie van de toestand die met een meting gepaard gaat, verhinderen dat de toestand van het systeem verder evolueert.

Een simpel voorbeeld van dit effect maakt gebruik van een karakteristiek kenmerk van licht: polarisatie.¹⁴⁶ Polarisatie is de richting waarin lichtgolven oscilleren. Licht dat bijvoorbeeld van een gloeilamp of de zon komt, is niet gepolariseerd. Dat wil niet zeggen dat dit licht niet trilt, maar dat het in alle richtingen trilt. Omdat licht loodrecht trilt op de voortplantingsrichting, en het er maar vanaf hangt hoe deze richting genoemd wordt (x-, y-, of z-richting), wordt polarisatie vaak aangeduid met horizontale en verticale polarisatie. Wanneer horizontaal gepolariseerd licht door een verticale polarisatiefilter wordt gestuurd, zal het helemaal worden geabsorbeerd. Verticaal gepolariseerd licht daarentegen wordt helemaal doorgelaten. Indien licht tussen deze twee extremen gepolariseerd is, zal een deel van het licht worden doorgelaten, en een deel geabsorbeerd.

Wat gebeurt er indien we één afzonderlijk foton beschouwen? Een horizontaal gepolariseerd foton zal natuurlijk geabsorbeerd worden, en een verticaal foton zal worden doorgelaten. Een foton dat een polarisatie heeft tussen deze twee extremen, zal bij een horizontale polarisatiefilter een kans hebben om geabsorbeerd te worden. Deze kans is afhankelijk van de relatieve polarisatiehoek α ten opzichte van de horizontale polarisatie. Mathematisch bedraagt deze kans $\sin^2\alpha$. Indien het foton niet door de filter geabsorbeerd wordt, zal het foton na het verlaten van deze filter horizontaal gepolariseerd zijn.

¹⁴⁶ Kwiat, P., Weinfurter, H. en Zeilinger, A. (1996), Quantum Seeing in the Dark, *Scientific American*, November 1996, pp. 52-58.

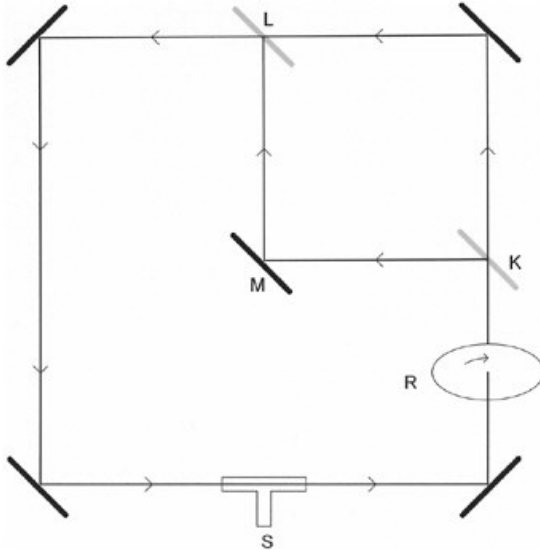
We beschouwen nu een volledig horizontaal gepolariseerd foton dat 90 polarisatorotors ontmoet die telkens de polarisatierichting van het foton wijzigen met 1 graad in wijzerzin. Indien dit foton na 90 rotors door een horizontale polarisatiefilter wordt gestuurd, zal het met zekerheid worden geabsorbeerd. Na 90 rotors is het foton immers verticaal gepolariseerd. Wanneer we echter na elke rotor een horizontale polarisatiefilter plaatsen, bestaat er een grote kans dat het foton na 90 rotors door de horizontale polarisatiefilter zal worden doorgelaten. Na elke rotor bedraagt de kans dat het foton door de filter zal worden geabsorbeerd niet meer dan 1 op 3.300 ($= \sin^2 1\text{graad}$). Het foton heeft dus meer dan 98,6 % ($= (\cos^2 1\text{graad})^{90}$) kans om de tocht te overleven. In een limietsituatie kunnen we deze kans tot 100% vergroten door te werken met een oneindig aantal polarisatiefilters en rotoren die de polarisatie van het foton met een oneindig kleine hoek wijzigen. Dit fenomeen wordt het quantum Zeno-effect genoemd. Door een repetitieve meting met polarisatiefilters hebben we verhinderd dat de polarisatie van het foton kon evolueren.

4.1.2 Beschrijving van het gedachte-experiment

Laten we nu de bommeldetector van Kwiat et al. introduceren. We zullen zien dat Kwiat et al. in hun methode het optreden van het quantum Zeno-effect als een aanwijzing zullen beschouwen voor de aanwezigheid van een bom. Hun toestel bestaat uit een schakelaar S waarmee een verticaal gepolariseerd foton in het traject kan worden gestuurd en er op een willekeurig moment kan worden uitgehaald. R is een polarisatorotor die de polarisatie wijzigt van het foton met één graad in wijzerzin. K en L zijn een mengvorm tussen halfdoorlatende spiegels en polarisatiefilters. Ze laten een verticaal gepolariseerd foton, en weerkaatsen een horizontaal gepolariseerd foton.

We gaan eerst na wat er gebeurt indien er zich geen obstakel in het traject KML bevindt (zie figuur 3.3). Wanneer we een verticaal gepolariseerd foton via S het toestel insturen, zal de polarisatie ervan na R één graad in wijzerzin gewijzigd zijn. Wanneer we het foton in termen van een golf beschouwen, kunnen we zeggen dat de horizontaal gepolariseerde component van de golf in K wordt weerkaatst, en de verticaal gepolariseerde component wordt doorgelaten. Beide golfcomponenten worden via de perfecte spiegels terug samengebracht in L, waar door interferentie de polarisatie van het foton terug dezelfde is als net na R. Wanneer we het foton als een deeltje beschouwen, kunnen we zeggen dat de kans dat het in K weerkaatst wordt 1 op 3.300 is ($= \sin^2 1\text{graad}$). Indien er dus geen

obstakel aanwezig is, blijft de polarisatie van het foton na L ongewijzigd, en zal het foton na 90 circulaties horizontaal gepolariseerd zijn. Er is dus geen quantum Zeno-effect opgetreden.



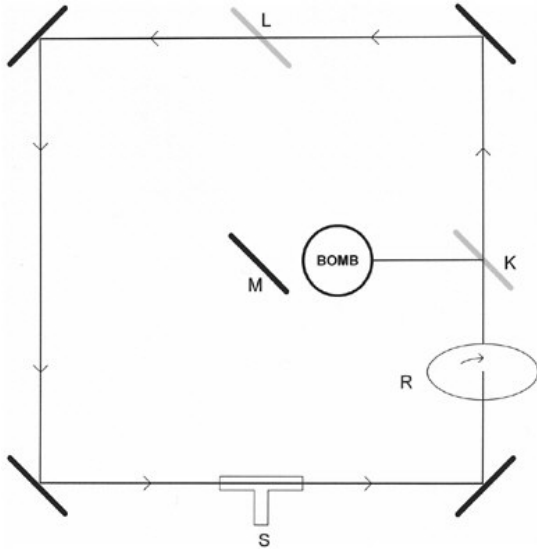
Figuur 3.3 De methode van Kwiat et al.¹⁴⁷

We beschouwen nu de situatie waarin een bom aanwezig is tussen K en M, zoals weergegeven in figuur 3.4. Door deze bom zal de horizontaal gepolariseerde component van het foton geabsorbeerd worden, waardoor het nooit L kan bereiken. Er treedt in L dan ook geen interferentie op, waardoor enkel de verticaal gepolariseerde component van het foton blijft bestaan. Dit proces wordt telkens herhaald. De polarisatie van het foton ondergaat in R een wijziging van één graad, die dan weer in K geneutraliseerd wordt, en zo blijft in L. Na 90 circulaties zal het foton dus nog steeds verticaal gepolariseerd zijn. Er is met andere woorden een quantum Zeno-effect opgetreden. We weten dan dat er een bom aanwezig is.

Beschouwd als een deeltje heeft het foton telkens slechts 1 kans op 3.300 om gereflecteerd te worden, en de bom te doen ontploffen. Na 90 circulaties bedraagt deze kans ongeveer 1 op 37. Kwiat et al. hebben dus een methode gevonden om op uitermate efficiënte wijze een ultragevoelige bom te vinden. Indien er een bom aanwezig is, is de kans dat we hem vinden 36 maal zo groot als de kans dat we hem doen ontploffen. Bovendien kan deze efficiëntie in principe naar believen vergroot worden. We laten dan

¹⁴⁷ Overgenomen uit Bruce, C. (2004), *o.c.*, p. 145.

de rotor de polarisatie van het foton met een kleinere hoek wijzigen, en laten het foton overeenkomstig meer circulaties afleggen. Hoe klein de hoek echter ook is, er bestaat steeds een minieme kans dat het foton in K naar de bom weerkaatst zal worden. Om die reden kan de efficiëntie van de interactievrije bommeldetector nooit honderd procent bedragen.¹⁴⁸ De methode van Kwiat et al. werd in 1998 experimenteel gerealiseerd.¹⁴⁹



Figuur 3.4 De bommeldetector van Zeilinger et al.¹⁵⁰

4.2 Het gedachte-experiment van Paul en Pavicic

Paul en Pavicic gebruikten in hun gedachte-experiment¹⁵¹ een *monolithic total-internal-reflection resonator* (MOTIRR) (zie figuur 3.5).¹⁵² Dit toestel uit transparant materiaal heeft de eigenschap om licht eendeloos te doen circuleren. Indien de twee driehoekige prisma's worden weggehaald, zal het licht dat zich in de resonator bevindt niet kunnen

¹⁴⁸ Theoretisch gezien kan er wel een efficiëntiegraad van honderd procent bereikt worden. Wiskundig kunnen we immers een limiet nemen van de wijziging van de polarisatiehoek naar nul, en een limiet van het aantal rotaties naar oneindig. Door middel van wiskundige regels met betrekking tot limietberekening, bekomen we dan een efficiëntiegraad van honderd procent.

¹⁴⁹ Kwiat, P., White, A. G., Mitchell, J. R., Nairz, O., Weihs, G., Weinfurter, H. en Zeilinger, A. (1999), High-efficiency quantum interrogation measurements via the quantum Zeno effect, *Physical Review Letters*, Vol. 83, pp. 4725-4728.

¹⁵⁰ Overgenomen uit Bruce, C. (2004), *o.c.*, p. 146.

¹⁵¹ Eigenlijk was dit geen gedachte-experiment in de strikte zin van het woord, maar een voorstel voor een reëel experiment van een zeer efficiënte nul-interactiemeting.

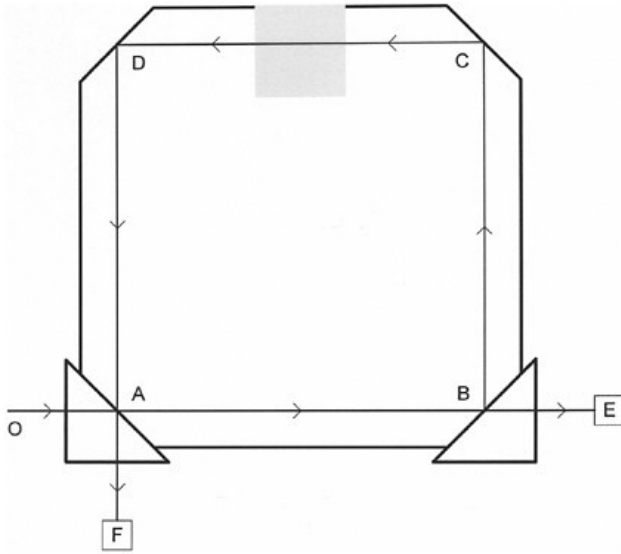
¹⁵² Wij baseren ons op de uiteenzetting van Bruce, C. (2004), *o.c.*, pp. 147-151.

ontsnappen. De brekingsindex van de MOTIRR moet wel groot genoeg zijn om de totale interne reflectie op punten A, B, C, en D te verwezenlijken.¹⁵³

Indien we de prisma's daarentegen op zulk een manier vestigen dat ze bijna de MOTIRR op punten A en B raken, dan zal de totale interne reflectie worden verbroken. Wanneer een foton herhaaldelijk rondgaat, zal het een kleine kans hebben om op één van deze punten uit de MOTIRR te ontsnappen. We hebben door de constructie echter eveneens een manier gevonden om fotonen via O in de MOTIRR te introduceren. Door de afstand tussen de prisma's en de MOTIRR aan te passen, kunnen we de kans dat een foton in A wordt weerkaatst naar F verhogen tot *bijna* honderd procent (bijvoorbeeld 99,9%). Het foton dat toch de MOTIRR binnenraakt zal na een paar honderd rondes naar E of F ontsnappen.

We hebben echter geen rekening gehouden met de golfnatuur van licht. Veronderstel dat we via O met een laser een continue lichtstraal het toestel trachten in te sturen. Het meeste licht wordt in A gereflecteerd naar F, terwijl slechts een minieme fractie van het licht (bijvoorbeeld 0,1%) de MOTIRR zal binnenkomen en na reflectie via A,B,C, en D weer A zal bereiken. Door het golfkarakter krijgt dat binnengekomen licht nu de kans te interfereren met licht dat later via O voor het eerst A bereikt. Door de lengtes van de trajecten juist in te stellen, kunnen we een constructieve interferentie veroorzaken, zodat steeds meer licht de MOTIRR binnenkomt in A en steeds minder licht via O weerkaatst wordt of via D wordt doorgelaten naar F. De MOTIRR ontvangt elke ronde steeds meer licht, dat uiteindelijk uit het toestel naar E zal ontsnappen.

¹⁵³ Voor alle duidelijkheid moet worden opgemerkt dat een foton niet voor altijd rondjes zal trekken, aangezien de MOTIRR nooit perfect transparant kan gemaakt worden. Desalniettemin is het perfect mogelijk een foton duizenden rondjes in het circuit blijft.



Figuur 3.5 De monolithic total-internal-reflection resonator (MOTIRR) met twee prisma's¹⁵⁴

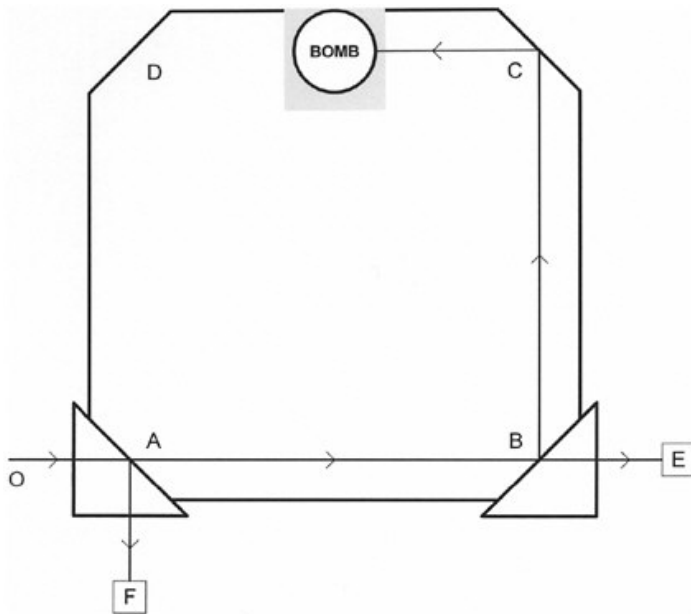
Maar wat gebeurt er indien we een individueel foton beschouwen? Aangezien de golflengte van een foton vele ordes kleiner is dan het traject rond de MOTIRR, zou men denken dat het niet meer met zichzelf kan interfereren. Er treedt echter wel degelijk interferentie op. Door de loutere mogelijkheid om de MOTIRR binnen te raken, zal de kans dat het foton het toestel wordt binnengezogen ontzettend veel groter worden dan de kans dat het naar F weerkaatst wordt.

We kunnen nu al voorspellen wat er zal gebeuren als er een bom wordt geplaatst in de MOTIRR. Er zal geen interferentie meer optreden en een foton zal bijna zeker naar F weerkaatst worden. Indien we boven op de MOTIRR een bom plaatsen in een transparante vloeistof met dezelfde brekingsindex als het materiaal van de resonator, dan zal het foton zich als een deeltje gedragen en in A weerkaatst worden. Als de bom toch niet aanwezig is, dan zal het foton bijna zeker de MOTIRR binnengeraken. Alweer zal de loutere mogelijkheid om het toestel te worden binnengezogen, ervoor zorgen dat het foton zich als een golf gedraagt.

De methode van Paul en Pavicic is niet alleen een gedachte-experiment dat op een zeer vreemde manier de mogelijkheid van nul-interactiemetingen aantoonst. Het is bovendien

¹⁵⁴ Overgenomen uit Bruce, C. (2004), *o.c.*, p. 149.

gemakkelijk implementeerbaar. Inderdaad, hun methode werd in een laboratorium experimenteel gerealiseerd door Tsegaye et al. (1999).¹⁵⁵



Figuur 3.6 De bommeldetector van Paul en Pavicic¹⁵⁶

5. Filosofische relevantie van nul-interactiemetingen

We beschouwen nul-interactiemetingen om drie redenen filosofisch relevant. Ten eerste zijn deze metingen een manifestatie van quantummechanische non-lokaliteit. Ten tweede vormen nul-interactiemetingen een bewijs dat *counterfactuals*¹⁵⁷ fysische effecten kunnen veroorzaken. Ten derde hebben ze tot een nieuwe visie op quantummechanische metingen geleid, die – in tegenstelling tot klassieke metingen – blijkbaar niet altijd tot een verstoring van het gemeten systeem leiden.

¹⁵⁵ Tsegaye, T.K., Goobar, E., Karlsson, A., Bjork, G., Loh, M.Y., en Lim, K.H. (1998), *Physical Review*, Ser. A 57, pp. 3987-399.

¹⁵⁶ Overgenomen uit Bruce, C. (2004), *o.c.*, p.151.

¹⁵⁷ Een counterfactual is een filosofisch begrip waarmee zaken worden aangeduid die in de actuele wereld niet gebeurd zijn, maar wel zouden kunnen gebeurd zijn.

5.1 Nul-interactiemetingen en non-lokaliteit

EV stelden in de introductie van hun artikel dat de door hun voorgestelde nul-interactiemetingen opnieuw een manifestatie zijn van non-lokaliteit.¹⁵⁸ Inderdaad, een meting waarbij men informatie verkrijgt uit een gebied zonder een signaal te sturen naar of te ontvangen uit dat gebied, kan men duidelijk niet-lokale metingen noemen.

De hier besproken nul-interactiemetingen zijn echter niet de enige metingen die non-lokale effecten openbaren. Ook de indirecte metingen in het EPR-gedachte-experiment zijn in zekere zin nul-interactiemetingen, en zijn manifestatie van non-lokaliteit. Andere voorbeelden van niet-lokale nul-interactiemetingen kan men vinden in Elitzur en Vaidman (1993). We herhalen dat hun ontwerp meer paradoxale implicaties heeft, aangezien geen gebruik wordt gemaakt van voorafgaande informatie.

5.2 Nul-interactiemetingen en counterfactuals

De nul-interactiemetingen van EV vormen een aanwijzing voor het feit dat *counterfactuals* fysische effecten kunnen hebben.¹⁵⁹ Penrose vindt dit aspect van de quantumtheorie zeer eigenaardig:

What is particularly curious about quantum theory is that there can be physical effects arising from what philosophers refer to as *counterfactuals* – that is, things that might have happen, although in fact they did not happen.¹⁶⁰

Nul-interactiemetingen vormen hiervan een mooie illustratie. In het gedachte-experiment van Renninger kan een counterfactual een reductie van de golffunctie veroorzaken. De counterfactual betreft hier de detectie van het deeltje door de binnenste semi-sferische detector. De niet gerealiseerde mogelijkheid tot registratie van deze detector zal de golffunctie van het deeltje wijzigen. Indien deze golffunctie echter een anti-realistische

¹⁵⁸ “*We shall present here yet another manifestation of the non-locality of quantum mechanics?*”, Elitzur, A. en Vaidman, L. (1993), o.c., p. 1.

¹⁵⁹ Onderzoekers hebben vóór de introductie van de nul-interactiemetingen door EV al in termen van counterfactuals geredeneerd om bepaalde quantummechanische verschijnselen te analyseren. Voor een overzicht zie Vaidman, L. (1999), *Defending Time-Symmetrised Quantum Counterfactuals*, *Studies in the History of Philosophy of Modern Physics*, Vol. 30, No. 3, pp. 373-397.

¹⁶⁰ Penrose, R. (1994), o.c., p. 240; oorspronkelijke cursivering.

interpretatie krijgt, zoals in de Kopenhaagse interpretatie, kan men bezwaarlijk van een reëel fysisch effect spreken.

In het gedachte-experiment van EV is de ontploffing van de bom de counterfactual. De enige manier volgens de klassieke natuurkunde om de ultragevoelige bom te lokaliseren, is door ze tot ontploffing te brengen. Door middel van de besproken methodes kan men in de quantummechanica uit de niet geactualiseerde mogelijkheid van deze ontploffing informatie verkrijgen over de lokalisatie van de bom.

Door te redeneren in termen van counterfactuals, kan men wel tot een beter begrip komen van nul-interactiemetingen. Ze laten ons immers inzien waarom het mogelijk is om met behulp van een nul-interactiemeting te ontdekken dat er een bom aanwezig is in een gebied, maar waarom het niet mogelijk is om door middel van zulk een nul-interactiemeting met zekerheid vast te stellen dat er *geen* bom te vinden is in dat gebied. In het laatste geval is er namelijk geen counterfactual: een mogelijke wereld waar de bom zou kunnen ontploft zijn.

Counterfactuals spelen niet alleen een rol in nul-interactiemetingen. Ze kennen eveneens een merkwaardige toepassing in *quantum computing*, waar men de quantummechanische beginselen wil toepassen op het verwerken en berekenen van informatie. Door zich te baseren op gelijkaardige argumenten als in de nul-interactiemetingen hebben onderzoekers een methode gevonden om een computer een algoritme te laten berekenen, zonder deze computer aan te schakelen. De loutere mogelijkheid om de computer aan te zetten volstaat om de berekening te verrichten, vandaar de benaming *counterfactual quantum computation*.¹⁶¹

5.3 Nul-interactiemetingen: een nieuwe visie op quantummechanische metingen

Toen Heisenberg zijn onzekerheidsrelaties introduceerde, ontwikkelde hij een gedachte-experiment waarin hij de oorzaak van deze onzekerheidsrelaties illustreerde. Hij meende toen nog dat deze relaties een epistemologisch gevolg waren van de niet reduceerbare verstoring die metingen veroorzaken op het gemeten systeem. Heisenberg beschouwde

¹⁶¹De literatuur over counterfactual quantum computation, is meestal zeer technisch. Voor een goede en bondige, niet al te technische uiteenzetting, zie Hosten, O., Rakher, M.T., Barreiro, J.T., Peters, N.A. en Kwiat, P.G. (2006), Counterfactual quantum computation through quantum interrogation, *Nature*, Vol. 439, 23Feb2006, pp. 949-952.

een elektron waarvan de positie exact moet bepaald worden. Hij suggereerde dat dit enkel kon door een signaal te sturen naar het elektron, bijvoorbeeld een lichtstraal. Men moet hiervoor licht gebruiken met een kleinere golflengte dan die van het elektron. Aangezien een elektron een zeer kleine golflengte heeft, en aangezien de golflengte van een deeltje omgekeerd evenredig is met de energie ervan, zullen de gebruikte fotonen over een hoge energie beschikken. Hierdoor zal het elektron waarmee één van deze fotonen in interactie treedt met een hogere kracht worden weerkaatst.¹⁶² Hoewel de positie exact bepaald is, zal de impuls van het elektron door deze interactie nu meer onzeker zijn.¹⁶³

We hebben gezien dat deze epistemologische interpretatie van de onzekerheidsrelaties door Heisenberg vervangen werd door een ontologische interpretatie. Desalniettemin illustreert dit gedachte-experiment een diepgewortelde intuïtie over metingen: metingen verstoren het gemeten systeem. Ook in de klassieke natuurkunde zal de onvermijdelijke interactie tussen het meetinstrument en het gemeten systeem een (weliswaar verwaarloosbare) verstoring veroorzaken van het systeem. Heisenberg was echter van mening dat de onvermijdelijke verstoring van het systeem tijdens het meetproces een fundamenteel aspect was van de quantumtheorie. Deze verstoring, die met elke exacte bepaling van een grootheid gepaard gaat, kan in tegenstelling tot de klassieke natuurkunde immers niet gereduceerd worden in de quantummechanica.

De visie op quantummechanische metingen ten gevolge van het Projectiepostulaat is echter nog drastischer. Het postulaat stelt immers dat om het even wat de toestand van het systeem vóór de meting moge geweest zijn, de toestand na de meting gereduceerd wordt tot de eigentoeestand waarin de gemeten grootheid de bepaalde waarde heeft. Indien men de toestandsvector op een realistische manier wil interpreteren, dan moet men toegeven dat een meting de toestand van het gemeten systeem vernietigt of produceert – naargelang hoe men het bekijkt. Het hoeft dan ook niet te verbazen dat de

¹⁶² Dit is het Compton-effect.

¹⁶³ Heisenberg, W. (1989), *o.c.*, p. 34; Jammer, M. (1974), *o.c.*, p. 63; Sklar, L. (1995), *o.c.*, p. 177. Heisenberg vertrok bij de ontwikkeling van zijn gedachte-experiment van een operationele visie op wetenschappelijke concepten, die slechts betekenis krijgen indien ze worden uitgedrukt in termen van operaties die in een experiment moeten worden uitgevoerd. Om bijvoorbeeld de betekenis van het concept 'positie' van een elektron te begrijpen, moet men verwijzen naar het experiment en de bijhorende operaties die deze positie bepalen; anders is dit concept non-sensicaal.

realistische interpretaties een manier zochten om deze impact van het meetproces op het gemeten systeem te verklaren.¹⁶⁴

De nul-interactiemetingen van EV hebben deze visie op quantummechanische metingen echter drastisch gewijzigd. Ze ontwikkelden immers een methode om een object te lokaliseren zonder de minste verstoring te veroorzaken van de toestand van het object, iets wat zelfs in de klassieke natuurkunde ondenkbaar is:

It is truly ironic that one often hears statements like ‘In a quantum world, you cannot measure any object without affecting it at least slightly’. That is precisely the opposite of the truth. In a classical world, we would really not be able to measure anything without affecting it, because every photon or electron would have some effect on whatever it struck, however gently. Only in a quantum world does it become possible to measure something without affecting it.¹⁶⁵

6. De interpretatie van nul-interactiemetingen

In deze sectie zullen we de verschillende interpretaties die we in het vorige hoofdstuk besproken hebben, toepassen op de nul-interactiemetingen. Voor de eenvoud hanteren we hiervoor het gedachte-experiment van Vaidman en Elitzur. Hoewel hun gedachte-experiment niet als een weerlegging kan beschouwd worden van één van de interpretaties, zullen we zien dat niet alle benaderingen er even goed in slagen de nul-interactiemetingen te duiden. Aangezien de Kopenhaagse interpretatie met aanzienlijke duidingsproblemen heeft te kampen, zullen we aan deze benadering wat meer aandacht moeten besteden dan aan de andere benaderingen.

6.1 Nul-interactiemetingen en de Kopenhaagse interpretatie

In het vorige hoofdstuk hebben we gezien dat complementariteit, de probalistische interpretatie van de golffunctie, en de reductie ervan bij waarneming of registratie van een meetresultaat de kern vormen van de Kopenhaagse interpretatie. We zullen zien dat deze aspecten ontoereikend zijn om nul-interactiemetingen op een behoorlijke manier te duiden. We beginnen onze bespreking van de Kopenhaagse interpretatie van de

¹⁶⁴ Zoals we gezien hebben zal de veelwereldeninterpretatie het Projectiepostulaat verwerpen, en opperen dat elke mogelijke meetuitkomst gerealiseerd wordt. De reductietheorieën zullen een algemeen mechanisme zoeken dat het reductieproces kan verklaren, zodat metingen kunnen beschouwd worden als een gevolg van dit mechanisme.

¹⁶⁵ Bruce, C. (2004), *o.c.*, p. 154.

gedachte-experiment van EV met de vraag waarom en wanneer de golffunctie van het foton gereduceerd wordt.

Een eerste probleem van de Kopenhaagse interpretatie situeert zich in het moment waarop de golffunctie van het foton gereduceerd wordt. We hebben gezien dat volgens de Kopenhaagse interpretatie deze reductie plaatsvindt op het moment dat een meetinstrument een meetresultaat registreert. In het gedachte-experiment van EV zijn de detectoren dan de meetinstrumenten die – na al dan niet registratie van het foton – de golffunctie doen ineensorten. Intuïtief is dit moeilijk aanvaardbaar, aangezien we verwachten dat deze golffunctie wordt gereduceerd op het moment dat de bom al dan niet explodeert.

Dat dit aspect van de Kopenhaagse interpretatie problematische gevolgen heeft, kunnen we gemakkelijk inzien als we het gedachte-experiment van EV licht wijzigen. We veronderstellen dat de twee detectoren E en F op n lichtjaren van D verwijderd zijn (zie figuur 3.2). We veronderstellen eveneens dat het systeem (foton + bom + interferometer + detectoren) in isolatie is zodat we omgevingseffecten buiten beschouwing kunnen laten. De Kopenhaagse interpretatie van dit gewijzigd gedachte-experiment stelt dat de golffunctie van het foton pas na n jaar zal gereduceerd worden, namelijk als het al dan niet één van de detectoren heeft bereikt. Tot dat moment blijft de bom in een toestand van superpositie van exploderen en niet-exploderen. Deze macroscopische superpositie wordt slechts na n jaar gereduceerd omdat de Kopenhaagse benadering een speciale rol toekent aan meetinstrumenten. Het gedachte-experiment van EV – en vooral onze licht gewijzigde ervan – zet bijgevolg opnieuw dit problematische aspect van de Kopenhaagse interpretatie in de verf.

In de Kopenhaagse interpretatie wordt echter de waarneming algemeen beschouwd als de oorzaak van de reductie van de golffunctie. Opnieuw kunnen we het gedachte-experiment van EV aanpassen zodat het problematische van deze visie wordt belicht. We beschouwen het gedachte-experiment van EV, waarbij de twee detectoren nu door een dikke geluidsdichte en onverwoestbare muur zijn afgescheiden van de rest van de interferometer. Deze twee detectoren worden eveneens omringd door een muur. We sturen nu een foton door de opstelling en blijven voorlopig buiten de buitenste muur. Volgens deze vorm van de Kopenhaagse interpretatie, zal de bom in een superpositie blijven tót we de buitenste kamer binnengaan en nagaan of de detectoren al dan niet het

foton geregistreerd hebben.¹⁶⁶ Indien we waarnemen dat detector E het foton geregistreerd heeft, wordt de superpositie van explosie en niet-explosie gereduceerd tot een toestand van niet-explosie. We weten dan dat de bom aanwezig is. Indien we waarnemen dat detector F de aankomst van het foton heeft geregistreerd, kunnen we enkel stellen dat de golffunctie van het foton gereduceerd wordt tot de toestand van het foton dat detector F bereikt.¹⁶⁷ Indien we echter observeren dat geen enkele detector het foton heeft geregistreerd, dan stort de golffunctie van het foton ineen tot de toestand van het foton bij explosie. In ons gedachte-experiment zal volgens de Kopenhaagse interpretatie de bom dus pas tot ontploffing komen wanneer we op een later willekeurig tijdstip waarnemen dat geen enkele detector de aankomst van het foton heeft geregistreerd.

Deze situatie is natuurlijk vergelijkbaar met het gedachte-experiment van Schrödinger, waarbij we intuïtief aanvoelen dat de golffunctie moet gereduceerd worden wanneer de kat al dan niet sterft. Hilary Putnam heeft hierop de aandacht gevestigd in een artikel, waarin hij stelt dat pragmatisch ingestelde natuurkundigen weinig problemen hebben met de paradox van Schrödinger omdat ze het al dan niet sterven van de kat als een meting beschouwen:

It must be admitted that most physicists are not bothered by the Schrödinger's cat case. They take the standpoint that cat's being or not being electrocuted should itself be regarded as a measurement. Thus in their view, the reduction of the wave packet takes place [...], when the cat feels or feels not the jolt of electric current hitting its body. More precisely, the reduction of the wave packet takes place when if it had not taken place a superposition of different states of a superposition of different states of some macro-observable would have been predicted. What this shows is that working physicists accept the principle that macro-observables always retain sharp values (by macroscopic standards of sharpness) and deduce when measurement must take place from this principle.¹⁶⁸

¹⁶⁶ De detectoren “klikken” enkel bij de aankomst van een foton, waardoor we – indien we op dat moment niet aanwezig waren – later eigenlijk niet meer de registratie van het foton door één van de detectoren kunnen nagaan. Dit kunnen we echter gemakkelijk oplossen door een bandrecorder te plaatsen die het al dan niet klikken van de detectoren opneemt.

¹⁶⁷ We kunnen niet stellen dat de bom zich in een superpositie van explosie en niet-explosie bevindt, aangezien we uit de registratie door detector F de aanwezigheid van de bom niet kunnen afleiden.

¹⁶⁸ Putnam, H., “A philosopher looks at quantum mechanics”, in Golodny, R.D. (1965) *Beyond the Edge of Uncertainty*, Prentice Hall, pp. 75-101. Ook geciteerd in Jammer, M. (1974), o.c., pp. 217-218.

Putnam wijst er echter op dat dit geen afbreuk doet aan de intellectuele relevantie van het gedachte-experiment van Schrödinger. Want wat hierin wordt aangetoond, is dat het principe dat macroscopische variabelen altijd goed gedefinieerd zijn, niet wordt gededuceerd uit de fundering van het quantumformalisme. Het moet er integendeel als een bijkomstige veronderstelling worden bijgesleept. Penrose heeft daarom met zijn benadering een streepje voor op de Kopenhaagse interpretatie. Immers, volgens hem doen macroscopische superposities zich nooit voor omdat ze door de zwaartekracht worden gereduceerd. Hierdoor kan elk instrument dat quantummechanische superposities uitvergroot naar het macroscopische niveau als een meetinstrument worden gerekend. Inderdaad, in het gedachte-experiment van EV beschouwt Penrose de bom als een meetinstrument.¹⁶⁹

Positivistisch geïnspireerde *Copenhagenists* kunnen hier natuurlijk tegen inbrengen dat de vraag naar het moment van de reductie van de golffunctie non-sensicaal is. De golffunctie beschrijft niet de fysische werkelijkheid maar onze kennis van de werkelijkheid. Derhalve moet de golffunctie enkel beschouwd worden als een mathematisch hulpmiddel om waarschijnlijkheden van meetuitkomsten te berekenen. Met deze golffunctie calculeren we dat er één kans op vijf is dat de bom explodeert, en één kans op vier dat het foton respectievelijk detector E of detector F bereikt. Vragen naar het moment waarop de golffunctie wordt gereduceerd heeft geen zin.

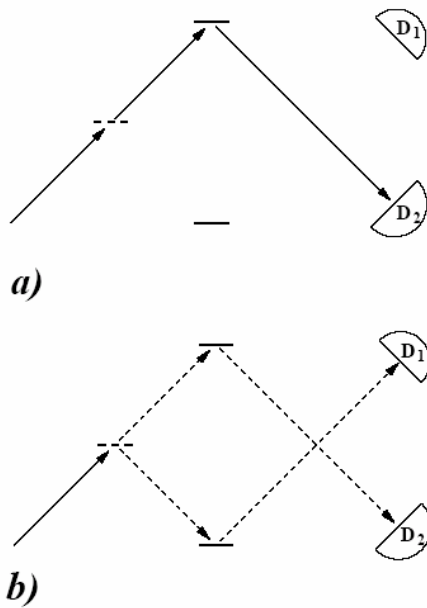
Naast het feit dat zulk een probalistische interpretatie van de golffunctie de interferentie-effecten niet kan verklaren, heeft deze benadering hier het bijkomstige probleem dat de nul-interactiemeting niet wordt geduid. Hoe het überhaupt mogelijk is dat een ultrasensitieve bom zonder explosie kan worden gelokaliseerd door een waarschijnlijkheidsgolf, blijft volstrekt onduidelijk.

De Kopenhaagse interpretatie kan dergelijke kritiek echter afwenden door te stellen dat het helemaal niet bewezen is dat er geen interactie was tussen het foton en de bom. Desalniettemin onderbouwden EV hun bewering dat er geen interactie plaatsvond in de context van de analyse Wheelers *delayed choice experiment*.

Indien men in de context van Wheelers gedachte-experiment beslist de half-doorlatende spiegel weg te laten en het foton detector 2 bereikt (zie figuur 3.7a), wordt gewoonlijk

¹⁶⁹ Penrose, R. (1994), *o.c.*, p. 268.

aanvaard dat het foton enkel de bovenste route heeft gevolgd. Intuïtief is zulk een bewering gemakkelijk aanvaardbaar aangezien het foton via de onderste route nooit detector 2 kan bereiken.¹⁷⁰ De benadering van von Neumann verschilt van deze analyse (zie figuur 3.7b). Volgens hem bevindt het foton zich in een superpositie tot de golf functie aan één van de detectoren gereduceerd wordt. Penrose benadert deze situatie op dezelfde manier als von Neumann, en interpreteert het traject van het foton op een objectief-realistische manier.



Figuur 3.7 Het “*delayed choice experiment*”: a) het fotontraject volgens Wheeler
 b) het fotontraject volgens von Neumann¹⁷¹

Zoals we in het eerste hoofdstuk reeds gezien hebben, gebeurt de analyse van Wheeler in de context van het complementariteitsprincipe. Als men de halfdoorlatende spiegel niet invoert, stelt hij een experiment op waarin deeltjeseigenschappen onderzocht worden, waardoor het foton zich niet als een golf maar als een deeltje zal gedragen. Bijgevolg volgt het foton slechts één traject. Stelt hij de spiegel wel op, dat voert hij een

¹⁷⁰ Voor meer uitleg zie Vaidman, L. (2000), “Are Interaction-free Measurements Interaction-free?”, ArXiv:quant-ph/0006077 v1 16 jun 2000, p. 4. Vaidman legt dit uit met behulp van het “two-state vector formalism”; de bespreking hiervan is in het kader van onze uiteenzetting niet belangrijk.

¹⁷¹ Overgenomen uit Vaidman, L. (2000), o.c., p. 3.

interferentie-experiment uit, waardoor het foton zich als een golf gedraagt en beide trajecten volgt. Ook de nul-interactiemetingen van EV zijn gebaseerd op het complementariteitsprincipe. De aanwezigheid van een bom verandert de experimentele opstelling tot een experiment waarin deeltjeseigenschappen onderzocht worden, waardoor het foton ofwel het traject naar de bom ofwel het traject naar één van de detectoren volgt. De Kopenhaagse interpretatie kan zich echter niet alleen baseren op het complementariteitsprincipe om de nul-interactiemetingen te verklaren. We hebben immers de paradoxale aard van nul-interactiemetingen *via* het complementariteitsprincipe in de verf gezet. Afhankelijk van de aanwezigheid van de bom, gedraagt het foton zich als een deeltje of als een golf. Als er een bom is, kan het foton het bomvrije traject volgen, en detector E bereiken. Complementariteit geeft echter op zich geen duiding aan nul-interactiemetingen, enkel een omkaderende beschrijving.

Nul-interactiemetingen zijn gebaseerd op golfdeeltjesdualiteit. Het complementariteitsprincipe vormt slechts één manier om golfdeeltjesdualiteit te verklaren. Deze verklaring schiet ons inziens te kort om de nul-interactiemetingen te duiden. Bij Penrose en de veelwereldeninterpretatie wordt golfdeeltjesdualiteit op een andere manier gedeut. Bij beide benaderingen staat een realistische visie op superpositie centraal.

6.2 Nul-interactiemetingen en de interpretatie van Penrose

Zoals we in het vorige hoofdstuk gezien hebben, geeft Penrose met zijn reductietheorie een objectief-realistische interpretatie aan de golffunctie, en beschouwt hij de ineenstorting van de golffunctie tijdens het meetproces als een reëel fysisch proces, dat door de zwaartekracht wordt veroorzaakt. Metingen krijgen daarom bij Penrose niet hetzelfde magische statuut als in de Kopenhaagse interpretatie. Elk proces waarin een quantummechanische gebeurtenis wordt uitvergroot naar het macroscopische niveau, wordt door Penrose aanzien als een meting. Daarom beschouwt hij de bom als een meetinstrument: de twee quantummechanische alternatieven “foton botst op de bom” en “foton botst niet op de bom” worden door de bom uitvergroot naar het macroscopisch niveau tot “bom explodeert” en “bom explodeert niet”.¹⁷²

Wat betreft het traject van het foton neemt Penrose de visie van von Neumann over. De golffunctie van het foton splitst zich aan de eerste halfdoorlatende spiegel in twee takken:

¹⁷² Penrose, R. (1994), *o.c.*, p. 268.

het foton bevindt zich in superpositie. Vervolgens zal de doorgelaten tak van de golffunctie de bom activeren, terwijl de gereflecteerde tak het traject naar de tweede halfdoorlatende spiegel volgt. Zolang de evolutie van de golffunctie gegeven wordt door de lineaire Schrödingervergelijking, zal niet alleen het foton zich in een superpositie van twee trajecten bevinden, ook de bom zal in een superpositie zijn van exploderen en niet-exploderen.

Nu is het moment aangebroken dat het reductiemechanisme van Penrose in het spel komt. Als deze reductie een reëel fysisch proces is, dan zal de toestand van de bom gereduceerd worden tot explosie of niet-explosie, wat zou neerkomen op een actuele meting. Volgens Penrose is dit inderdaad een volledig objectief en reëel fysisch proces, dat door de zwaartekracht bepaald wordt. Om dit in te zien, zullen we het vervolg van het gedachte-experiment volgens de ideeën van Penrose beschrijven.

De doorgelaten tak van de golffunctie van het foton zal worden verstrengeld met de ontsteker en uiteindelijk de bom, zodat de initiële golffunctie van het foton evolueert tot een quantumtoestand waarbij een superpositie van twee verschillende positioneringen van de bom betrokken is. Deze bom heeft een zwaartekrachtveld dat eveneens bij deze superpositie betrokken moet zijn. De initiële golffunctie van het foton zal bijgevolg evolueren tot een toestand waarin een superpositie van twee verschillende zwaartekrachtvelden zijn verward. Volgens de algemene relativiteitstheorie van Einstein betekent dit dat er twee verschillende plooiingen van de ruimtetijd in superpositie zijn.

Volgens Penrose zal zulk een superpositie zeer vlug instabiel worden, waardoor zeer snel een reductie zal plaatsvinden. We kunnen hiervoor twee redenen aanwijzen. Ten eerste mogen we ervan uitgaan dat de bom een voldoende grote massa heeft. Ten tweede is de positionering van de bom tussen explosie en niet-explosie drastisch verschillend, zodat ook de twee plooiingen van de ruimtetijd, veroorzaakt door het zwaartekrachtveld van de exploderende en niet exploderende bom, behoorlijk van elkaar zullen afwijken. Deze twee elementen in acht genomen en rekening houdend met het criterium van Penrose (zie hoofdstuk 2), zal de superpositie van deze twee plooiingen van de ruimtetijd voldoende instabiel zijn, waardoor de golffunctie van het foton zal ineenstorten en de superpositie van explosie en niet-explosie zeer snel zal worden gereduceerd tot explosie of niet-explosie.

Via zijn objectief reductiemechanisme slaagt Penrose er dus in de nul-interactiemetingen van EV behoorlijk te duiden. Men kan echter zijn analyse bekritisieren door erop te wijzen dat de objectieve reductie slechts plaatsvindt omdat er een superpositie van twee macroscopische toestanden bij betrokken is. Geldt zijn analyse nog indien dit niet het geval is, bijvoorbeeld wanneer de bom vervangen wordt door een object dat het foton enkel absorbeert?

Volgens Penrose zal er zich ook in zulk een situatie een objectieve reductie voordoen, indien de gravitatie-effecten van de omgeving in acht worden genomen. Indien het foton enkel geabsorbeerd wordt, hebben we niet met een superpositie van twee macroscopisch onderscheidbare toestanden te maken, maar met een superpositie van twee verschillende configuraties van atomen. De absorptie zal dan een voldoende verstoring veroorzaken in de omgeving die met het object verstrengeld is. Door de lineariteit van de Schödingerevolutie zal de superpositie van het foton zich uitbreiden naar een superpositie waarin een groot aantal microscopische deeltjes is verwickeld. Hierdoor zal – indien men rekening houdt met de zwaartekrachteffecten – een instabiele superpositie van twee ruimtetijd-plooiingen worden gecreëerd. Ook in deze situatie zal er dus een objectieve reductie plaatsvinden.

Het objectieve reductiemechanisme van Penrose kent, in tegenstelling tot de Kopenhaagse interpretatie, geen fundamentele problemen bij de duiding van nul-interactiemetingen. Toch kunnen we enkele kritische opmerkingen maken.

Ten eerste kan men zich de vraag stellen of nul-interactiemetingen in de analyse van Penrose wel interactievrij zijn. Eén van de twee takken van de golffunctie van het foton ‘botst’ immers wel tegen de bom, en afhankelijk van waar de reductie plaatsvindt, zal het foton al dan niet geabsorbeerd worden. Dit vormt natuurlijk geen kritiek, maar relativeert enkel de benaming ‘nul-interactie’: de bewering van Gabor moet nu ook uitgebreid worden naar deeltjes in superpositie.

Ten tweede zullen in de interpretatie van Penrose counterfactuals – door de golffunctie én de reductie objectief en realistisch te interpreteren – werkelijke fysische gevolgen hebben. Penrose kan hieraan wel een zekere verklaring geven. Vooraleer de reductie plaatsvindt, zal de counterfactual immers integraal deel uitmaken van de golffunctie. Door het feit dat de superpositie van de ruimtetijd-plooiingen veroorzaakt door de

‘factual’ en de ‘counterfactual’ niet stabiel is, zal de golffunctie gereduceerd worden. Door deze reductie wordt de counterfactual werkelijk ‘counterfactual’, namelijk een niet geactualiseerde mogelijkheid.

Ten derde kan men zich de vraag stellen waarom de counterfactual niet ‘factual’ is. Met andere woorden, waarom wordt de golffunctie van het foton de ene keer gereduceerd tot de toestand van niet-absorptie, en de andere keer tot de toestand van absorptie? Waarom zal de bom de ene keer wel, en de andere keer niet tot ontploffing worden gebracht? Penrose weet voorlopig nog geen antwoord op deze vraag, wat natuurlijk te maken heeft met het feit dat hij pleit voor een modificatie van de quantumtheorie. Hoe deze wijziging er uiteindelijk zal uitzien, namelijk of ze aanleiding zal geven tot een deterministische of een indeterministische theorie, laat hij voorlopig in het midden.¹⁷³

Ten slotte kan men zich filosofisch ongemakkelijk voelen bij de ontologische implicaties van de interpretatie van Penrose. Want hoewel de superpositie zeer snel zal gereduceerd worden, blijft ze immers een minieme fractie van een seconde bestaan. In de benadering van Penrose, zal de bom zich dus wel degelijk – weliswaar voor een minuscuul moment – in een superpositie bevinden van explosie en niet-explosie.

6.3 Nul-interactiemetingen en de veelwereldeninterpretatie

Vaidman is een aanhanger van de veelwereldeninterpretatie. Hij beschouwt de nul-interactiemetingen in het kader van deze interpretatie niet of alleszins veel minder paradoxaal.¹⁷⁴ In de veelwereldeninterpretatie wordt het fysische multiversum beschreven door één universele golffunctie, die op een deterministische wijze evolueert volgens de Schrödingervergelijking. Deze universele golffunctie kan ontleed worden in een superpositie van veel verschillende takken, die telkens met een verschillend universum corresponderen. Wij bevinden ons telkens in één tak, en nemen bijgevolg slechts één universum waar. De wetten van de quantummechanica hebben echter betrekking op het

¹⁷³ Cfr. “*Perhaps the choice of alternative is made by chance, or perhaps there is something deeper underlying this choice*”, Penrose, R. (1990), o.c., p. 476.

¹⁷⁴ Elitzur, A. en Vaidman, L. (1993), o.c., pp. 6-7; Vaidman, L. (1994), On the Paradoxical Aspects of New Quantum Measurements, *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol. 1994, Vol. One: Contributed Papers (1994), pp. 216-217; Vaidman, L. (1996), Interaction-Free Measurements, ArXiv:quant-ph/9610033 v1 21Oct1996, p. 6; Vaidman, L. (2001a), o.c., pp. 6-7; Vaidman, L. (2001b), The Meaning of Interaction-Free Measurements, ArXiv:quant-ph/0103081 v1 14Mar2001, pp. 8-9.

ganse multiversum, zodat het niet verwonderlijk is dat de waarneming van slechts één universum tot paradoxale situaties leidt.

De veelwereldeninterpretatie van de nul-interactiemetingen van EV is zeer eenvoudig. Telkens zich meerdere quantummechanische alternatieven voordoen, zal het betrokken universum zich vertakken in evenveel universa als er keuzes zijn. Wanneer het foton in de eerste halfdoorlatende spiegel aankomt, zal het universum zich dus vertakken in twee universa. In het ene universum zal het foton worden weerkaatst, terwijl in het andere universum het foton zal worden doorgelaten. Deze twee universa zullen met elkaar blijven interfereren zolang ze enkel met betrekking tot het traject van het foton van elkaar verschillen. Als beide trajecten vrij zijn van obstructie, zal er in de tweede halfdoorlatende spiegel interferentie optreden, waardoor het foton met zekerheid detector F zal bereiken, en de beide universa terug fuseren tot één universum.

Indien er echter in het onderste traject een bom aanwezig is, dan zullen beide universa niet met elkaar kunnen interfereren. Het universum waar het foton het bovenste traject volgde, zal zich in de tweede halfdoorlatende spiegel verder vertakken in twee verschillende universa: één waarin het foton detector F bereikt, en één waarin het foton detector E bereikt. In het laatste universum zullen we dus weten dat er een bom aanwezig is. Bij een nul-interactiemeting van EV vertakt het universum zich in drie universa: één waarin de bom ontploft, één waarin het foton detector F bereikt en één waarin het foton in detector E aankomt. Volgens Bruce zijn nul-interactiemetingen in de context van een multiversum mogelijk omdat een vorm van informatie wordt uitgewisseld tussen deze verschillende parallele universa:

The absence of a signal can contribute information, like the famous example of the dog in the Sherlock Holmes story that did not bark in the night. The present situation is more like a general who sends a scout to see if the enemy is hiding behind the next hill. “If all is clear, detonate this green flare,” he tells the scout. He does not need to give him a red flare to signal the presence of the enemy, for in that case the scout will be dead: The mere absence of a green signal at the prearranged time will tell the general all that he needs to know, one bit of information. The spooky thing about analogous quantum measurements is that we are using a signal not from another hilltop, but from another world. If an “OK” interference signal does not come, our scout – our otherworldly shadow photon – has fallen out of communication.¹⁷⁵

¹⁷⁵ Bruce, C. (2004), o.c., p. 144.

Net zoals de benadering van Penrose heeft de veelwereldeninterpretatie geen fundamentele problemen bij de duiding van nul-interactiemetingen. Toch heeft de veelwereldeninterpretatie in een aantal opzichten een streepje voor op de reductietheorie van Penrose.

Ten eerste is er in de context van een multiversum geen sprake van non-lokaliteit bij nul-interactiemetingen. Dit heeft natuurlijk te maken met het feit dat, indien men het ganse multiversum beschouwt, nul-interactiemetingen niet bestaan. Er is immers steeds minstens één universum waar het foton tegen de bom botst of door het object geabsorbeerd wordt. In het kader van de veelwereldeninterpretatie, kan Gabor de bewering van Gabor als volgt worden uitgebreid: *In het multiversum* kan geen enkele waarneming geschieden zonder dat *in minstens één universum* een foton of een ander deeltje tegen het waargenomen object botst.

Ten tweede geeft de veelwereldenbenadering een zeer natuurlijke en ontologische interpretatie aan counterfactuals. Counterfactuals zijn immers feiten die niet in ons universum maar wel in een parallel universum geactualiseerd zijn. Vaidman beschouwt de paradox dat counterfactuals een fysisch effect kunnen veroorzaken als een bijkomende reden om in de veelwereldeninterpretatie te geloven.¹⁷⁶ De veelwereldeninterpretatie van counterfactuals verklaart immers waarom het niet mogelijk is om een methode te ontwerpen waarin met zekerheid de niet-aanwezigheid van een bom gedetecteerd wordt: er is dan immers maar één universum, namelijk een universum waarin het foton aankomt in detector F.

De veelwereldeninterpretatie slaagt er bijzonder goed in de paradoxen van de nul-interactiemetingen te duiden. Mocht het mogelijk zijn de bom te lokaliseren zonder de bom ergens in het multiversum tot ontploffing te brengen, zouden we volgens Vaidman te maken hebben met een reële paradox, die ook niet in het kader van de veelwereldeninterpretatie kan worden opgelost.¹⁷⁷ Volgens de veelwereldeninterpretatie is dit echter onmogelijk: als er een bom is, dan zal er steeds een universum zijn waarin een foton deze bom doet exploderen.

¹⁷⁶ Vaidman, L. (1996), o.c., p.6.

¹⁷⁷ Vaidman, L.(2001b), o.c., p.10.

7. Nabeschuwing

In dit hoofdstuk hebben we de paradoxen van nul-interactiemetingen aangetoond. Volgens Vaidman zijn de paradoxen van nul-interactiemetingen echter geen reële paradoxen, maar paradoxen die verdwijnen van zodra men gans het multiversum in beschouwing neemt. Het zijn bijgevolg geen paradoxen die tot een nieuwe theorie moeten leiden. Ze behoeven enkel een aanpassing van onze fysische intuïtie, en zijn ook om die reden van fundamenteel belang:

Paradoxes in physics are very important: they lead to new theories. There are numerous paradoxes in quantum mechanics, but, in my view, none of them is a real paradox which will lead to new physical laws. The quantum mechanical paradoxes do not follow from incorrectness or incompleteness of quantum theory, but from inappropriate classical intuition which people developed during thousands of years when quantum phenomena were not observed and thus no one had reason to believe in quantum mechanics. The role of quantum paradoxes is not to lead to new theories but to lead to the development of new intuition about our world.

De nieuwe fysische intuïtie waar Vaidman naar verwijst is de intuïtie van de veelwereldenbenadering. Intuïtief voelen veel personen zich echter niet aangetrokken tot de ontologie van deze benadering. Eén van deze personen is natuurlijk Penrose, die met zijn benadering er eveneens goed in slaagt de nul-interactiemetingen te duiden. Volgens Penrose zijn dit soort metingen echter een manifestatie van de vele paradoxale raadselachtige fenomenen die quantummechanica rijk is. In tegenstelling tot Vaidman is Penrose van mening dat zulke paradoxen wél een nieuwe theorie behoeven.

Van de voorgestelde benaderingen slaagt enkel de Kopenhaagse interpretatie er niet in de nul-interactiemetingen behoorlijk te duiden. De problematische aspecten van deze benadering komen ook hier tot uiting. Het blijft volstrekt onduidelijk hoe het mogelijk is door middel van een waarschijnlijkheidsgolf de bom zonder explosie kunnen lokaliseren.

BESLUIT

In deze scriptie hebben we uitgebreid de nul-interactiemetingen van Elitzur en Vaidman besproken. We hebben eveneens de meer efficiënte methodes van Kwiat et al. en van Paul en Pavicic aan bod laten komen. Uit deze nul-interactiemetingen blijkt dat het mogelijk is om een object in een gebied te lokaliseren zonder een deeltje te sturen naar of te ontvangen uit dit gebied, én zonder enige voorafgaande informatie over dit gebied. Meer bepaald blijkt het mogelijk dat men een ultrasensitieve bom, die door de absorptie van slechts één foton tot ontploffing wordt gebracht, kan lokaliseren zonder een explosie te veroorzaken.

We hebben deze gedachte-experimenten in de context van het complementariteitsprincipe beschreven. Als de bom niet aanwezig is, wordt een interferentie-experiment opgesteld waardoor we enkel het golfgedrag van het foton kunnen onderzoeken. Indien de bom aanwezig is, wordt in het experiment deeltjesgedrag onderzocht, waardoor het foton zich als een deeltje zal gedragen. Wanneer het foton niet geabsorbeerd wordt, kunnen we uit het niet voorkomen van interferentie de aanwezigheid van de bom afleiden.

Nul-interactiemetingen zijn dus gebaseerd op golfdeeltjesdualiteit. Complementariteit vormt de Kopenhaagse interpretatie van dit raadselachtige fenomeen. We hebben echter gezien dat deze benadering er niet in slaagt om de nul-interactiemetingen op een behoorlijke manier te duiden. Enerzijds wordt door deze interpretatie niet benadrukt op welk moment de golffunctie van het foton gereduceerd wordt, en dus op welk moment de bom al dan niet tot ontploffing wordt gebracht. Anderzijds kan niet worden verklaard waarom een waarschijnlijkheidsgolf in staat is de bom zonder explosie te lokaliseren.

De golffunctie van het foton wordt door de Kopenhaagse benadering als een waarschijnlijkheidsgolf geïnterpreteerd. Met behulp van deze golffunctie kunnen we op één of andere manier de bom lokaliseren. De golffunctie wordt door de theorie van Penrose en de veelwereldeninterpretatie op een realistische manier geïnterpreteerd. Door zulk een realistische interpretatie van de golffunctie kunnen deze benaderingen de nul-interactiemetingen dan ook veel beter duiden.

Volgens Penrose zal de golffunctie van het foton zich in een superpositie bevinden, waardoor de toestand van de bom eveneens in een superpositie van explosie en niet-explosie zal geplaatst worden. Indien men de zwaartekrachteffecten die met zulk een superpositie gepaard gaan, zich manifesteren op de geometrie van de ruimtetijd, wordt een superpositie van twee verschillende plooiingen van deze ruimtetijd gecreëerd. Volgens Penrose is deze superpositie uitermate instabiel, waardoor zeer snel een objectieve reductie plaatsvindt. Ten gevolge van deze reductie zal het foton ofwel geabsorbeerd worden en de bom doen exploderen, ofwel niet geabsorbeerd worden en uiteindelijk de detector bereiken. Door het feit dat nu geen interferentie meer plaatsvindt, kunnen we de aanwezigheid van de bom detecteren.

In de veelwereldenbenadering vindt er geen objectief reductieproces plaats. De golffunctie vertakt zich in een superpositie van twee verschillende golffuncties die elk een ander universum beschrijven. In het ene universum wordt het foton geabsorbeerd en explodeert de bom. In het andere universum volgt het foton een ander traject. De toestand van deze universa zijn zodanig verschillend van elkaar dat ze niet meer met elkaar kunnen interfereren. In het universum waarin het foton niet geabsorbeerd wordt, kunnen we daarom uit het wegblijven van deze interferentie-effecten de aanwezigheid van de bom afleiden.

We hebben gezien dat de veelwereldenbenadering in een aantal opzichten een streepje voor heeft op de theorie van Penrose. Het voornaamste voordeel van de veelwereldeninterpretatie is dat non-lokaliteit vermeden wordt. Hoewel nul-interactiemetingen als een specifieke manifestatie van dit verschijnsel beschouwd kunnen worden, vindt in de veelwereldeninterpretatie van zulke metingen dit soort non-lokaliteit niet plaats. Indien we het ganze multiversum beschouwen, is er immers steeds een universum waarin het foton geabsorbeerd wordt. Nul-interactiemetingen bestaan volgens deze benadering dus enkel wanneer men slechts één universum in beschouwing neemt.

Personen die geen geloofwaardigheid aan de ontologie van de veelwereldenbenadering hechten, kunnen echter nog steeds bij Penrose terecht. Ook zijn reductietheorie slaagt erin de fundamentele raadsels van de quantummechanica behoorlijk te duiden. Nul-interactiemetingen vormen eveneens geen probleem. De theorie van Penrose is natuurlijk intrinsiek niet-lokaal. Bovendien is de theorie van Penrose veel minder afgewerkt dan de veelwereldentheorie. Penrose moet dan ook voor een fundamenteel nieuwe theorie

pleiten die in overeenstemming is met de geest van de relativiteitstheorie. In tegenstelling tot Penrose geeft de quantumtheorie volgens de Kopenhaagse benadering en de veelwereldeninterpretatie echter wel een volledige beschrijving van de fysische realiteit.

Indien de vraag wordt gesteld aan welke van de voorgestelde benaderingen de meeste geloofwaardigheid kan worden verleend, staan we voor een keuze tussen de veelwereldeninterpretatie en de reductietheorie van Penrose. De Kopenhaagse benadering kan nul-interactiemetingen immers onvoldoende duiden. Ofwel willen we dan dat de quantumtheorie een lokale theorie die volledig is, en opteren we voor de ontologie van de veelwereldeninterpretatie. Ofwel willen we een minder extravagante ontologie dan die van de veelwereldeninterpretatie en opteren we voor de onafgewerkte niet-lokale theorie van Penrose. De keuze komt dus neer op een keuze tussen enerzijds volledigheid, lokaliteit en een multiversum-ontologie, en anderzijds onvolledigheid, non-lokaliteit en een universum-ontologie. Aangezien er momenteel nog geen experiment bestaat die één van deze interpretaties kan falsifiëren, zullen we onze keuze uiteindelijk moeten laten afhangen van onze ontologische intuïtie. Uiteraard blijft de agnostische positie eveneens een mogelijkheid.

BIBLIOGRAFIE

- Albert, D. (1992), *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press
- Albert, D. en Loewer, B. (1989), Two No-Collapse Interpretations of Quantum Theory, *Noûs*, Vol. 23, N°2
- Albert, D. en Vaidman, L. (1988), On a proposed postulate of state-reduction, *Physics Letters A*, Vol. 139, pp. 1-4
- Barrett, J. (1997), On Everetts formulation of quantum mechanics, *Monist*, Vol 80, N°1, pp. 70-98.
- Barrett, J. (2003), Everett's Relative-State Formulation of Quantum Mechanics, The Stanford on-line Encyclopedia of Philosophy, zie <http://plato.stanford.edu/entries/qm-everett/>
- Bohm, D. (1959), *Causality and Chance in Modern Physics*, University of Pennsylvania Press
- Bohm, D. (1954), *Quantum Theory*, London: Constable and Company Ltd.
- Bruce, C. (2004), *Schrödinger's Rabbits. The Many Worlds of Quantum*, New York: National Academy Press
- Bub, J. (2005), Quantum Entanglement and Information, Stanford on-line Encyclopedia of Philosophy, <http://plato.stanford.edu/entries/qt-entangle/>
- Davies, P.C.W en Brown, J.R (2005), *The Ghost in the Atom*, Cambridge University Press
- De Muynck, W. (2003), Towards a Neo-Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics, quant-ph0307235v1
- Deutsch, D. (1997), *The Fabric of Reality*, London: Penguin
- Deutsch, D. en Hayden, P. (2000), Information flow in entangled quantum systems, *Proceedings of the Royal Society of London*, Ser. A 456, pp. 1759-1774
- du Marchie Van Voorthuysen, E.H. (1997), Realization of an interaction-free measurement of the presence of an object in a light beam, *American Journal Physics*, Vol. 64, N°12, pp. 1504-1507
- Elitzur, A. en Vaidman, L. (1993), Quantum mechanical interaction-free measurements, arXiv:hep-th/9305002 v2 05may93

Faye, J. (2002), The Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics, Stanford on-line Encyclopedia of Philosophy, zie <http://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen/>

Fine, A. (1996), *The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory*, The University of Chicago Press

Fine, A. (2004), The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory, Plato Stanford on-line Encyclopedia of Philosophy, zie <http://plato.stanford.edu/entries/qt-epr>.

Ghirardi, G. (2002), Collapse Theories, Stanford on-line Encyclopedia of Philosophy. Zie <http://plato.stanford.edu/entries/qm-collapse/>

Gribbin, J. (1999), *Schrodingers Kittens*, Back Bay Books

Grometstein, A.A. (1999), *The Roots of Things. Topics in Quantum Mechanics*, Kluwer Academic

Healy, R.A. (1984), How Many Worlds, *Noûs*, Vol. 18, N°4, pp. 591-616.

Heisenberg, W. (1989), *Physics and Philosophy*, Penguin Books

Herbert, N. (1987), *Quantum Reality*, Anchor Books

Hosten, O., Rakher, M.T., Barreiro, J.T., Peters, N.A. en Kwiat, P.G. (2006), Counterfactual quantum computation through quantum interrogation, *Nature*, Vol. 439, 23Feb2006, pp. 949-952

Jammer, M. (1974), *The Philosophy of Quantum Mechanics*, John Wiley & Sons

Kwiat, P., Weinfurter, H., Herzog, T., Zeilinger, A., and Kasevich, M. (1995), Interaction-free quantum measurements, *Physical Review Letters*, Vol. 74, pp. 4763-4766

Kwiat, P., Weinfurter, H. en Zeilinger, A. (1996), Quantum Seeing in the Dark, *Scientific American*, November 1996, pp. 52-58

Kwiat, P., White, A. G., Mitchell, J. R., Nairz, O., Weihs, G, Weinfurter, H. en Zeilinger, A. (1999), High-efficiency quantum interrogation measurements via the quantum Zeno effect, *Physical Review Letters*, Vol. 83, pp. 4725-4728

Maudlin, T. (2002), *Quantum Non-Locality and Relativity*, Blackwell Publishing

Paul, H. en Pavicic, Nonclassical interaction-free detection of objects in a monolithic total-internal-reflection resonator, arXiv:quant-ph/9908023 v1 5 Aug 1999

Penrose, R. (1990), *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press

- Penrose, R. (1994), *Shadows of the Mind*, Oxford University Press
- Penrose, R. (2004), *The Road to Reality*, Knopf Borzoi Books
- Polkinghorne, J.C. (1987), *The Quantum World*, Penguin Books
- Putnam, H., “A philosopher looks at quantum mechanics”, in Golodny, R.D. (1965) *Beyond the Edge of Uncertainty*, Prentice Hall, pp. 75-101
- Rae, A. (2000), *Quantum Physics: Illusion or Reality?*, Cambridge University Press
- Shimony, A. (2005), Bell's Theorem, The Stanford on-line Encyclopedia of Philosophy <http://plato.stanford.edu/entries/bell-theorem/>
- Sklar, L. (1995), *Philosophy of Physics*, Oxford University Press
- Stapp, H. (2002), The Basis Problem in Many Worlds Theories, quant-ph/0110148v2
- Tegmark, M. (1997), Many Worlds or Many Words, arXiv: quant-ph/9709032 v1 15 Sept 1997
- Tegmark, M. en Wheeler, J.A. (2001), 100 Years of the Quantum, arXiv: quant-ph/0101077 v1 17 Jan 2001
- Tegmark, M. (2003), Parallel Worlds, ArXiv:astro-ph/0302131 v1 7 Feb 2003
- Tsegaye, T.K., Goobar, E., Karlsson, A., Bjork, G., Loh, M.Y., en Lim, K.H. (1998), *Physical Revue*, Ser.A 57, pp. 3987-399
- Vaidman, L. (1994), On the Paradoxical Aspects of New Quantum Measurements, *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol. 1994, Vol. One: Contributed Papers (1994), pp. 216-217
- Vaidman, L. (1996a), On the schizophrenic behaviour of the neutron or why we should believe in the Many-Worlds Interpretation of quantum theory, Arxiv:quant-ph/9609006 v1 7 Sept 1996
- Vaidman, L. (1996), Interaction-Free Measurements, ArXiv:quant-ph/9610033 v1 21Oct1996
- Vaidman, L. (1999), Defending Time-Symmetrised Quantum Counterfactuals, *Studies in the History of Philosophy of Modern Physics*
- Vaidman, L. (2000), Are Interaction-free Measurements Interaction-free?, ArXiv:quant-ph/0006077 v1 16 jun 2000

Vaidman, L. (2001a), The Paradoxes of the Interaction-free Measurements, arXiv:quant-ph/0102049 v1 09feb2001

Vaidman, L. (2001b), The Meaning of Interaction-Free Measurements, ArXiv:quant-ph/0103081 v1 14Mar2001

Vaidman, L. (2002), The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics, Stanford online Encyclopedia of Philosophy, zie <http://plato.stanford.edu/entries/qm-manyworlds/>

Van Loocke, P. (2006), *Het Universum waarin we leven. Mogelijkheden en beperkingen van de huidige wetenschap met betrekking tot de constructie van een wereldbeeld*, cursus gedoceerd aan de 2^{de} licentie Wijsbegeerte aan de Universiteit van Gent

Weber, E. (2005), *Kennis ontrafeld*, Garant

Whitaker, A. (1996), *Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma*, Cambridge University Press

Zeilinger, A. (2005), *Toeval!*, Veen Magazines