

MASTER

Het aanleren van kwantumconcepten in de bovenbouw van het VWO met behulp van een interactieve applet

Sloff, F.M.

Award date:
2016

[Link to publication](#)

Disclaimer

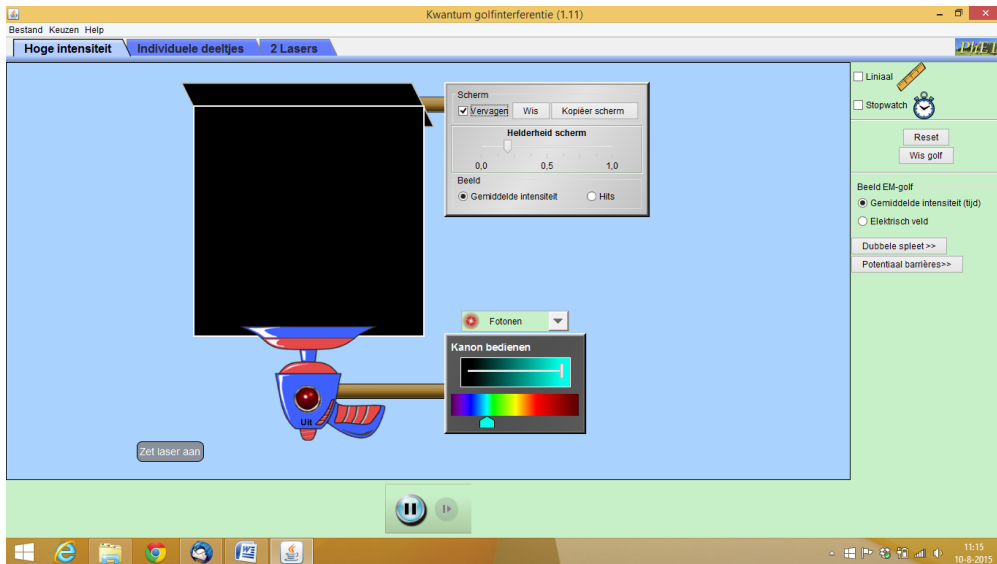
This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

Het Aanleren van Kwantumconcepten in de Bovenbouw van het VWO met behulp van een Interactieve Applet



(Startscherm van het Twee-spleten Experiment applet, phet.colorado.edu)

Auteur: F. M. Sloff
Studentnummer: 137595
Begeleider: L. de Putter-Smits
Datum: Maart 2016
Opleiding: Master of Science and Communication (Natuurkunde)
Instituut: Eindhoven School of Education

*“1. Ik snap het niet.
2. Einstein ook niet.
3. De rest van de wereld ook niet”.*
(Commentaar van leerling 17 uit klas A over Kwantummechanica)

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	4
1.1	Aanleiding voor het onderzoek.....	4
1.2	Persoonlijke motivatie voor het onderzoek.....	5
2	Theoretisch kader.....	7
2.1	Hedendaags onderwijs van kwantumtheorie aan middelbare scholen.....	7
2.2	Interpretaties van de kwantumtheorie.....	8
2.3	Computer Applets.....	10
2.4	De onderzoeksvragen.....	10
3	Methode.....	12
3.1	Ontwerp van de lessenreeks.....	12
3.1.1	Gemaakte keuzes en verantwoording.....	12
3.1.2	Bètadidactische benadering.....	12
3.1.3	Bètadidactische ingrediënten.....	13
3.2	De interventie.....	14
3.2.1	De controle groep en interventie groep.....	14
3.2.2	Inhoud lessen.....	14
3.2.3	Verloop van de lessen.....	15
3.3	Het instrument.....	16
3.3.1	Opzet van de questionnaire.....	16
3.3.2	Reductie van de questionnaire gegevens.....	18
3.3.3	Validiteit en betrouwbaarheid van het onderzoek.....	19
4	Resultaten.....	21
4.1	Draagt het gebruik van een applet bij tot het beter aanleren van kwantumconcepten?.....	21
4.2	Welke misconcepties zijn er tijdens het onderzoek naar voren gekomen?.....	22
5	Discussie en conclusie.....	25
5.1	Bespreking van de antwoorden op de onderzoeksvragen.....	25
5.2	Verdere discussie van de betrouwbaarheid van het onderzoek.....	26
5.3	Conclusie.....	27
5.4	Reflectie aan de hand van lesobservaties.....	27
	Nawoord en dank.....	29
	Samenvatting van het onderzoek.....	30
	Literatuur.....	32

Appendix A: Inhoud lessen	34
Appendix B: Reader historische inleiding	40
Appendix C: Questionnaire.....	54
Appendix D: Practicum handleiding	59
Appendix E: Reductie van de ingevulde questionnaire	67
Appendix F: Statistische verwerking per vraag.....	70
Appendix G: Analyse per vraag.....	76

1 Inleiding

“Kwantummechanica is onduidelijk en haast onbegrijpelijk, maar dat maakt het juist interessant”.
(Commentaar van leerling 6 uit klas A over Kwantummechanica)

1.1 Aanleiding voor het onderzoek

In het natuurkunde curriculum ([Staatscourant, 2012](#)) komen vanaf het examenjaar 2016 een aantal onderwerpen naar voren die aan de Nederlandse middelbare scholen (uitgebreider) geëxamineerd gaan worden. Van deze onderwerpen is vooral het onderwerp Kwantumwereld uit domein F1 conceptueel uitdagend voor leerlingen uit de bovenbouw van het HAVO/VWO, aangezien de stof niet intuïtief is en een beroep op denken doet dat anders is dan het puur mechanistische alledaagse ([Ireson, 2000](#)).

In het domein F1 wordt als eindterm waaraan de VWO-eindexamen kandidaat moet voldoen, het volgende vermeld:

“De kandidaat kan in contexten de golf-deeltjes dualiteit en de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg toepassen, en de kwantisatie van energieniveaus in enkele voorbeelden verklaren aan de hand van een eenvoudig fysisch model”

Van Richard Feynman, een van de belangrijkste natuurkundigen van de twintigste eeuw, is de uitspraak ([Feynman, The character of a physical law, 1965](#)):

“I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics” .

Zie hier, weliswaar in een notendop, de aanleiding voor het onderzoek.

Het valt dan niet mee om zich bezig te houden met concepten als “Golf-deeltjes Dualiteit”, de “Onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg” en “Kwantisatie van Energieniveaus”, en dan ook nog eens in verschillende fysische contexten. Het is evident dat puur frontaal onderwijs in het aanleren van dergelijke concepten, vaak nog de dagelijkse praktijk bij onderwijs in de kwantumtheorie op middelbare scholen, zeker niet zal bijdragen tot een effectieve en prettige verwerking van zulke stof.

Maar waarom middelbare scholieren dan toch belasten met iets wat ze in wezen toch niet kunnen begrijpen? De toename van de belangstelling voor de kwantumwereld in het middelbare onderwijs heeft te maken met de geleidelijke introductie van kwantumtechnologieën in de maatschappij gedurende de afgelopen decennia (medische wetenschappen, computer technologie, etc.), maar zeker ook met de te verwachten stormachtige introductie van nieuwe kwantumtechnologieën. Van het laatste zal vooral de kwantum computer van grote invloed zijn. De meeste leerlingen zullen - hoe dan ook - in hun latere leven met de principes van de kwantumwereld c.q. computer te maken gaan krijgen in hun vervolgopleiding, in hun toekomstig gebruik van kwantumtechnologieën en in hun denkwijzen. Toepassingen zullen komen - en zijn er soms al - op het gebied van drug-engineering, het oplossen van voedselproblemen (Feeding the World), economie (simulatie van economische modellen), simulatie van fysische systemen (b.v. materiaalkunde), oplossen van milieuproblemen (reductie CO₂), Kunstmatige

Intelligentie (Machine Learning) en super efficiënte computer algoritmen (zoek- en encryptie algoritmen) om maar een paar te noemen (Svore¹, 2015).

Het kwantumdenken gaat voor de moderne mens een grotere plaats innemen dan voorheen (Hey & Walters, 2011). Het al vroeg bijbrengen van kwantumconcepten en hun bizarre effecten op de middelbare school kan dus van belang zijn om de overgang naar een kwantummaatschappij te faciliteren. Dit is precies de reden dat het moderne natuurkunde curriculum voor natuurkunde met een grotere bijdrage van o.a. kwantumtheorie is uitgebreid (Commissie Vernieuwing Natuurkundeonderwijs Havo/VWO, 2006)².

Samenvattend kan men zeggen dat kwantummechanica voor de middelbare scholier conceptueel lastig is, maar dat dit onderwerp vanwege een veranderende maatschappij in het nieuwe natuurkunde curriculum uitgebreider aan de orde komt. De vraag rijst daarom: is er een alternatieve, prettige manier om kwantumconcepten aan te leren en is deze manier effectiever dan de traditionele manier van lesgeven, namelijk frontaal doceren? In het volgende hoofdstuk zal deze vraag, na theoretische onderbouwing, leiden tot de onderzoeksvraag.

1.2 Persoonlijke motivatie voor het onderzoek

Mijn eigen motivatie voor het onderzoek is gelegen in diepgaande belangstelling voor theoretische concepten. Hoe abstracter hoe beter, en hiermee kom je in de theoretische natuurkunde en in het bijzonder de kwantumtheorie ruimschoots aan je trekken. En ik ben nu op een leeftijd gekomen (56) dat ik van een aantal zaken voldoende afweet en een gedeelte hiervan wens te delen met de jeugd.

Na dertig tot veertig jaar bij gelegenheden inspannend turend in de glazen bol van de theoretische natuurkunde, begin ik een idee te krijgen waarom ik bepaalde (kwantum)concepten begrijp en waarom ik bepaalde concepten niet kán begrijpen, m.a.w. waar de grenzen van het kennen liggen. Maar kan ik een leerling van zeventien de essentie van een kwantumconcept wel uitleggen? Mijn eigen gevoel zegt - aan de hand van gegeven lessen uit het verleden - dat het kwartje bij de meeste leerlingen niet valt indien je alleen de bekende natuurkundige recepten mondeling overdraagt en/of proeven demonstreert. Hands-on en het zelf doen door leerlingen kan een kans bieden om het overdragen van natuurkundige concepten, die door leerlingen moeilijk gevonden worden, te ondersteunen. Het gebruik van computer applets lijkt hiervoor geschikt, vanwege hun eenvoudige toegankelijkheid (internet), parametrizeerbaarheid (met een druk op de knop heb je een ander/aangepast experiment) en visuele aantrekkelijkheid.

Ik heb gekozen de kwantumtheorie bij de leerlingen te introduceren via een historische context. Vooral in het onderwijs in de kwantumtheorie loert het gevaar van antididactische inversie (Freudenthal, 1973); de stof wordt heden ten dage vaak als monolithisch en als min of meer plotseling verschijnend gepresenteerd, terwijl er veel aanpassingen, fouten, bloed, zweet, tranen, ruzies, depressies, (zelf)moorden, eergevoel, vijandigheden, etc. bij de ontwikkeling ervan vooraf gegaan zijn. Maar dat maakt de (exacte) wetenschappen zo interessant; het is mensenwerk op het randje van ons geestelijk kunnen en er soms overheen. Dat laatste laten inzien is vooral nodig om leerlingen de concepten op waarde te laten schatten en de fundamentele betekenis er van te kunnen inzien (van Eijk,

¹ Krysta Svore is senior researcher bij Microsoft Research in Redmond, VS en is een visionaire op het gebied van kwantum computers.

² De veranderende maatschappij maakt niet alleen de noodzaak voor uitgebreider onderwijs in kwantumtheorie noodzakelijk. Het geldt ook voor Medische Beeldvorming (subdomein B2) en Leven en Aarde (domein G).

2013). De keuze voor een historische introductie is ook ingegeven door mijn persoonlijke belangstelling voor geschiedenis in het algemeen en die van de exacte wetenschappen in het bijzonder. Ik heb het als scholier en als student als uitermate prettig en verhelderend gevonden indien ik de natuurkundige stof in historisch perspectief tot me kon nemen: het geeft overzicht en vereenvoudigt transfer. Dit alles heeft geresulteerd in een reader³ die de historische context van de kwantumtheorie beschrijft en die de leerlingen als achtergrondinformatie bij de lessenreeks hebben kunnen gebruiken. Ik heb deze met veel plezier samengesteld.

³ Appendix B: Reader historische inleiding.

2 Theoretisch kader

“De kwantumtheorie zegt dat je eigenlijk niks weet”.

(Commentaar van leerling 19 uit klas A over kwantummechanica)

2.1 Hedendaags onderwijs van kwantumtheorie aan middelbare scholen

In de verdere specificatie van de eerder genoemde eindterm F1, worden de volgende eisen genoemd (Groenen, et al., 2012). De eindexamenkandidaat dient:

1. Licht als golfverschijnsel te kunnen benoemen en te kunnen toelichten.
2. De golf-deeltjedualiteit te kunnen toepassen bij interferentieverschijnselen van Elektromagnetische straling en bij materiedeeltjes.
3. Het foto-elektrisch effect te kunnen gebruiken om aan te tonen dat elektromagnetische straling gekwantiseerd is.
4. Kwantumverschijnselen te kunnen beschrijven in termen van opsluiting van deeltjes (“deeltje in een doosje”).
5. Het kwantum-tunneleffect te kunnen beschrijven aan de hand van een eenvoudig model.

De belangrijkste leerproblemen treden op in de specificatie van de tweede eis, waarbij de waarschijnlijkheidsinterpretatie van de golffunctie en de de-Broglie golflengte de kern van de moeilijkheden vormen (Spuijbroek & Koopman, 2013). Zulke concepten staan ver af van onze zintuiglijke waarnemingen waardoor eenvoudig misconcepties bij scholieren kunnen ontstaan (zie Carey, 1986 voor een beschouwing van misconcepties in het onderwijs).

Omdat kwantummechanica als conceptueel moeilijk wordt gezien, bestaat de neiging bij de meeste docenten, zowel op universiteiten als middelbare scholen, om alleen de machinerie (de recepten) van de theorie over te dragen en niet dieper in te gaan op de concepten zelf (Koopman, 2011).

Daarnaast bestaat er bij een aantal docenten een hiaat aan kennis en didactische kunde met betrekking tot het onderwijzen van kwantumtheorie op de middelbare school, getuige de geregelde bijscholingscursussen die hierover in Nederland gegeven worden (zie voor voorbeelden: Spuijbroek & Koopman, 2013; Neuraj & Water, 2015). Door gebrek aan deze kennis en kunde kan een docent weerhouden worden om niet al te diep in te gaan op kwantum concepten, met als gevolg dat de concepten gefragmenteerd en zonder onderlinge samenhang worden gepresenteerd. Er is soms wel een goed Nederlandstalig of Engelstalig boek over kwantumtheorie te vinden, speciaal geschreven voor docenten als doelgroep (bijvoorbeeld Lijnse, 1981; Levy-Leblond & Balibar, 1990). Maar recent zijn deze niet.

Het valt te beargumenteren dat met betrekking tot practica de situatie enigszins analoog is. De bekende proeven zoals die van Franck & Hertz, Davisson & Germer en het tweespleten experiment met laserlicht, laten alleen de kwantumverschijnselen op macroscopisch niveau zien. De werkelijke geheimen van de kwantumwereld worden juist openbaar als men deeltjes of fotonen individueel, dat wil zeggen op microscopische wijze benadert. Met uitzondering van de Scanning-Tunneling Microscop (STM) waartoe een docent soms toegang heeft, is de practica- en demonstratieapparatuur op de middelbare school hiertoe niet in staat en blijven de werkelijke geheimen van de kwantumtheorie verborgen.

Samenvattend kan men zeggen dat de kans dus groot is dat het onderwijs in kwantumtheorie oppervlakkig en gefragmenteerd blijft. Dit terwijl er bij leerlingen en docenten de behoefte bestaat aan betekenisvol onderwijs (*meaningful learning*) dat doordringt tot de kern van de stof.

Kennismaking met *interpretaties* van de kwantumtheorie kan bijdragen tot betekenisvoller onderwijs en het beter begrijpen van kwantumconcepten later op universiteiten (Bailey & Finkelstein, 2010). Deze interpretaties laten duidelijk zien wat het wezenlijke bizarre van de kwantumwereld is en wat de betekenis hiervan is voor de concepten. Dit in tegenstelling tot de recepten van de kwantumtheorie, waar het bizarre niet goed tot uitdrukking komt. Kan bespreking van de interpretaties (in vereenvoudigde vorm) op de middelbare school ook bijdragen tot een betekenisvoller begrip van kwantumconcepten? De volgende paragraaf beschrijft enkele belangrijke interpretaties van de kwantumtheorie, en waarom ze kunnen bijdragen tot betekenisvoller onderwijs.

2.2 Interpretaties van de kwantumtheorie

Koopman (2013) vindt in de literatuur een herhaald terugkerende analyse dat, door moeilijkheden rond de interpretatie van kwantummechanica en het abstracte karakter ervan, er in het onderwijs voornamelijk een focus is op het leren van de recepten van de kwantummechanica. Kennismaking met interpretaties, en het onderling vergelijken daarvan, kunnen belangrijk zijn voor het wezenlijk doorgronden van kwantumconcepten willen we het kwantumonderwijs op de middelbare school verdiepen en het niet meer laten bij een in feite oppervlakkige reeks van recepten⁴.

De kennismaking kan namelijk bijdragen tot dieper leren (Chin & Brown, 2000), omdat het de leerling in staat stelt een uitgebreidere verklaring te geven van kwantumverschijnselen dan alleen de herhaling van de verschijnselen die er op treden. Koopman (2013) wijst er echter ook op dat onderwijs in interpretaties het gevaar met zich meebrengen dat misconcepties kunnen worden geïntroduceerd. Voorzichtigheid is dus geboden.

De interpretaties zijn in principe over te dragen zonder formules, en ze geven ook inzicht in de *Science-in-the-Making* van een theorie. Vooral dat laatste, het vallen en opstaan van de natuurkundigen tijdens het ontstaan van de theorie, kan voor leerlingen instructief zijn en zal hen verder kunnen ondersteunen bij het plaatsen van de reeks kwantumrecepten die ze tegenkomen tijdens de latere reguliere lessen.

Wat zijn nu deze interpretaties? Kwantumconcepten, zoals energieniveaus, lichtdeeltjes (fotonen), golfdeeltje dualiteit, onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg etc., zijn zelfs voor doorgewinterde natuurkundigen geen gesneden koek. Het gevaar van misconcepties voor middelbare scholieren ligt hierbij dubbel op de loer: naast de moeite die leerlingen überhaupt hebben om klassieke fysische concepten op een juiste manier voor te stellen, gedraagt de wereld van de microkosmos zich ook nog eens volkomen anders dan de macroscopische wereld, namelijk op een bizarre en weinig intuïtieve wijze. Zo hebben kwantumdeeltjes geen goed gedefinieerde plaats maar lijkt hun aanwezigheid zich uit te smeren over de ruimte. En bij beweging van een microscopisch deeltje van het ene naar het andere ruimtelijke punt, lijkt het eerst alle mogelijke paden af te testen waarna er na meting een van de paden concreet wordt, om maar een paar te noemen.

⁴ Dat dit spanningen met zich meebrengt voor het toch al overladen curriculum (Kuiper, Folmer, Ottevanger, & Bruning, 2011) staat buiten kijf. Het zou ten koste moeten gaan van een ander onderwerp uit het curriculum. Daar zouden dan wel eens pijnlijke keuzes gemaakt moeten worden.

Er zijn door de natuurkundigen in het verleden pogingen gedaan om de verschijnselen van de kwantumwereld te interpreteren om zo hiervan een concreter fysisch begrip te krijgen (Baggott, 1992). Deze pogingen vallen samen onder de noemer *interpretaties van de kwantumtheorie*. Hieronder volgen korte beschrijvingen van vijf interpretaties. De lijst is niet uitputtend.

Tegenwoordig is nog steeds de *wetenschappelijk-positivistische*⁵ benadering van het orthodoxe Kopenhagen paradigma onverminderd populair (Baggott, 1992). De belangrijkste woordvoerder hiervan was de Deense natuurkundige Niels Bohr. De benadering meent dat er geen sprake is van fysische (microscopische) realiteit zoals baan, impuls en andere eigenschappen van deeltjes zonder dat er metingen bij betrokken zijn. Het meetproces op microscopisch niveau neemt dus een cruciale plaats in.

Tegenover Bohr stond Einstein die een meer *wetenschappelijk-realistische* benadering aanhing (Baggott, 1992). Hij ging uit van een objectieve werkelijkheid (de realiteit) die in principe onafhankelijk van waarnemingen bestaat. Een gevolg is dat men kan aannemen dat specifieke natuurkundige grootheden van deeltjes, zoals impuls en snelheid, in een aantal gevallen kunnen worden afgeleid zonder ze daadwerkelijk in een experiment te meten.

Een meer pragmatische benadering - eigenlijk geen interpretatie - is die van Richard Feynman waarbij de uiteindelijke uitkomst van een kwantumexperiment bepaald wordt door de som van alle mogelijke histories (paden) van een deeltje bij elkaar op te tellen (Feynman, 1985). In deze kwantumtheorie biedt de wiskunde een middel om met de bizarre verschijnselen van de kwantumwereld om te gaan: probeer de zaak niet te begrijpen of te interpreteren en voer alleen berekeningen uit en kijk wat er uit komt ('Shut up and Calculate').

Daarnaast wint de meer natuurlijke interpretatie van David Bohm, beschreven bijvoorbeeld in het boek van Hiley en Peat (1987), de laatste decennia wat aan invloed. Begrippen zoals de baan van een microscopisch deeltje hebben daar wel weer enige realiteitswaarde teruggekregen. De prijs die betaald moet worden is dat men *gedwongen wordt de realiteit op te vatten als een holistisch geheel door de aanwezigheid van globale kwantumpotentialen* die geen klassieke tegenhanger hebben.

Een andere, wat exotische, interpretatie is Everett's *Many Worlds Interpretation* (Baggott, 1992) die het genoemde meetprobleem van Bohr in feite omzeilt. Everett's benadering biedt wel een consistente kijk op de kwantumverschijnselen, maar heeft weer allerlei filosofische consequenties die moeilijk te accepteren zijn, zoals het continu afsplitsen van nieuwe universa na elke kwantumsprong op microscopisch niveau met meerdere mogelijkheden.

Als interventie in reguliere lessen, zoals beschreven in paragraaf in paragraaf 2.1, kan men zich nu voorstellen een lessenreeks op te zetten die de interpretaties prominent aan de orde laat komen, i.h.b. die van Einstein en Bohr. De interpretaties zijn echter niet los te zien van de historische ontwikkeling van de kwantumtheorie. In de lessenreeks dient er dan ook voor gekozen te worden om deze interpretaties via een historische context bij de leerlingen te introduceren. Een positieve bijkomstigheid hiervan is dat het gevaar van antididactische inversie (Freudenthal, 1973) vermeden kan worden. Zoals gezegd is de kwantumtheorie dermate abstract dat het meteen uitnodigt tot het opnoemen van de bekende verworvenheden in de vaktaal, zonder dat daar een goede intuïtieve introductie aan vooraf gegaan is.

⁵ Het *positivisme* is een filosofische stroming afkomstig uit de Wiener Kreis (begin 20^e eeuw) die dingen pas als reëel, d.w.z. werkelijk bestaand, beschouwt indien ze op een positieve manier aangetoond kunnen worden door een meting. Over al het andere dient men in de natuurkunde te zwijgen. Dit in tegenstelling tot het *realisme* dat een onderliggende objectieve werkelijkheid, los van metingen, beschouwt als het wezenlijk bestaande. Bohr was een positivist. Einstein een realist.

2.3 Computer Applets

Betekenisvol onderwijzen van kwantumconcepten op het voortgezet onderwijs is een moeilijke taak indien men vasthoudt aan frontaal doceren. Het *visualiseren* van kwantum-theoretische gedachten experimenten m.b.v. simulatieprogramma's (computer applets) kan echter een uitkomst bieden. In de literatuur worden enkele studies genoemd die dit voor studenten aan universiteiten en andere vervolgopleidingen bevestigen. Zo wordt opgemerkt (Zhou, Brouwer, Nocente, & Martin, 2005) dat als men applets gebruikt die voor een constructieve wijze van lesgeven zijn ontwikkeld ten behoeve van *Conceptual Learning* (Markle & Tiemann, 2006), deze dan ook daadwerkelijk alleen op een constructieve wijze gebruikt moeten worden. M.a.w. de toepasbaarheid buiten de oorspronkelijke bedoeling van applets is mogelijk gering. Een andere studie (Baser, 2006) toont aan dat er sprake is van verbeterde effectiviteit van *Conceptual Learning* bij aankomende leraren natuurkunde, indien open-source applets gebruikt worden.

Een vroege studie (Street & Goodman, 1998) daarentegen geeft weer geen enkel bewijs van de effectiviteit van het gebruik van applets bij studenten in de computerwetenschappen.

Gezien de magere oogst aan onderzoeken naar de effectiviteit van applets in het kwantumonderwijs rijst de vraag of het gebruik van applets inderdaad kan bijdragen tot het beter begrijpen van kwantumconcepten. Door leerlingen interactief met de simulaties van kwantumexperimenten te laten werken, kan er dieper begrip van de theorie bewerkstelligd worden. Immers, de mens leert het meest door te spelen en gezamenlijk of individueel te ontdekken. Bovendien wordt het leren opzetten van gedachten experimenten in de hoofden van leerlingen hiermee bevorderd.

Klassieke studies in de onderwijskunde die gebaseerd zijn op de constructivistische leertheorie in het onderwijs (Driver & Oldham, 1986; Ertmer & Newby, 1993) tonen aan dat abstracte concepten beter aangeleerd worden door er praktisch en in groepjes mee bezig te zijn, d.w.z. door het zelf in te zien/zelf te ontdekken. Er zijn inmiddels heel wat natuurkundige applets op het internet beschikbaar (PHET *Interactive Simulations*, 2015; Fendt, Koops, & Russeler, 2015), die relatief eenvoudig aangewend kunnen worden als practicumgereedschap voor groepjes leerlingen. Dit onderzoek is een poging om te testen of een van die applets inderdaad kan bijdragen tot het beter begrijpen van kwantumconcepten en of hiermee eenvoudig misconcepties naar boven komen drijven. Deze kunnen dan ter plekke gecorrigeerd worden door de docent.

2.4 De onderzoeksvragen

De eerste drie paragrafen van dit hoofdstuk in ogenschouw nemend, kan men het volgende zeggen: (1) het goed begrijpen van concepten staat centraal in het natuurkundig onderwijs, (2) kennismaking met interpretaties kan bijdragen tot het dieper begrijpen van kwantumconcepten, en (3) applets stellen de leerlingen in staat op een moderne (constructivistische) wijze kennis te maken met de concepten.

Het doel van het onderzoek is om te komen tot een lessenreeks waarbij een aantal kwantumconcepten via een historische context worden geïntroduceerd en die aan de hand van interpretaties van de kwantumtheorie worden verduidelijkt. Na de lessenreeks kan worden bekeken of

de kwantumconcepten beter begrepen zijn door gebruik van een computer applet. De centrale vraag is of het gebruik van zo'n applet wel toegevoegde waarde heeft.

Bovenstaande beschouwingen leiden tot de volgende onderzoeksvragen.

- 1) *Draagt het gebruik van een interactieve methode (een applet) bij tot het beter aanleren van kwantumconcepten?*
- 2) *Welke misconcepties ontstaan of komen er naar boven door het gebruik van het applet en welke misconcepties ontstaan zonder het gebruik van het applet?*

3 Methode

“Het is volgens Bohr waarschijnlijker dat ze (de deeltjes) alleen tijdens het meten bestaan. Maar Einstein zei: ‘bestaat de maan (ook een ‘deeltje’) als ik er niet naar kijk?’ Zit wel wat waarheid in”.

(Commentaar van leerling 1 uit klas A over de vraag of de maan bestaat als we er niet naar kijken)

3.1 Ontwerp van de lessenreeks

3.1.1 Gemaakte keuzes en verantwoording

In de lessenreeks is ervoor gekozen om de volgende drie kwantumconcepten nader aan bod te laten komen: het kwantum meetproces, de golf-deeltjes dualiteit, en het karakter van de golffunctie. Alleen het tweede concept komt terug in het nieuwe natuurkunde curriculum (Staatscourant, 2012). Er is gekozen voor deze onderwerpen omdat ze nadrukkelijk terugkomen in het gekozen applet en omdat ze relatief eenvoudig via een historische context te introduceren zijn. Het zijn ook de onderwerpen waar het meest over gediscussieerd is tijdens de beginjaren van de kwantumtheorie.

Als onderwerp van het applet is gekozen voor het beroemde Twee Spleten Experiment (TSE)⁶. Dit experiment is uitgebreid beschreven door Richard Feynman in zijn beroemde lessenreeks (Feynman, Leighton, & Sands, 1965) gegeven aan het California Institute of Technology in de jaren zestig van de vorige eeuw. In het onderzoek is niet uitgegaan van de “many-paths” benadering van Feynman⁷, aangezien dit te veel nadruk zou leggen op de interpretatie die Feynman aan de kwantumtheorie heeft gegeven. Het TSE voor deeltjes wordt gehanteerd als natuurlijke uitbreiding van het TSE voor fotonen.

Er zijn twee redenen voor het kiezen van het TSE. Ten eerste bevat het TSE alle geheimen van kwantumgedrag van microscopische deeltjes, waaronder de superpositie van waarschijnlijkheidsgolven, interferentieverschijnselen, het statistische gedrag van kwantummetingen, het veranderen van het experiment door ingrijpen van de experimentator in het experiment, etc.. Ten tweede vormt het een relatief eenvoudig startpunt voor een eerste kennismaking met kwantumtheorie, aangezien het veel lijkt op de interferentieverschijnselen die naar voren komen in de bekende dubbelspleten experiment van Young (1802). Het Young-experiment is namelijk precies hetzelfde als het TSE, zij het dat er licht gebruikt wordt i.p.v. materiële deeltjes.

3.1.2 Bètadidactische benadering

In de gehele lessenreeks (inclusief het practicum) is het idee van *Conceptual Change* (Posner, Strike, Hewson, & Gertzog, 1982) van belang. Deze methode laat leerlingen ervaren dat hun bestaande begrippenapparaat ontoereikend is om te verklaren wat ze waarnemen⁸. Het heeft zijn wortels in de ideeën van de wetenschapsfilosoof Thomas Kuhn (Kuhn, 1970). Wetenschappers - en in ons geval dus

⁶ Het bijbehorende TSE-applet is te vinden op: <https://phet.colorado.edu/nl/simulation/quantum-wave-interference>

⁷ Voor een voorbeeld waar dit wel gedaan is, zie Ogborn, 2011.

⁸ Het conflict waar ik het hier over heb is die tussen de klassieke natuurkunde (dat wat we macroscopisch gewend zijn) en de kwantumwereld (de bizarre verschijnselen op microscopisch niveau).

ook onderzoekende leerlingen in de natuurkunde - komen tot nieuwe inzichten indien bepaalde verschijnselen niet meer te begrijpen zijn vanuit een bestaand denkkader (paradigma). Conceptual Change voorziet in een verandering van een denkkader (paradigma revolutie) zodat er dieper begrip optreedt van de nieuwe verschijnselen. Vanuit didactisch oogpunt is dit precies wat met de lessenreeks getracht wordt te bereiken. Als lucide voorbeeld kan een onderdeel van het applet practicum worden genoemd, waarbij het interferentiepatroon van het TSE verdwijnt als men met een detector gaat kijken door welke spleet een deeltje gaat. Dit verschijnsel is alleen met kwantumtheorie te begrijpen en niet met de klassieke theorie, en komt vreemd over omdat het net is alsof de natuur weet dat men als experimentator 'mee zit te kijken'.

Het theoretische gedeelte van de lessenreeks doet voornamelijk een beroep op de cognitieve vaardigheden van de leerlingen. Dit is wat het "ouderwetse onderwijs" inhield, namelijk frontaal doceren en trachten de concepten via docent-leerlingen interactie over te brengen⁹. In wezen is dit geen bètadidactische benadering maar meer een leertheorie. Het is toch het vermelden waard omdat het een belangrijk deel uitmaakt van de opzet van de lessenreeks.

De bèta-didactische benadering van het praktische gedeelte (het applet gebruik) kan worden samengevat onder de noemer *Onderzoekend Leren*, ook wel *Inquiry Based Science Education* genoemd (Dewey, 1910/1976; Bruner, 1961). Het stoelt op de constructivistische leertheorie, waarbij leerlingen een nieuwe situatie aangeboden krijgen en er gezamenlijk naar een oplossing of nieuw begrip toe wordt gewerkt. De docent dient wel ruimte te krijgen in het begeleiden van de leerlingen zodat er juiste conclusies worden getrokken. Aan de andere kant – het betreft hier immers een onderzoek – is het interessant om leerlingen dermate vrij te laten dat er misconcepties naar boven komen.

3.1.3 Bètadidactische ingrediënten

In de syllabus van het college Bètadidactiek (van Eijk, 2013) dat gegeven wordt aan de TU in Eindhoven, worden een aantal bètadidactische ingrediënten benoemd die gebruikt kunnen worden bij het opzetten van lessen in bètavakken. De ingrediënten die voor de ontworpen lessenreeks van toepassing waren, zijn Informatie- en Communicatietechnologie (ICT), Praktisch Werken en Practica.

Voor wat betreft ICT is vooral het evenwicht tussen didactiek/pedagogiek, natuurkundige vakinhoud en gebruikte computer technologie van groot belang. Zonder dit evenwicht is het gebruik van ICT in onderwijs gedoemd te mislukken. Het TPAC (*Technological Pedagogical Content Knowledge*) programma is hier de exponent van (Shulman, 1986; Mishra & Koehler, 2006).

Het slechts overhandigen van ICT-tooling aan leerlingen ("hier heb je het en ga maar aan de slag") is dus niet voldoende. Het stukje software dient met zorg te worden uitgekozen zodat onderwerpen aangestipt worden die men wil behandelen, er dient geverifieerd te worden dat het op de computers van de school werkt en het moet aantrekkelijk en snel genoeg werken om het in de gereserveerde timeslot af te handelen.

Verder dient er ten minste een goede leerlingenhandleiding te zijn, afgestemd op het specifieke stukje ICT, waarin hij/zij wordt uitgedaagd *zelf* na te denken over de vragen (het liefst van te voren voordat een bepaalde stap tijdens het practicum wordt uitgevoerd) en niet te werken volgens een kookboek/stappenplan.

⁹ Zie voor een overzicht van de cognitieve manier van doceren (Ertmer & Newby, 1993).

Als laatste dient tijdens het practicum door de docent de nadruk gelegd te worden op wat belangrijk is (b.v. door te zeggen “let op, kijk daar eens naar” of “vind je het niet vreemd dat het applet zo reageert?”, etc.).

Voor wat betreft het tweede punt, praktisch werken en practica, kan nog gezegd worden dat het hier een bijzondere vorm van practicum betreft; er zijn geen fysieke meetopstellingen gebruikt, slechts een computer simulatie van een kwantummechanisch verschijnsel. Het doel van een dergelijke simulatie is vooral het vergaren van kennis over de kwantumwereld, en vooral op een ‘minds-on’ manier. Ze dienen immers gewaar te worden van de met de klassieke fysica botsende verschijnselen en hierover verwonderd te raken.

3.2 De interventie

3.2.1 De controle groep en interventie groep

In september 2015 is er een onderzoek uitgevoerd in twee VWO-6 klassen naar verschillen in de effectiviteit van het aanleren van enkele concepten uit de kwantumwereld. Het werd uitgevoerd aan het *Rythovius College te Eersel*.

Klas A (de controle groep) werd beschouwd als volledig **passief** en ontving twee lessen over de eerder genoemde kwantumconcepten, gevolgd door twee lessen met een BBC-documentaire. Klas B (de interventie groep) werd beschouwd als voornamelijk **actief** en ontving twee dezelfde lessen (wel op een ander tijdstip) over de genoemde kwantumconcepten, gevolgd door een applet practicum van iets minder dan twee uur.

De controle groep bestond uit voornamelijk meisjes (16 op 21 totaal) en de interventie groep bestond uit voornamelijk jongens (19 op 24 totaal).

Beide klassen/groepen waren eerder in aanraking geweest met enkele kwantumconcepten in het hoofdstuk over kernfysica, maar niet met optische verschijnselen zoals interferentie. Dat laatste natuurkundige verschijnsel is tijdens de eerste twee lessen nader toegelicht.

Van beide klassen werd een gemeenschappelijke toets/questionnaire van twintig vragen afgenomen gedurende een vijfde les.

3.2.2 Inhoud lessen

De gemeenschappelijke lessenreeks bestond uit twee uren frontaal lesgeven, met zoveel mogelijk interactie d.m.v. prikkelende vragen. Zie [Appendix A](#) voor de inhoud van de lessen en een voorbeeld van een prikkelende vraag waarmee de gehele lessenreeks begonnen is. Zoals eerder betoogd is er gebruik gemaakt van een historische context waarin de natuurkundige concepten zijn geïntroduceerd. Dit heeft geresulteerd in een reader die te vinden is in een van de appendices ([Appendix B](#)).

In de BBC-documentaire ([Al-Khalili, 2014](#)) werd in detail ingegaan op de problemen die Einstein ondervond met de kwantumtheorie en de daaruit voortkomende meningsverschillen met Bohr¹⁰. De documentaire duurde ruim een uur. Na afloop van de documentaire was er gelegenheid tot vragen stellen en beantwoorden.

¹⁰ Door Bohr zelf beschreven in het boekje *Atomic Physics and Human Knowledge* ([Bohr, 1958](#)).

[Appendix A](#) geeft ook een gedetailleerde beschrijving van de inhoud van het applet practicum dat door klas B in de derde en vierde les is uitgevoerd en [Appendix D](#) geeft de practicumhandleiding die door de leerlingen uit klas B is gebruikt.

3.2.3 Verloop van de lessen

De twee frontale lessen vonden voor beide klassen vlak na elkaar plaats. Ze verliepen in klas A interactiever dan die in klas B. Dat was op te maken uit de grotere hoeveelheid vragen die door de leerlingen uit klas A gesteld werden. De absentie gedurende de lessen was nagenoeg nul; gedurende de eerste les waren er slechts twee absentes in klas B. Verder kunnen de frontale lessen als identiek gegeven beschouwd worden.

De twee lessen waarin de BBC-documentaire door klas A bekeken werd, verliepen zonder technische problemen. Voor wat betreft de inhoud ging het op een enkel punt verder dan met dit onderzoek beoogd was. Dit betrof vooral de uitleg en implicaties van het gedachten experiment van John Bell dat door Alain Aspect in de jaren tachtig in het laboratorium is geverifieerd. Dit leverde na de vertoning van de video een aantal vragen uit de klas op. Deze vragen toonden aan dat het principe niet begrepen was, maar voor de rest van het onderzoek is dit niet relevant.

De twee lessen van het computerpracticum verliepen zonder noemenswaardige problemen, op een tweetal onnauwkeurigheden in de tekst van de bijbehorende practicumhandleiding na. Deze konden tijdens de les worden gecorrigeerd. De opdrachten mochten in groepjes van maximaal drie leerlingen worden uitgevoerd. De technische werking van het applet, de omgeving waarin het practicum is uitgevoerd (het computerlokaal) en de practicumhandleiding zijn ruim van te voren een aantal keren door de reguliere docent van de klas en de onderzoeker gecontroleerd. De voortgang van het practicum werd een aantal keren gestopt om samen met de klas een samenvatting te maken van hetgeen daarvoor is waargenomen. Dat is gebeurd bij de vragen 3, 5, 7, 9 en 10, waar het nodig was om mogelijke misconcepten of eigenaardigheden van de kwantumwereld aan te stippen. Iedereen uit klas B was in staat (qua tijd) om de laatste opdracht over de Onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg uit te voeren. Deze opdracht behoorde echter niet tot de stof van het onderzoek en zou alleen worden uitgevoerd indien er tijd over was. Er waren gedurende de twee practicum lessen geen absentes in klas B.

De questionnaire, bestaande uit twintig meerkeuze vragen, is door beide klassen afzonderlijk gedurende een vijfde les ingevuld. Het invullen was na een half uur door beide klassen afgerond. De rest van de vijfde les is overgenomen door de reguliere docent. Op een individuele leerling na, leerling 17 uit klas A, zijn de questionnaires serieus en volledig ingevuld. Deze leerling heeft de open vragen met onzin ingevuld, maar heeft wel alle meerkeuzevragen beantwoord. Sommige leerlingen hebben een meerkeuzevraag niet ingevuld; deze zijn dan ook niet meegenomen in de statistische berekeningen en zijn als een geel veld aangegeven in de tabellen met de resultaten (4.1). Er was slechts een leerling absent tijdens de vijfde les zodat er een questionnaire minder is ingevuld.

Samenvattend kan men zeggen dat, op een enkele kleine uitzondering na, de lessen en het invullen van de questionnaires verlopen zijn zoals van te voren was gepland.

3.3 Het instrument

3.3.1 Opzet van de questionnaire

Het instrument, een vragenlijst/questionnaire die gebruikt werd om zicht te krijgen in de onderzoeksvraag, werd gedurende de vijfde les uitgedeeld aan de leerlingen van beide klassen. De lijst kon beantwoord worden in 30 minuten en bestond uit twintig vragen die in de volgende rubrieken waren onder te verdelen. Allereerst Interpretaties: vraag 1, 2, 3, 4, 5, 8, 18, vervolgens golf-deeltjes dualiteit: 6, 12, 13, 20, dan het meetproces: 9, 16, en als laatste de aard van de golf functie: vraag 7, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 19.

Iedere meerkeuze vraag is in een gesloten vorm gesteld. De mogelijke antwoorden waren (slechts een enkel antwoord te kiezen):

- A. Helemaal mee eens
- B. Meer eens dan oneens
- C. Zowel eens als oneens
- D. Meer oneens dan eens
- E. Helemaal mee oneens.

Verder werd in een aantal vragen een toelichting vereist op de plekken waar stond "Ik kies dit antwoord omdat:". Deze vragen zijn gekozen omdat leerlingen hier hun antwoord meer moeten beredeneren dan de andere, zodat misconcepten eenvoudiger naar boven komen. Als laatste werd aan de leerlingen gevraagd een top 3 van onderwerpen uit de lessenreeks te noemen die het meeste waren blijven hangen. Dit laatste is bedoeld om leerlingen een eigen samenvatting te laten maken van wat ze hebben geleerd. Deze top 3 informatie wordt verder niet gebruikt in dit verslag.

De volgende tabel (Tabel 3-1) geeft in de kolom CON per vraag aan welke mis- of preconcepties (MIS/PRE) van te voren verwacht werden. Indien het wel of niet optreden van een misconceptie niet relevant is, is er NVT (Niet Van Toepassing) in gevuld. In de laatste kolom is het voorkeursantwoord per vraag gegeven, die leerlingen op grond van de lessenreeks hadden moeten invullen voor maximale score. Tevens is daar de motivatie voor het voorkeursantwoord weergegeven.

Tabel 3-1: Questionnaire met voorkeursantwoorden en verwachte misconcepten

Vraag nr	Vraagtekst	CON	Voorkeursantwoord + motivatie
1	Als je gaat kijken naar hoe in de kwantumtheorie het meten in natuurkundige experimenten wordt opgevat, dan moet je concluderen dat atomen en andere microscopisch kleine deeltjes niet bestaan. Ja, misschien eventjes tijdens de meting, maar daarna verdwijnen ze weer.	NVT	1 - Bohr had gelijk. Eigenschappen van atomen bestaan niet voordat ze gemeten zijn.
2	Zelfde als vraag 1, maar nu m.b.t. fotonen i.p.v. deeltjes.	NVT	1 - Zie antwoord vraag 1, maar nu fotonen i.p.v. deeltjes.
3	Dat gefilosofeer of atomen/fotonen wel of niet bestaan is onbelangrijk. Natuurkunde moet zich bezighouden met fysische dingen die werken en nut hebben.	NVT	3 - Dit is een kwestie van smaak (filosofische instelling).
4	Kwantumtheorie kun je het beste met wiskundige formules begrijpen.	NVT	2 - In de dagelijkse praktijk zijn kwantumtheoretici bezig met

			wiskunde, maar in de natuurkunde wil men toch graag bezig zijn met interpreteren.
5	Ondanks alles is het toch mogelijk dat je een visuele voorstelling (tekening) van deeltjes atomen en moleculen kunt maken die realistisch is.	PRE	5 - Je kunt geen realistische tekeningen maken van atomen.
6	Microscopisch kleine deeltjes bewegen zich voort van punt naar punt in de ruimte, waarbij de baan de vorm van een golf heeft.	MIS	5 - Bekende misconceptie: deeltjes bewegen zich niet voort in een golfachtige beweging.
7	De golffunctie ψ van microscopisch kleine deeltjes is niet iets fysisch/bestaands. Het bevat alleen maar informatie over deeltjes – d.w.z. de kans om deeltjes ergens aan te treffen - en meer niet.	NVT	3 - Eerste gedeelte is onjuist; men weet de aard van de golffunctie nog steeds niet. Tweede gedeelte is juist.
8	Als je een kwantum experiment opstelt is dit per definitie niet-objectief van aard, omdat bij elke meting een deeltje verstoord wordt door de waarneming en dus door de waarnemer die het experiment heeft opgesteld. In de kwantumtheorie zijn dus geen objectieve waarnemingen mogelijk	MIS	5 - Natuurlijk zijn er objectieve, herhaalbare experimenten mogelijk. De uitkomsten zijn niet meer deterministisch, maar dit wil niet zeggen dat het subjectief is. Het opzetten of veranderen van het experiment heeft wel subjectieve trekjes: je krijgt waar je om vraagt: deeltje of golfeigenschap.
9	In het Twee Spleten Experiment met materiële deeltjes gaan de deeltjes steeds door 1 spleet tegelijk en niet door twee spleten.	PRE	3 - Als je in golftaal spreekt dan gaan de deeltjes door twee spleten. In deeltjestaal niet.
10	Er bestaat in wezen geen verschil tussen fotonen en materiële deeltjes omdat beide zowel golf- als deeltjeseigenschappen in experimenten vertonen.	MIS	5 - 1. Fotonen hebben geen massa. 2. Fotonen maken deel uit van het elektromagnetische veld. 3. Fotonen bewegen zich altijd met de lichtsnelheid. 4....
11	Hoe zit het met de snelheid waarmee die ψ -golf zich voortplant, denk je? De snelheid waarmee ψ zich voortplant is precies gelijk aan c , de lichtsnelheid ($\pm 3 \times 10^8$ m/s)	MIS	5 - De snelheid waarmee Ψ zich voortplant is gelijk aan die van de deeltjes. Het EPR experiment, echter, toont aan dat het misschien wel oneindig is.
12	We hebben de proef van Young opgesteld en laten fotonen (i.p.v. materiële deeltjes) richting de spleten gaan. We zien op het scherm erachter een interferentiepatroon ontstaan. Het optische interferentiepatroon verdwijnt als we kijken door welke spleet de fotonen gaan.	NVT	1 - In deze zin gedragen fotonen en deeltjes zich weer hetzelfde.
13	Als we een foton op bijvoorbeeld een elektron schieten, dan kan er een botsing optreden waarbij het elektron een extra snelheid krijgt en het foton van aard verandert (b.v. richting of frequentie f van het foton).	NVT	1 - Fotonen kunnen inderdaad botsen met deeltjes. Dit heet het Compton effect.
14	Elk individueel materieel deeltje heeft zijn eigen golffunctie ψ .	PRE	1 - Is juist. Het is lastig om voor te stellen dat ieder deeltje een eigen golffunctie heeft, terwijl Ψ een functie is die statistische informatie bevat. Je zou verwachten dat Ψ meerdere elektronen zou beschrijven, maar dit is niet zo.
15	Elk individueel foton heeft zijn eigen golffunctie ψ	MIS	5 - Een foton heeft geen rustmassa en dus ook geen golflengte gedefinieerd voor Ψ -golf.
16	Indien het Twee Spleten Experiment voor deeltjes herhaald	MIS	1 - Grof gezien wel, maar de

	wordt, dan ziet het interferentiepatroon op het scherm er niet hetzelfde uit.		individuele stippen/hits van de elektronen op het scherm zijn anders.
17	Het Twee Spleten Experiment toont aan dat (meerdere) elektronen met elkaar interfereren. Dat een elektron met zich zelf interfereert kan niet.	PRE	5 - Ieder elektron heeft zijn eigengolf die 'met zich zelf interfereert'.
18	Hoe men over deeltjes of fotonen denkt is afhankelijk het soort experiment dat je ermee uitvoert.	NVT	1 - Is juist. De natuur geeft antwoord op de vraag die de experimentator via het experiment aan haar stelt: vraag ik om deeltjes eigenschappen in het experiment, dan krijg ik die ook. Idem voor golfeigenschappen.
19	Elektronen worden een voor een afgeschoten op een scherm met twee spleten. De waarneming dat het interferentiepatroon op het detectiescherm zich langzamerhand opbouwt, toont aan dat ieder elektron een eigen golf functie ψ heeft.	NVT	1 - Is juist. Alle deelexperimenten (een enkel deeltje gaat door de spleten) geven een ander resultaat, maar opgeteld geven ze een interferentiepatroon.
20	Een elektron in het atoom bestaat uit een in de ruimte uitgesmeerde ladingswolk.	MIS	2 - Dit is een van de belangrijke beelden in de kwantumtheorie. Komt terug in orbitalen van uit de scheikunde. Is echter niet exact juist omdat een deeltje niet gesplitst kan worden in kleinere delen.

3.3.2 Reductie van de questionnaire gegevens

De invulling van de vragen en verdere reductie van de gegevens uit de questionnaire zijn ondergebracht in [Appendix E](#), voor zowel de controle groep (klas A: [Tabel 1](#)) als voor de interventie groep (klas B: [Tabel 2](#)).

Beschrijving der kolommen:

- Kolom 1 ('Nr'): leerling nummer. De namen van de leerlingen zijn geanonimiseerd.
- Kolom 2-21 ('1-20'): de individuele beantwoording van de 20 vragen.
- Kolom 22 ('Score'): de score van een leerling wordt gegeven als het gemiddelde over de twintig vragen van de absolute waarde van de afwijking van een voorkeursantwoord:

$$S := \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} |v(i) - v_i|$$

Hierbij is $v(i)$ het antwoord (waarden: 1...5) op vraag i en v_i (waarden: 1...5) het voorkeursantwoord op vraag i . N.B.: een score wordt als beter geïnterpreteerd indien S een kleiner getal is.

- Kolom 23 ('Cijfer'): het cijfer op het eindrapport 5-VWO per leerling.

Beschrijving der rijen:

- R1: het voorkeursantwoord op de vraag (rood gekleurd)
- R2: statistische spreiding (per klas) van de gegeven antwoorden om het voorkeursantwoord R1 (rood gekleurd)
- R3: Het gemiddelde van de gegeven antwoorden per vraag

- R4: de spreiding om het gemiddelde R3

Op de plekken waar een geel veld is, heeft de betreffende leerling niets ingevuld. Hiermee is rekening gehouden bij de berekening van S.

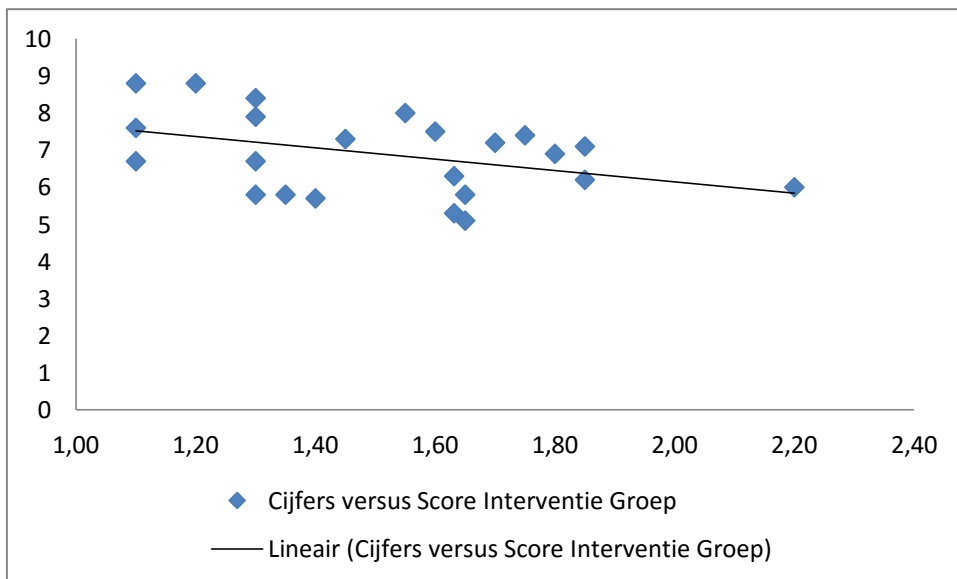
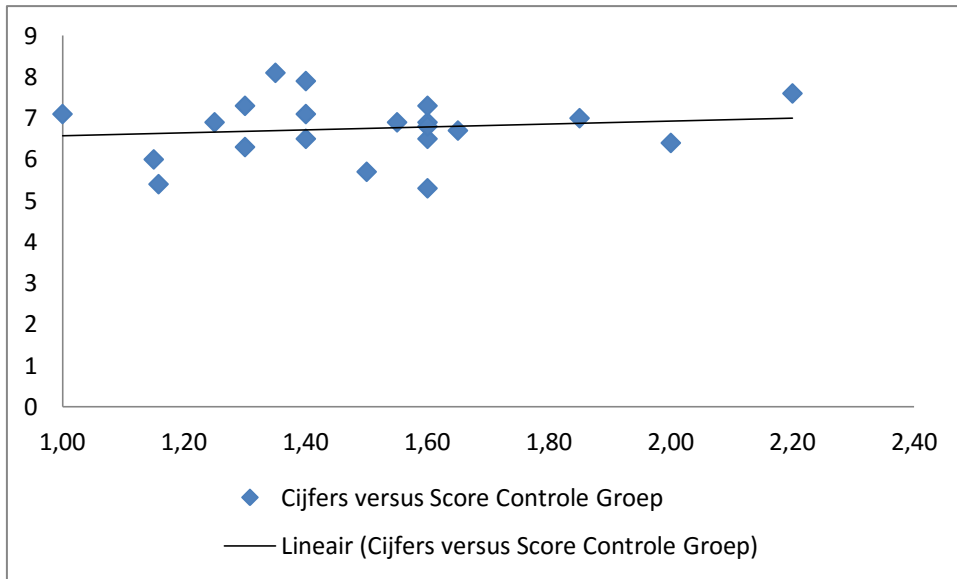
3.3.3 Validiteit en betrouwbaarheid van het onderzoek

Er zijn een aantal elementen die onderzoeken betrouwbaar en valide maken (van der Donk & van Lanen, 2013). Ten eerste de validiteit van een onderzoek, waarbij onderzocht wordt of er eventuele systematische fouten aanwezig zijn in de resultaten. Ten tweede de betrouwbaarheid van het onderzoek, waarbij het van belang is om zo klein mogelijke meetfouten te verkrijgen.

Om te onderzoeken of het juist invullen van de questionnaire correleert met het niveau van de leerling, is het rapportcijfer uit VWO-5 uitgezet tegen de gemiddelde score van een leerling op de questionnaire. Een bewezen correlatie is een aanwijzing voor de validiteit van de questionnaire. De resultaten zijn weergegeven in [Figuur 3-1](#). Men verwacht een kleinere S (d.w.z. een betere Score) bij een hoger niveau van een leerling (hoger cijfer voor het eindrapport). Er is correlatie bij de interventie groep (tweede figuur, Pearson correlatie coëfficiënt 0,4) en geen tot lichte anticorrelatie bij de controle groep (eerste figuur, Pearson correlatie coëfficiënt 0,1). Een afdoende verklaring voor het laatste is op dit moment niet te geven. Mogelijk speelt een rol dat in de controle groep hoofdzakelijk meisjes zaten (80%) en in de interventie groep hoofdzakelijk jongens (ook 80%). Dit zou enige invloed kunnen hebben op de validiteit van het onderzoek.

De spreiding om de trendlijnen in [Figuur 3-1](#) geeft een indruk van de nauwkeurigheid van het onderzoek. In beide gevallen – klas A en B – is de spreiding om de trendlijn 1,4 punt (zie [Appendix E](#)). Dit lijkt aan de grote kant. Een afdoende verklaring is hiervoor niet te geven. Het zou een aanwijzing kunnen zijn om de vragen uit de questionnaire nog eens tegen het licht te houden en kritisch te onderzoeken op hun eenduidige beantwoordbaarheid. Tijdens het opzetten van de questionnaire is veel moeite gedaan om de vragen te sturen naar een van de mogelijke antwoorden 1 t/m 5. Zo zijn een aantal vragen duidelijk te beantwoorden met 'helemaal mee eens' en ; helemaal mee oneens'. Andere vragen zijn, net zoals geldt voor interpretaties in de kwantumtheorie, niet eenduidig te beantwoorden. Mogelijk heeft de intrinsieke onzekerheid m.b.t. interpretaties hier een rol gespeeld.

Figuur 3-1: correlatie juist invullen questionnaire met niveau van leerlingen. Klas A (controle), Klas B (interventie)



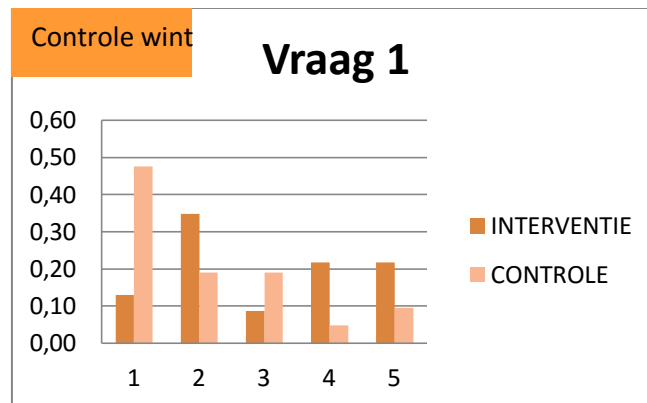
4 Resultaten

“Een elektron kan met zichzelf interfereren, want een elektron kan op meerdere plaatsen tegelijk zijn”.
(Commentaar van leerling 19 uit klas A over het TSE)

4.1 Draagt het gebruik van een applet bij tot het beter aanleren van kwantumconcepten?

In [Appendix F](#) zijn de relatieve frequenties van de antwoorden per vraag voor zowel de controle groep (klas A) als de interventie groep (klas B) weergegeven. In [Appendix G](#), zijn deze relatieve frequenties per vraag nog eens visueel in staafdiagrammen weergegeven, samen met het voorkeursantwoord op de vraag. Een voorbeeld hiervan (vraag 1), wordt beneden in [Figuur 4-1](#) gegeven.

Figuur 4-1: de relatieve frequenties van de antwoorden op vraag 1 uit de questionnaire. In blauw is het voorkeursantwoord gegeven, en tevens is aangegeven of klas A (controle) of klas B (interventie) de vraag gemiddeld beter heeft ingevuld.



Het blijkt dat de interventie groep (klas B) de vragen iets meer bevestigend - d.w.z. neigend naar “helemaal mee eens” - heeft beantwoord dan de controle groep (klas A); gemiddelde¹¹ 2,5 versus 2,7. De significantie van dit verschil is echter verwaarloosbaar. Mogelijk dat de observatie dat klas B veel meer jongens bevat dan meisjes en klas A meer meisjes dan jongens, hier een rol speelt.

De gemiddelde spreiding¹² om het gemiddeld gegeven antwoord is in beide gevallen hetzelfde: 1,4. Hier dus wederom geen verschil tussen de twee klassen.

Tabel 4-1 hieronder, geeft per klas de statistische spreiding van de gegeven antwoorden (rijen gelabeld “R2 Passief” en “R2 Actief”) om de voorkeursantwoorden die gegeven zijn in rij “R1” van de tabellen **Tabel 1** en **Tabel 2** uit [Appendix E](#). Men zou een dergelijke spreiding kunnen definiëren als de mate van juistheid van het antwoord die een gehele klas heeft gegeven op een bepaalde vraag. Hoe kleiner de spreiding, des te juist het antwoord door de betreffende klas is gegeven. Dit maakt het dus

¹¹ Deze gemiddelden zijn berekend door het gemiddelde van de getallen uit rij R3 uit **Tabel 1** en **Tabel 2** uit [Appendix E](#) te berekenen.

¹² Deze spreidingen zijn berekend door het gemiddelde van de getallen uit rij uit **Tabel 1** en **Tabel 2** uit [Appendix E](#) te berekenen.

mogelijk om per vraag te beslissen welke klas een vraag juist heeft ingevuld. Waar in de tabel een geel veld staat, is het gemiddelde antwoord juist voor de ene klas dan voor de andere klas.

*Tabel 4-1: Vergelijking tussen de twee klassen van de juistheid van de gegeven antwoorden
De letters P en M geven aan waar Preconcepties/Misconcepties gevonden zijn.*

Vraag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Pre/Mis					P	M		M	P	M	M			P	M		M			
R2 Passief	1,8	2,0	1,4	2,0	2,8	2,6	1,5	1,7	1,4	2,4	2,0	2,6	1,6	1,8	2,9	3,3	1,9	1,4	1,8	1,9
R2 Actief	2,5	2,7	1,5	1,6	3,4	3,2	1,8	1,3	1,8	2,3	2,5	1,1	1,0	1,3	3,0	1,2	3,2	1,5	1,6	2,4

We zien dat, na vergelijking van de spreidingen per vraag in Tabel 4-1, de controle groep (klas A) in twaalf op de twintig vragen prevalerend is geweest boven de interventie groep (klas B). In het volgende hoofdstuk zal dit opmerkelijke resultaat verder besproken worden.

In Appendix G is er tevens een bespreking gegeven van de bijzonderheden die zijn waargenomen in de gegeven antwoorden waarbij in de vraag een extra toelichting was vereist.

Het antwoord op de eerste hoofdvraag kan nu aan de hand van de resultaten uit Tabel 4-1 worden gegeven. Dit onderzoek - d.w.z. met dit TSE-applet, met deze vragen en met deze indeling van de klassen en met deze aantallen leerlingen - geeft aan dat de controle groep (klas A) het beter doet dan de interventie groep (klas B). Het gebruik van het TSE-applet is volgens de questionnaire dus gemiddeld genomen antiproductief m.b.t. het begrijpen van kwantumconcepten. Dit is een opmerkelijk resultaat, aangezien vooraf gedacht werd dat dit andersom zou zijn. In het volgende hoofdstuk wordt een mogelijke verklaring hiervoor gegeven.

4.2 Welke misconcepties zijn er tijdens het onderzoek naar voren gekomen?

De tweede onderzoeksvraag wordt beantwoord door het commentaar van individuele leerlingen te bestuderen bij die vragen uit de questionnaire waar stond: 'Ik kies dit antwoord omdat'. Dit zijn de vragen 1, 2, 7, 8, 9, 10, 11, 16, 17, 18, 19. Er zijn, na analyse, een aantal misverstanden en misconcepties naar boven gekomen.

Elektronen interfereren met elkaar: er zouden meerdere elektronen tegelijkertijd in het experiment aanwezig moeten zijn om het interferentiepatroon te veroorzaken. Dit is onjuist aangezien een enkel elektron zich als een ('volledige') golf kan gedragen. In zekere zin interfereert een elektron in het experiment dus steeds met zichzelf.

Elektronen bewegen zich voort in een baan met de vorm van een golf: men haalt hierbij de eigenschappen van de waarschijnlijkheidsgolf ψ en de fysieke beweging van een deeltje door elkaar. Een elektron dat zich in een rechte lijn voortbeweegt van het ene punt naar het andere punt, maakt hierbij geen trillende beweging.

De snelheid van de waarschijnlijkheidsgolf is niet gelijk aan die van het materiële deeltje: ieder deeltje op microscopisch niveau heeft een geassocieerde waarschijnlijkheidsgolf die met het deeltje meebeweegt in de ruimte. Sommige leerlingen denken dat deze golf los staat van het individuele deeltje en zich met de snelheid van het licht (of nog sneller) voortplant.

Kwantumtheorie is onbegrijpelijk: de kwantumtheorie is, wellicht op de evolutietheorie na, een van de succesvolste theorieën ooit bedacht. De theorie voorspelt bijvoorbeeld fysische constanten (o.a. de

zogenaamde koppelingsconstante g voor de interactie tussen elektronen en het elektromagnetische veld) tot op 12 decimalen nauwkeurig. Het is een misverstand te denken dat de kwantumtheorie onbegrijpelijk is. De kwantumtheorie die de microwereld beschrijft is vooral wiskundig prima. Helaas wordt dit misverstand in stand gehouden door een even onnauwkeurig taalgebruik van natuurkundigen. Het is juist om te zeggen dat de kwantumwereld onbegrijpelijk is; de bijbehorende verschijnselen zijn bizar en anti-intuïtief.

Alles is fuzzy op microscopisch niveau: niet alles is fuzzy op microscopisch niveau. Zo kan de plaats in principe oneindig nauwkeurig gemeten worden, maar met als prijs dat de impulsonebepaaldheid oneindig toeneemt. Hetzelfde geldt voor het paar energie en tijd. Alhoewel de interventie groep zich in het practicum heeft beziggehouden met de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg, heeft de groep toch veel last van dit misverstand/misconcept. De onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg blijft lastig te begrijpen en toe te passen in contexten.

De golffunctie beschrijft alleen de waarschijnlijkheid van plaats: de golffunctie bevat ook informatie over andere natuurkundige grootheden zoals, impuls en energie.

Atomen bestaan niet: een paar leerlingen komen met deze boude uitspraak n.a.v. de interpretatie van Bohr. Atomen bestaan weldegelijk, want hun collectieve effect is absoluut merkbaar. De vraag is of *individuele* atomen bestaan. Bohr stelt zich op het standpunt dat je ernstige twijfels moet hebben over het bestaan van een geselecteerd, individueel atoom zolang je er geen metingen aan doet.

De maan bestaat niet als je er niet naar kijkt: een enkele leerling komt met deze onjuiste uitspraak naar aanleiding van de lessenreeks. Het bestaan van onze maan lijdt geen twijfel, omdat je het op een objectieve manier indirect kunt meten. Anderzijds zegt ons gezond verstand dat er een voorbeeld van een maan moet zijn van een specifieke planeet die om een specifieke ster draait die zich in een ver melkwegstelsel bevindt. We hebben echter nog geen foton afkomstig van deze maan ontvangen, en volgens Bohr bestaat deze maan dan ook niet. Er zit in die zin wel enige waarheid in de cynische opmerking van Einstein.

Een deeltje is zowel een materieel deeltje als een golf: dit is wederom een voorbeeld van onjuist taalgebruik in de kwantumtheorie. Materiële deeltjes kunnen zich gedragen als golf of als deeltje naar gelang de opzet van het experiment. Een deeltje is geen golf.

Een deeltje splitst zich in het TSE in tweeën en komt later weer bij elkaar: hierbij wordt het gedrag van golven en het gedrag van deeltjes door elkaar gehaald. Het TSE vraagt naar de golfeigenschappen van deeltjes en niet naar hun deeltjeseigenschappen. Je kunt in die zin in de kwantumtheorie bij experimenten niet hinken op twee gedachten.

Elk individueel foton heeft zijn eigen golffunctie ψ : hierbij wordt het karakter van fotonen en materiële deeltjes door elkaar gehaald. Een foton heeft weliswaar een golffunctie maar deze is elektromagnetisch van aard en is geen materiële golffunctie.

Het interferentiepatroon bij het TSE ziet er uit als steeds anders uit omdat geen enkel experiment hetzelfde is: experimenten in de kwantumtheorie zijn steeds hetzelfde als alles op identieke wijze is geprepareerd. De uitkomsten, echter, zijn statistisch van aard en kunnen steeds anders zijn. Globaal zien de interferentiepatronen bij herhaling hetzelfde er uit. Op detailniveau niet.

Kwantum experimenten zijn 100% subjectief van aard: men denkt dat dit zo is omdat kwantumobjecten zich gedragen naar gelang de aard van het experiment dat door de experimentator is opgesteld; 'wat je vraagt dat krijg je'. Dat is in de kwantumtheorie wel zo, maar de resultaten van het experiment worden door de natuur steeds op een objectieve, statistische manier aan de waarnemer gepresenteerd.

Er bestaat in wezen geen verschil tussen fotonen en materiële deeltjes: men denkt zo omdat beide zowel golf- als deeltjeseigenschappen in experimenten kunnen vertonen. De verschillen tussen materiële deeltjes en fotonen zijn echter legio: fotonen planten zich voor met de lichtsnelheid, hebben geen massa en zijn (gezamenlijk) elektromagnetisch van aard.

Deeltjes in de microscopische kwantumwereld zijn realistisch voor te stellen m.b.v. tekeningen: dit is maar ten dele waar. Er zijn een aantal leerlingen die enigszins misleid worden door bijvoorbeeld de schematische tekeningen die het atoommodel van Bohr voorstellen. Hier blijft het beeld hangen dat je op microscopisch niveau atomen als het ware kunt 'zien' als een klein zonnestelsel van kern met daarom heen draaiende elektronen. Dat is maar ten dele waar. Door de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg wordt alles waziger naarmate je inzoomt op het individuele atoom.

Hier volgt nog een samenvatting van waar de misconcepties het meest voorkomen.

PA: de misconceptie komt gelijkelijk voor in zowel de passieve als de actieve klas.

P: de misconceptie komt voornamelijk voor in de passieve klas, d.w.z. zonder applet gebruik.

A: de misconceptie komt voornamelijk voor in de actieve klas, d.w.z. met applet gebruik.

Tabel 4-2: waar zijn de misconcepties gevonden?

Misconceptie	PA	P	A
<i>Elektronen interfereren met elkaar</i>			X ¹³
<i>Elektronen bewegen zich voort in een baan met de vorm van een golf</i>	X		
<i>De snelheid van de waarschijnlijkheidsgolf is niet gelijk aan die van het materiële deeltje</i>		X	
<i>Kwantumtheorie is onbegrijpelijk</i>	X		
<i>Alles is fuzzy op microscopisch niveau</i>	X		
<i>De golffunctie beschrijft alleen de waarschijnlijkheid van plaats</i>	X		
<i>Atomen bestaan niet</i>	X		
<i>Een deeltje is zowel een materieel deeltje als een golf</i>	X		
<i>De maan bestaat niet als je er niet naar kijkt</i>	X		
<i>Een deeltje splitst zich in het TSE in tweeën en komt later weer bij elkaar</i>			X ¹³
<i>Elk individueel foton heeft zijn eigen golffunctie ψ</i>	X		
<i>Het interferentiepatroon bij het TSE ziet er steeds anders uit omdat geen enkel experiment hetzelfde is</i>			
<i>Kwantum experimenten zijn 100% subjectief van aard</i>	X		
<i>Er bestaat in wezen geen verschil tussen fotonen en materiële deeltjes</i>	X		
<i>Deeltjes in de microscopische kwantumwereld zijn realistisch voor te stellen m.b.v. tekeningen</i>	X		

¹³ Deze misconcepties zijn aan elkaar gerelateerd.

5 Discussie en conclusie

“Deeltjes zijn geen deeltjes zoals ik dacht”.
(Commentaar van leerling 15 uit klas B over *Kwantummechanica*)

5.1 Bespreking van de antwoorden op de onderzoeksvragen

Het antwoord op de eerste onderzoeksvraag is volgens dit onderzoek negatief en enigszins verrassend. De motivatie voor dit onderzoek was dat een (sociaal) constructivistische benadering van het praktische gedeelte juist zou bijdragen tot een beter begrijpen van concepten en het voorkomen van misconcepten. Indien men mogelijke twijfels over de validiteit en betrouwbaarheid van het onderzoek (3.3.3) terzijde legt en aanneemt dat deze in orde zijn, dan is een mogelijke verklaring voor het significant negatieve antwoord het volgende. Het kan zijn dat de kwantummechanische concepten dermate abstract zijn dat het praktisch ermee bezig zijn in de vorm van een applet verwarrend werkt. Voor de golf functie is het bijvoorbeeld niet duidelijk wat de ontologie ervan is: bestaat de golf functie als een fysische entiteit of is het alleen een epistemologisch doorgeefluik dat informatie over de wereld achter het kwantum aan de waarnemer verschaft. Intuïtief moeten leerlingen deze verwarring aanvoelen en het daadwerkelijk zien van een golf functie in het TSE - waarbij het onduidelijk is of hij wel of niet bestaat - kan een zekere verwijdering veroorzaken van het concept golf functie.

Een aantal misconcepties en/of misverstanden die met betrekking tot de tweede onderzoeksvraag naar voren komen, zijn bekend uit de literatuur (Koopman, 2011; Ireson, 2000). Zo wordt daar de misconceptie genoemd dat elektronen in een experiment met elkaar moeten interfereren om het interferentiepatroon zichtbaar te maken. Ook het in tweeën splitsen van het elektron en het voortbewegen van een deeltje in de vorm van de baan van een golf is als misconceptie bekend uit de literatuur.

Nieuw gevonden misconcepties in dit onderzoek zijn:

- De snelheid van de waarschijnlijkheidsgolf is niet gelijk aan die van het materiële deeltje.
- Een deeltje is zowel een materieel deeltje als een golf.
- Kwantum experimenten zijn 100% subjectief van aard.
- Elk individueel foton heeft zijn eigen golf functie ψ .
- Er bestaat in wezen geen verschil tussen fotonen en materiële deeltjes.

De volgende zaken kunnen worden benoemd als misverstanden en zijn minder ernstig dan bovenstaande misconcepties. Ze zijn terug te voeren zijn op slordig taalgebruik.

- Kwantumtheorie is onbegrijpelijk.
- Alles is fuzzy op microscopisch niveau.
- Het interferentiepatroon bij het TSE ziet er steeds anders uit omdat geen enkel experiment hetzelfde is.

De volgende zaken zijn te vatten onder de noemer kennistheoretische misverstanden betreffende de aard van de werkelijkheid. Deze kunnen ontstaan zijn door de inhoud van de theoretische lessen, waarbij sterk de nadruk is komen te liggen op wat wel en wat niet bestaat. Anderzijds zijn het wel typische zaken die ten grondslag hebben gelegen aan de problemen met de kwantumtheorie; ze kunnen dus ook ontstaan zijn in de kritische, weldenkende geesten van een aantal leerlingen. Het betreft:

- Atomen bestaan niet.
- De maan bestaat niet als je er niet naar kijkt.

- Deeltjes in de microscopische kwantumwereld zijn realistisch voor te stellen m.b.v. tekeningen. Als laatste blijft de misvatting over dat de golffunctie alleen de waarschijnlijkheid van plaats beschrijft. De leerlingen in de bovenbouw van het VWO hebben nog te weinig kennis om dit daadwerkelijk beter te kunnen weten. Dit komt pas aan de orde op het college kwantumtheorie op universiteiten of hogescholen.

Verder worden bijna alle misconcepties gelijkelijk geconstateerd in zowel de actieve als de passieve groep (zie Tabel 4-2). Het gebruik van het applet heeft daar dus geen invloed. Alleen de misconceptie *“een deeltje splitst zich in het TSE in tweeën en komt later weer bij elkaar”* wordt meer in de actieve groep geconstateerd. De misconceptie *“de snelheid van de waarschijnlijkheidsgolf is niet gelijk aan die van het materiële deeltje”* wordt meer in de passieve groep geconstateerd. Het laatste is te begrijpen doordat in het applet de golf duidelijk meeloopt met de beweging van het deeltje. Een verklaring voor het eerste kan op dit moment niet gevonden worden.

5.2 Verdere discussie van de betrouwbaarheid van het onderzoek

Met betrekking tot de betrouwbaarheid van het onderzoek nog het volgende gezegd worden.

In het onderzoek is verder niet ingegaan op de kwaliteit en de inhoud van de documentaire die aan de controle groep is getoond. In deze documentaire wordt dieper ingegaan op de moeite die Einstein had met de filosofische aspecten van de kwantumtheorie. Dit kan een reden zijn waarom de controle groep de eerste zeven vragen anders (en gemiddeld beter) heeft ingevuld dan de interventie groep. Een les die hieruit kan worden getrokken is dat een aantal vragen uit de questionnaire anders/scherper gesteld zouden moeten worden, zodanig dat ze niet te veel leunen op stof uit ofwel de documentaire ofwel het TSE. Een andere optie is om de documentaire volledig weg te laten en het TSE applet als docent frontaal aan de controle groep te presenteren, om zodoende ongewenste effecten bij de vergelijking tussen de twee klassen te neutraliseren. Het enige verschil wat dan overblijft is dat de interventiegroep hands-on met het TSE bezig is en de controle groep niet. Dit is iets voor een mogelijk vervolgonderzoek.

Na het geven van de lessen en het verwerken van de resultaten heeft voortschrijdend inzicht verder aangetoond dat de betrouwbaarheid en validiteit van dit onderzoek verbeterd kunnen worden.

De elementen die verbetering dienen te ondergaan zijn o.a. de heterogeniteit en grootte van de twee onderzoeksgroepen. Er is geen invloed geweest op de samenstelling van de klassen. De klassen waren reeds aan het begin van het jaar samengesteld en konden niet uit elkaar getrokken worden. Zo waren de klassen vrij homogeen van samenstelling: klas A (de controle groep) bestond uit 80% meisjes en klas B (de interventie groep) uit 80% jongens. Verder bestonden beide klassen uit iets meer dan twintig leerlingen. Dit is te weinig om werkelijk harde statistische uitspraken te doen. Eventuele vervolgonderzoeken dienen veel meer heterogene klassen erbij te betrekken.

Verder kan de kwaliteit van de vragen in de questionnaire verbeterd worden. Er zijn een aantal vragen die in een volgend onderzoek scherper gesteld of zelfs weggelaten zouden kunnen worden, aangezien ze in hun huidige vorm niet bijdragen tot detecteren van een reëel verschil tussen de twee klassen. Zo zijn een aantal onderwerpen (bijvoorbeeld in de vragen 1-4) die beter in de controle groep aan de orde gekomen zijn dan in de interventie groep. Ook is er de vraag over het Compton effect (vraag 13). Dit onderwerp kwam in beide klassen niet aan bod en had weggelaten moeten worden. Bij een

mogelijke herhaling van het onderzoek, dienen alle vragen opnieuw onder de loep genomen te worden en beoordeeld te worden op hun daadwerkelijke en zuivere relevantie.

Ook de kwaliteit van de lessen is van belang geweest. Door de onderzoeker is zijn uiterste best gedaan om de lessen zo levendig mogelijk te maken. Vooral door energiek en communicatief voor de klas te staan met een open houding. Echter, geen enkele les is hetzelfde. Door materiaal (de reader) aan te bieden die de leerlingen dezelfde achtergrondinformatie levert, is er gepoogd beide klassen enigszins gelijk te trekken in de kwaliteit van de overgedragen kennis.

5.3 Conclusie

Aannemend dat het onderzoek valide en betrouwbaar is, toont het aan dat het gebruik van een applet om kwantumconcepten beter aan te leren gemiddeld genomen antiproductief is.

De antwoorden op de open vragen uit de questionnaire laten een aantal misconcepten c.q. misverstanden zien die ook al uit de literatuur bekend zijn, maar ook enkele nieuwe, variërend van minder ernstig tot ernstig. Docenten die kwantummechanica in de bovenbouw van het voortgezet onderwijs doceren, kunnen deze kennis gebruiken om de misconcepten te corrigeren tijdens hun lessen.

De kwaliteit van de vragen uit de questionnaire kan verbeterd worden. Een eventuele ijking van de correlatie tussen de gemiddelde cijfers van leerlingen en de mate van juistheid van het invullen der vragen kan de validiteit van het onderzoek een meer gefundeerde basis geven.

5.4 Reflectie aan de hand van lesobservaties

Uit de observaties die tijdens de gegeven lessen zijn gedaan, maar ook uit verdere bestudering van een aantal questionnairevragen, zijn zaken naar voren gekomen die aanwijzingen bevatten over hoe het applet door natuurkundedocenten aangewend kan worden om kwantumconcepten beter aan te laten leren. Deze zaken zijn geen onderdeel van de onderzoeksvragen, maar ze zijn wel de moeite van vermelding waard.

Ten eerste is er de observatie dat er situaties zijn waarin het gebruik van het applet voordelig is of kan zijn, namelijk in het voorkomen van een misconceptie of in het expliciet maken van een potentiële misconceptie. Een voorbeeld is vraag 11 over de snelheid van de ψ -golf; er wordt in het applet duidelijk aangegeven dat de ψ -golf de snelheid van het bijbehorende deeltje heeft. Een ander voorbeeld is vraag 12 over het herhalen van het TSE met fotonen: het interferentie patroon ziet er globaal hetzelfde uit, maar op detailniveau niet. Belangrijk hierbij is dat de leerlingen er tijdens het practicum opmerkzaam gemaakt worden door de docent.

Er zijn echter ook situaties aan te duiden waarin het gebruik van applets nadelen heeft. Misconcepties kunnen worden versterkt: vraag 17 waar het gaat over het nodig zijn van meerdere elektronen om een interferentiepatroon te maken. De interventiegroep geeft hier vaker het verkeerde antwoord.

In het algemeen¹⁴ kunnen applets worden aangewend voor het expliciet maken van misconcepten aan leerlingen, maar het applet moet dit dan wel kunnen laten zien.

¹⁴ Ik extrapoleer hier mijn discussie over het TSE-applet naar gebruik van applets in het algemeen.

Ten tweede kan het applet tot dieper leren leiden, maar wederom dient de docent dit vrijwel altijd expliciet te maken aan leerlingen tijdens het gebruik. Vooral met vraag 16 (over het niet 't zelfde eruit zien van het interferentiepatroon op detailniveau na herhaling van het experiment) is er een situatie waarin dieper leren door het applet mogelijk gemaakt wordt. De oplettende leerlingen hebben tijdens het practicum het verschil tussen de interferentiepatronen al opgemerkt, maar het was nodig dit ook expliciet aan de minder oplettende leerlingen duidelijk te maken.

Gezien bovenstaande observaties verdient het aanbeveling om als docent een gemotiveerde keuze te maken van het applet dat tijdens het practicum gebruikt gaat worden. Belangrijkste vraag is: wat wil je als docent expliciet maken aan leerlingen? Het beste is indien de docent zelf een eigen handleiding schrijft waarin hij/zij de nadruk legt op wat hij/zij tijdens het practicum wil benadrukken. De uitgebreidheid c.q. parametriseerbaarheid van het applet moeten daar wel de mogelijkheid toe geven.

Nawoord en dank

Ik heb het als uitermate prettig ervaren om op het Rythovius College te Eersel het onderzoek uit te voeren. Door de docent van 6 VWO, Joep Mennes, ben ik vriendelijk ontvangen en begeleid. De leerlingen in de klassen hebben allen, op een uitzondering na, flink hun best gedaan en serieuze interesse getoond in het onderzoeksonderwerp en de uitslag van het onderzoek (enige weken later door mij gepresenteerd).

Het opzetten en geven van de lessenreeks was plezierig. Het schrijven van de historische inleiding was gewoonweg een genot en het opzetten van het practicum en het begeleiden ervan leerzaam.

Het onderzoek zelf is echter enigszins moeizaam verlopen. Dit komt enerzijds door het onderwerp - kwantumwereld en kwantumtheorie: het zijn geen eenvoudige zaken - maar anderzijds door de moeilijkheden die ik heb ondervonden in het opzetten van een goede questionnaire en het maken van betrouwbare en valide vergelijking tussen controle en interventie groep. Uit de tekst van het verslag is duidelijk dat, bij een herhaling van het onderzoek, voortschrijdend inzicht me zou doen besluiten om de questionnaire nog eens geheel tegen het licht te houden en ook niet meer te kiezen voor de BBC-documentaire als vervangend lesmateriaal voor het TSE. Een eventuele ijking van de questionnaire met schoolcijfers gebruik makend van een grote testgroep zou meer vertrouwen in het eindantwoord kunnen geven.

Verder wil ik Lesley de Putter van de ESOE bedanken voor haar deskundig advies. Zonder haar was het verslag in deze vorm niet tot stand gekomen. Ook dank aan Douwe Beijaard die een laatste duw in de goede richting heeft gegeven zodat het werk afgemaakt kon worden.

Als laatste een uitstekende samenvatting van leerling 3 uit klas B van wat hij over kwantumtheorie en de kwantumwereld in de lessenreeks heeft geleerd:

- i. *“Bij de Onzekerheidsrelatie van Heisenberg geldt: als je de plaats zeer nauwkeurig hebt bepaald, is de impuls van het deeltje zeer onnauwkeurig en andersom”.*
- ii. *“Deeltjes kunnen zowel deeltjes- als golfeigenschappen hebben”.*
- iii. *“Elk deeltje heeft zijn eigen golf functie Psi”.*
- iv. *“De golf functie Psi geeft de kans om een deeltje ergens aan te treffen”.*

Samenvatting van het onderzoek

In september 2015 is er een vergelijkend onderzoek uitgevoerd in twee VWO-6 klassen naar verschillen in het aanleren van enkele concepten uit de kwantumwereld met behulp van een computer applet. Een computer applet is te vergelijken met een applet dat draait op een mobiele telefoon. Applets voor desktop computers zijn geschreven in de computertaal Java en blinken o.a. uit door hun goede visualisatie en simulatie van reële (fysische) situaties waardoor ze geschikt kunnen als educatief materiaal op middelbare scholen.

Het onderzoek werd uitgevoerd aan het *Rythovius College te Eersel*.

De kwantumconcepten waarop gefocust is zijn het *kwantum meetproces*, de *golf-deeltjes dualiteit*, en het *karakter van de golf-functie*. Alleen het tweede kwantumconcept maakt deel uit van het nieuwe natuurkunde curriculum ([Staatscourant, 2012](#)). Er is voor deze drie onderwerpen gekozen omdat ze alle drie een hoofdrol spelen in de historische introductie van de kwantumtheorie die voor de eerste twee lessen zijn gepland. Bovendien komen ze alle drie aan bod bij het gebruikte applet. Er is gekozen voor een applet dat het Twee Spleten Experiment voor deeltjes simuleert.

Het onderzoek bestond uit een ontwerp van een inleidende lessenreeks over kwantumtheorie, waarbij gebruik gemaakt werd van een historische context, en uit een vergelijkend onderzoek tussen de twee klassen. Met het onderzoek is geprobeerd een antwoord te krijgen op de volgende vragen:

1. *Kan het gebruik van een applet ertoe bijdragen dat leerlingen van de bovenbouw van het VWO kwantumconcepten beter aanleren?*
2. *Welke misconcepties ontstaan of komen er naar boven door het gebruik van het applet en welke misconcepties ontstaan zonder het gebruik van het applet?*

De indeling van de lessenreeks was als volgt. Klas A (de controle groep) werd beschouwd als volledig **passief**: twee lessen over de genoemde kwantumconcepten gevolgd door twee lessen met een BBC-documentaire ([Al-Khalili, 2014](#)) over kwantumtheorie van totaal ruim een uur. Klas B (de interventie groep) werd beschouwd als voornamelijk **actief**: twee volledige lessen over de genoemde kwantumconcepten, gevolgd door een applet practicum van iets minder dan twee uur. Beide klassen hadden een historische introductie van twee lessen gemeen, en een gemeenschappelijke toets/questionnaire van twintig vragen gedurende een vijfde les.

Uit de resultaten blijkt dat, als men gaat kijken naar de mate van juistheid van invullen van de vragen, de controle groep beter heeft gescoord dan de interventie groep. Het gebruik van een applet om kwantumtheoretische aspecten aan te leren in de bovenbouw van het VWO werkt volgens dit onderzoek dus antiproduktief.

In het beantwoorden van de open vragen uit de toets/questionnaire zijn misconcepties en/of misverstanden naar voren gekomen die enerzijds bekend zijn uit de literatuur, maar anderzijds ook nieuw zijn.

Uit de lesobservaties – geen onderdeel van het onderzoek maar waarvan de resultaten toch de moeite waard van vermelden zijn – is gebleken dat het gebruikte applet meerwaarde zou kunnen hebben bij het

expliciet maken of voorkomen van misconcepties. Verder is er ook een aanwijzing gevonden dat het applet zou kunnen bijdragen tot dieper leren, maar dan alleen in een heel specifieke situatie. Ook is er een aanwijzing gevonden dat het applet misconcepties kan introduceren.

Het verdient aanbeveling om als docent een gemotiveerde keuze te maken voor het applet dat tijdens het practicum gebruikt gaat worden. Belangrijke vraag is: wat wil je als docent expliciet maken aan leerlingen? Het beste is indien de docent zelf een eigen handleiding schrijft waarin hij/zij de nadruk legt op wat hij wil overbrengen. De leraar dient op strategische momenten het computer practicum stil te leggen om belangrijke leerpunten nadrukkelijk aan te wijzen. Dit ter voorkoming van misconcepties of het faciliteren van dieper leren bij de leerlingen.

Literatuur

- Al-Khalili, J. (2014). *The secrets of quantum physics, part 1: Einsteins nightmare*. Opgeroepen op september 5, 2015, van Documentary Area:
<http://www.documentaryarea.com/player.php?title=Einsteins%20Nightmare>
- Baggott, J. (1992). *The meaning of quantum theory*. Oxford: Oxford University Press.
- Baser, M. (2006). Promoting conceptual change through active learning using open source software for physics simulations. *Australian journal of educational technology* , 22(3), 336-354.
- Bohr, N. (1958). *Atomic physics and human knowledge*. New York: John Wiley and Sons.
- Bruner, J. (1961). The act of discovery. *Harvard Educational Review* , 21-31.
- Carey, S. (1986). Cognitive science and science education. *American Psychologist* , 41(0), 1123-1130.
- Chin, C., & Brown, D. (2000). Learning in science: a comparison of deep and surface approaches. *Journal of research in science teaching* , 37(2), 109-138.
- Dewey, J. (1910/1976). Science as subject-matter and as method. In J. Boyston (Ed.), *John Dewey: the middle works, 1899-1924, Vol 6* (pp. 69-79). Carbondale, IL: Southern Illinois University Press.
- Driver, R., & Oldham, V. (1986). A constructivist approach to curriculum development in science. *Studies in science education*, 13 , 5-12.
- Ertmer, P., & Newby, T. (1993). Behaviorism, cognitivism and constructivism: comparing critical features from an instructional design perspective. *Performance improvement quarterly*, 6(4) , 50-72.
- Fendt, W., Koops, T., & Russeler, H. (2015, December 2). *Natuurkundige Java Applets*. Opgehaald van <http://www.walter-fendt.de/ph14nl/>
- Feynman, R. (1985). *QED: de zonderlinge theorie van licht en materie*. Amsterdam: Aramth Uitgevers.
- Feynman, R. (1965). *The character of a physical law*. Cambridge MA: The MIT press.
- Feynman, R., Leighton, R., & Sands, M. (1965). *The Feynman lectures on physics, vol 3*. Reading MA: Addison-Wesley Publishing Company.
- Freudenthal, H. (1973). *Mathematics as an educational task*. Dordrecht: Kluwer Academic.
- Hiley, B., & Peat, F. (1987). *Quantum implications: Essays in honour of David Bohm*. London: Routledge.
- Ireson, G. (2000). The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, 35(1) , 15-21.
- Koopman, L. (2011). *A development Research on Introducing the Quantum Mechanics Formalism at University Level (Phd thesis)*. Opgeroepen op september 2015, van University of Amsterdam:
<http://hdl.handle.net/11245/1.337259>

- Kuhn, T. (1970). *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Kuiper, W., Folmer, E., Ottevanger, W., & Bruning, L. (2011). *Curriculumevaluatie bètaonderwijs tweede fase: Examenpilot Nieuwe Natuurkunde havo/vwo 2007-2010*. Enschede: SLO (Nationaal Expertisecentrum Leerplanontwikkeling).
- Laplace, P. (1814). *Essai philosophiques sur les probabilités*. Courcier.
- Markle, S., & Tiemann, P. (2006). Problems of conceptual learning. *British Journal of Educational Technology*, 1(1) .
- Mishra, P., & Koehler, M. (2006). Technological Pedagogical Content Knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, 108(6) , 1017-105.
- Ogborn, J. (2011). *A first introduction to Quantum Behaviour*. Opgeroepen op september 2015, van Research Gate:
http://www.researchgate.net/publication/242115205_A_First_Introduction_to_Quantum_Behavior
- Pais, A. (1982). *Subtle is the Lord: the science and life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press.
- PHET Interactive Simulations. (2015). *Kwantum golfinterferentie, versie 1.11*. Opgeroepen op september 2015, van PHET Interactive Simulations - University of Colorado Boulder:
<https://phet.colorado.edu/nl/simulation/quantum-wave-interference>
- Posner, G., Strike, K., Hewson, P., & Gertzog, W. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education* 66(2) , 221-227.
- Shulman, L. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher* 15(2) , 4-14.
- Staatscourant. (2012, Juni 6). *Rectificatie Examenprogramma natuurkunde vwo van 28 april 2012*. Opgeroepen op september 2015, van Overheid.nl: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2012-11699.html>
- Street, S., & Goodman, A. (1998). Some experimental evidence on the educational value of interactive Java applets in Web-based tutorial. *ACSE '98 Proceedings of the 3rd Australian conference on computer science education* (pp. 94-100). New York: ACM New York.
- Svore, K. (2015, juni 9). *Quantum Computing: Transforming the Digital Age*. Opgeroepen op oktober 11, 2015, van Youtube.com: https://www.youtube.com/watch?v=eUp_B7ZpiXk
- van der Donk, C., & van Lanen, B. (2013). *Praktijkonderzoek in de school, tweede herziene druk*. Uitgeverij Couthino.
- van Eijk, M. (2013). *Inleiding in het ontwerpen van onderwijs in bètavakken. Syllabus behorende bij het college bètadidactiek*. Eindhoven School of Education (ESoE).
- Zhou, G., Brouwer, W., Nocente, N., & Martin, B. (2005). Enhancing Conceptual Learning Through Computer-Based Applets: The Effectiveness and Implications. *Journal of Interactive Learning Research*, 16(1) , 31-49.

Appendix A: Inhoud lessen

EERSTE LES

De lesdoelen van de eerste les kunnen als volgt samengevat worden:

1. De leerling begrijpt wat de fundamentele verschillen zijn tussen de klassieke natuurkunde en de kwantumtheorie.
2. De leerling begrijpt waarom de klassieke - en de kwantumfysica hebben geleid tot een crisis in de natuurkunde.

De eerste les begon met de volgende prikkelende vraag: *Bestaat de maan als we er niet naar kijken?*

Deze vraag is naar aanleiding van een vraag die Einstein in de jaren dertig stelde aan Abraham Pais, een Nederlandse assistent van Einstein, tijdens een wandeling in de buurt van het Institute of Advanced Physics in Princeton New-Jersey, en vat op een cynische wijze samen wat de kern van de problemen met de kwantumtheorie is (Pais, 1982):

Ik herinner me dat tijdens een wandeling Einstein opeens stopte, zich naar me draaide en vroeg of ik werkelijk geloofde dat de maan alleen bestaat als ik ernaar kijk. De rest van de wandeling werd besteed aan een discussie over wat een natuurkundige zou moeten bedoelen met de term 'bestaan'.

Deze vraag is klassikaal besproken, en de meesten waren het erover eens, door gebruik van gezond verstand, dat de maan weldegelijk bestaat als je er niet naar kijkt. Een enkeling twijfelde. Bespreking van mogelijke antwoorden werd uitgesteld naar de volgende les.

Vervolgens is ingegaan op de vraag: hoe is het gekomen dat Einstein zich op een serieuze wijze met zulke bizarre vragen is gaan bezig houden¹⁵? Om dat duidelijk te maken, was het nodig in te gaan op wat de klassieke natuurkunde nu precies inhoudt en waarom er onvermijdelijk een botsing moest komen met de kwantumtheorie. De klassieke natuurkunde kan het eenvoudigst worden samengevat onder de noemer *Wetenschappelijk Determinisme* waarvan Pierre-Simon de Laplace de belangrijkste woordvoerder was (Laplace, 1814):

1. De huidige toestand van het universum - en dus alles wat zich daarin bevindt - heeft zijn oorzaak in een vorige toestand van het universum.
2. De huidige toestand is weer een oorzaak van de daarop volgende toestand.
3. Alles staat vast van begin tot eind. Er is geen toeval, en de tijd is overal in het universum hetzelfde en verandert met constante pas.

Het metafoor van de klok is hierbij toepasselijk: elke toestand van de klok komt voort uit de toestand van de raderen van de klok van net iets voor de tik. En de volgende toestand komt voort uit de huidige stand van de raderen.

Vervolgens is duidelijk gemaakt dat de klassieke natuurkundigen twee verschillende componenten als bouwstenen van het universum beschouwden:

1. Materiële deeltjes, groot en klein. De kleinste deeltjes zijn harde bolletjes (atomen).

¹⁵ Het valt te betwijfelen of Einstein zelf dacht dat de maan niet zou bestaan als je er niet naar zou kijken. Het was m.i. meer zijn manier om op cynische wijze de bizarre microscopische kwantummechanische wetten te extrapoleren naar het macroscopische, en zijn medenatuurkundigen te prikkelen om na te denken of de kwantummechanica wel een goede beschrijving van de natuur is.

2. Licht, bestaande uit golven.

Deeltjes zijn deeltjes en golven zijn golven en zijn twee aparte entiteiten, net zoals vroeger jongens jongens waren en meisjes meisjes. De wetten van Newton (1687) bepalen op zeer precieze wijze de toekomstige beweging (baan) van de deeltjes, groot en klein, indien je de begintoestand van de deeltjes goed kent. Het gedrag van licht wordt bepaald door de vergelijkingen van Maxwell (Elektromagnetisme).

Als illustratie van de wetten van Newton werd een vallend object beschouwd dat op 20 meter hoogte werd losgelaten. Newton voorspelt exact hoe lang het duurt voordat het object de grond raakt (determinisme). Als illustratie van het golfkarakter van licht is de proef van Young besproken, met de daarbij behorende interferentie eigenschappen van licht en de gevolgen daarvan (maxima en minima op een scherm).

De crisis in de natuurkunde, die rond 1900 begon werd ingeleid door een aantal beroemde experimenten die in de les besproken en gedemonstreerd zijn. Er werd in de les vooral ingegaan *waarom* deze proeven niet met klassieke natuurkunde te verklaren zijn.

- De ultraviolette catastrofe.

Zwarte stralers zijn alleen in een wiskundige formule voor te stellen indien men postuleert dat licht bestaat uit energiebrokjes ter grootte van $E = h \cdot f$, waarbij h de constante van Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ Js) is en f (Hz) de frequentie van een trillende lichtoscillator. Dit idee is door Planck opgevat om de formule voor zwarte stralers (Stefan-Boltzmann) kloppend te krijgen. Het was Einstein die hier een werkelijke fysische inhoud heeft gegeven door licht daadwerkelijk opgebouwd te zien uit zulke energie kwanta.

- Het foto-elektrische effect.

Dit effect is alleen te begrijpen als licht (in sommige gevallen) opgevat kan worden als deeltjes met hun eigen impuls en energie (ze hebben geen massa zoals materiële deeltjes).

- De interferentieverschijnselen van elektronen (proef van Davisson en Germer).

Deze verschijnselen vallen alleen te begrijpen als elektronen (in sommige gevallen) opgevat kunnen worden als golven van een nog onbekende aard.

- De spectra van atomen.

Dit effect kan alleen begrepen worden als energie op microscopisch niveau uitgewisseld wordt in scherp bepaalde energiebrokjes, dezelfde kwanta als die Einstein voorstelde, en niet op een continue wijze zoals in de klassieke natuurkunde.

Als laatste werd ingegaan op het succes van de kwantumtheorie bij het verklaren van deze verschijnselen, maar ook de prijs die men hiervoor moest betalen:

- a) Afhankelijk van het experiment kan een deeltje zich als golf gedragen en een lichtgolf als deeltje.
- b) Plaats en snelheid (impuls) van deeltjes zijn niet meer scherp bepaald. De wereld op microscopisch niveau wordt (gedeeltelijk) 'fuzzy'.
- c) Oorzaak en gevolg zijn niet meer duidelijk van elkaar te onderscheiden.
- d) De aanschouwelijkheid van de klassieke natuurkunde verdwijnt.
- e) Niemand begrijpt hoe het echt zit; er zijn verschillende interpretaties van wat er precies gebeurt. Bestaan deeltjes wel voordat ze gemeten zijn?

TWEEDE LES

De lesdoelen van de tweede les kunnen als volgt samengevat worden:

1. Het begrijpen van de belangrijkheid van het begrip *meting* in de kwantumtheorie.
2. Kennismaking met de golffunctie ψ en golf-deeltje dualiteit.

3. Kennismaking met het TSE voor licht en voor deeltjes

Allereerst werd weer teruggegrepen naar de vraag uit de eerste les: bestaat de maan wel als we er niet naar kijken? Via een klassengesprek kwamen de leerlingen tot de (juiste) conclusie dat voor macroscopische objecten, zoals de maan, er objectief nagegaan kan worden dat zij bestaat als we niet kijken. Immers, we kunnen de invloed van de maan meten met een meetinstrument en later de resultaten uitlezen¹⁶. Maar indien we meer en meer de microkosmos induiken is dit meten niet meer zo triviaal. Indien men precies één atoom beschouwt, dan worden je meetinstrumenten in principe even groot als je atoom, en verstoort je bij de meting zowel de toestand van het atoom als je meetinstrument. Het is alsof je de maan probeert te meten door er een andere maan (bijvoorbeeld Charon van Pluto) er mee te laten botsen.

Bohr was van mening dat je over geen enkele eigenschap van een individueel atoom iets kon zeggen voordat je een meting hebt gedaan m.b.t. die eigenschap. Je kunt zelfs niet zeggen of het gehele atoom wel feitelijk bestaat¹⁷. De natuur op microscopisch niveau blijft verscholen achter een gordijn, waarbij bij een meting dat gordijn heel snel op een kiertje doet en daarna weer sluit. Einstein ging er vanuit dat individuele atomen en hun eigenschappen weldegelijk bestaan, onafhankelijk van metingen die je aan microscopische deeltjes doet. Einstein en Bohr hadden dus een eigen interpretatie van de kwantumtheorie, die met elkaar botsten. En het conflict werd veroorzaakt door de manier waarop ze beiden tegen metingen aan keken. Het was Bohr die voorlopig gelijk kreeg¹⁸ vanwege een experiment dat begin jaren tachtig door Alain Aspect in Parijs is uitgevoerd (niet verder op in gegaan, wel vermeld).

Vervolgens werden enkele gevolgen van het meetproces besproken, met daarin meegenomen de vier experimenten die in de eerste les zijn behandeld.

1. De natuur op microscopisch niveau wordt 'fuzzy-achtig'.

Als reactie op de verstoring van meetobject en meetinstrument tijdens een meting- en niemand weet waarom - gedraagt de natuur zich op zodanige wijze dat materiële deeltjes een bijbehorend golfkarakter kunnen vertonen¹⁹. Een golf is iets uitgebreids in de ruimte, zodat een deeltje dus niet meer vast te pinnen is in een punt, maar 'verspreid' is over de ruimte. Vandaar fuzzy. Deze bewering geldt niet alleen voor posities, maar ook voor snelheden en andere eigenschappen van deeltjes zoals energie.

2. Bij elk individueel materieel deeltje hoort een golf functie ψ die alle eigenschappen van dat deeltje beschrijft, maar alleen op een statistische wijze. Het kwadraat van de golf functie, ψ^2 , geeft b.v. de kans om een deeltje ergens in de ruimte aan te treffen. Het geeft niet DE positie, maar een kansverdeling van de positie. De buigingsverschijnselen (proef van Davisson en Germer) ontstaan door interferentie van zogenaamde waarschijnlijkheidsgolven hoe bizar dit ook moge klinken. De aard van ψ is verder mysterieus en duister. Niemand begrijpt waarom deze waarschijnlijkheidsgolven bestaan en dit karakter vertonen. Men weet zelfs niet of ze

¹⁶ We kunnen de maan fotograferen bijvoorbeeld. Een andere manier is om de invloed van de maan af te lezen aan de hoogtestanden van water t.g.v. eb en vloed. Hieruit kunnen we zien dat de maan niet alleen een verschijning is, maar dat ze ook daadwerkelijk invloed (gravitatie) uitoefent.

¹⁷ Je kunt wel concluderen dat atomen bestaan. Dit had Einstein in 1905 in een artikel over de Brown-beweging al bewezen. Maar over het bestaan van specifieke, individuele atomen en hun eigenschappen kun je volgens Bohr niets zeggen. M.b.v. Hedendaagse experimenten kun je individuele atomen benaderen en manipuleren. Hierbij is de gedachte van Bohr dus weldegelijk relevant geworden.

¹⁸ Het laatste woord is hierover toch nog niet gezegd. Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft is bijvoorbeeld nog steeds een aanhanger van Einstein in deze.

¹⁹ De golflengte wordt gegeven door de formule van de Broglie, $\lambda = h/mv$, waarbij m de massa is en v de snelheid van een deeltje.

werkelijk bestaan of alleen maar een container van informatie zijn die de natuur ons aanbiedt. (ontologie versus epistemologie van ψ).

Vervolgens is het TSE ter sprake gekomen, i.h.b. voor materiële deeltjes. In oplopende orde van grootte zijn voor de volgende objecten interferentiepatronen door natuurkundigen waargenomen:

- elektronen.
- neutronen.
- atomen.
- moleculen (+/- 800 atomen).
- Kleine virussen... wordt aan gewerkt.
- Voetballen (verre toekomst?).

Het TSE voor materiële deeltjes is zeer goed vergelijkbaar met de proef van Young, waarbij de lichtgolven vervangen worden door de waarschijnlijkheidsgolven. Hetzelfde patroon van maxima en minima treedt op bij verder gelijkblijvende parameters zoals golflengte, afstand tussen spleten etc. Indien de intensiteit van de elektronen afneemt tot slechts een elektron per doorgang, bouwt het patroon op het scherm zich geleidelijk op, hit voor hit.

Gekke waarnemingen die bij het TSE gedaan kunnen worden zijn:

- De waarnemingen bij twee spleten open zijn niet gelijk aan de som van afzonderlijke waarnemingen waarbij een van de spleten is afgedekt. Dit komt door interferentie.
- Deeltjes lijken bij interferentie door beide spleten tegelijkertijd te gaan. Sterker nog, je moet concluderen dat dit in feite zo is.
- Zou gauw je meet door welke spleet het deeltje gaat, verdwijnt het interferentiepatroon.

Vooraf dit laatste is een flagrante schending van klassieke wetten uit de natuurkunde. Hoe kan het onttrekken van informatie door de waarnemer van invloed zijn op de uitslag van een experiment?

Als laatste werden de vier belangrijke interpretaties van de kwantumtheorie besproken.

- Bohr: deeltjes bestaan niet voordat ze gemeten zijn
- Einstein: deeltjes bestaan onafhankelijk van metingen
- Feynman: denk er niet bij na en pas alleen de rekenregels toe die waarvan we in experimenten gezien hebben dat ze werken.
- Everett: Many-Worlds....

De constatering dat bij hedendaagse natuurkundigen de Many-Worlds interpretatie van Everett het populairst is, wekte bij veel leerlingen verbazing²⁰.

²⁰ De reden dat Everett's interpretatie op dit moment populairst is komt door nieuwe inzichten in de kosmologie, string theorie en kwantum informatie theorie. Kwantum computers werken b.v. alleen bij de gratie van het feit dat berekeningen in parallelle universa uitgevoerd worden.

HET PRACTICUM

Voor het computer practicum dat klas B (de interventie groep) heeft uitgevoerd, is gekozen voor een applet dat het TSE simuleert ([PHET Interactive Simulations, 2015](#)). Zie voor de leerlingen handleiding [Appendix D: Practicum handleiding](#). Het is de bedoeling dat leerlingen zich verwonderen over de typische kwantumeffecten die bij dit experiment optreden, en dat ze begrijpen dat de aard van de golf functie statistisch is. Bij het opzetten van het practicum is gebruik gemaakt van het checkformulier “Overzicht Praktische Activiteiten” dat in het college Vakdidactiek 3 is uitgedeeld.

Het TSE bestaat uit de volgende componenten:

1. Een deeltjes/fotonen kanon waarvan de afvuursnelheid van de deeltjes in te stellen is. Het experiment wordt alleen gebruikt voor deeltjes (i.h.b. elektronen en Helium atomen) en niet voor fotonen.
2. Een scherm met daarin twee spleten.
3. Een fluorescerend scherm waarop de inslagen (hits) van de materiële deeltjes te zien zijn.

Na opstarten stelt het applet de leerling in staat om zowel voor elektronen, neutronen als Helium atomen experimenten uit te voeren. Verder zijn de afstand tussen de spleten, de spleetbreedte en de afstand van de spleten tot het scherm aan te passen. Tevens is voor de materiële deeltjes de intensiteit van het elektronenkanon aan te passen, zodanig dat er slechts een (1) deeltje tegelijk in het experiment aanwezig is. Op het scherm kunnen de hits van de deeltjes worden geregistreerd, zodat er gaandeweg een interferentiepatroon ontstaat bij lage deeltjesintensiteit, en meteen bij hoge intensiteit. Ook is een spleet te blokkeren, zodat deeltjes daar worden tegengehouden. Bovendien is er een detectorplaatsing in het experiment mogelijk om te kijken door welke spleet het deeltje gaat.

Het practicum bestaat uit tien opdrachten. Bij de meeste opdrachten moet de leerling eerst nadenken over wat hij/zij als uitslag van het experiment verwacht alvorens ze het experiment mogen uitvoeren en antwoorden geven op de vragen. Na elke twee á drie vragen werd tijdens het practicum het uitvoeren even stilgelegd om de resultaten klassikaal te bespreken.

- Vragen 1-4: de leerling maakt kennis met wat er met het patroon op het scherm gebeurt indien je een enkele spleet openlaat, en hoe het patroon er uit ziet indien je beide spleten openlaat. In het laatste geval treedt er interferentie op van waarschijnlijkheidsgolven, in de eerste twee gevallen niet. De som van het patroon van de twee open spleten afzonderlijk is niet gelijk aan het interferentiepatroon. Belangrijk is dat de leerling doorziet dat op plaatsen eerst relatief veel elektronen terechtkwamen bij een enkele open spleet, er nu helemaal geen elektronen meer komen doordat er twee spleten open staan.
- Vraag 2 is een exacte herhaling van het experiment uit vraag 1. Het patroon op kleine schaal, het hit-patroon van de elektronen, is geheel anders dan bij vraag 1 vanwege de toevalsprocessen die kenmerkend zijn voor de kwantummechanica. Het patroon op grote schaal (maxima en minima) is identiek.
- In vraag 5 en 6 wordt de intensiteit van het deeltjeskanon verminderd zodanig dat er respectievelijk slechts een deeltje tegelijk door de twee open spleten gaat en, vervolgens, er slechts een (1) deeltje tegelijk zich in het experiment bevindt. De leerling moet dan waarnemen dat het interferentiepatroon zich geleidelijk opbouwt tot hetzelfde patroon als eerst, gedurende de twee minuten dat het kanon afvuurt. Conclusie die (slimme) leerlingen hieruit moeten

trekken is dat ieder individueel deeltje afzonderlijk zijn eigen golffunctie ψ heeft en dat de golffunctie niet iets is wat bij de totale verzameling van afgevuurde elektronen hoort.

- Bij vraag 7 wordt er een detector bij een van de spleten geplaatst om te kijken door welke van de twee spleten de elektronen gaan. Indien het experiment uitgevoerd wordt, dan verdwijnt het interferentiepatroon! Kennelijk maakt het voor de natuur uit of je kijkt of niet. Dit is een van de geheimen van de kwantumtheorie: de natuur past haar antwoord aan op de vragen die de experimentatoren stelt. Door te kijken verander je het karakter van het experiment van golfeigenschap naar deeltjeseigenschap. De natuur heeft dat in de gaten.
- In vraag 8 wordt gevraagd aan de leerlingen na te denken over wat er gebeurt als je de detector weer weghaalt: kun je nu zeggen door welke spleet het elektron gaat? Kennelijk kun je alleen maar concluderen dat het elektron door beide spleten tegelijkertijd gaat.
- Vraag 9 en 10 gaan over de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg. In vraag 9 wordt gevraagd de golflengte (λ_{Broglie}) uit te rekenen van He-atomen die met een bepaalde snelheid worden afgeschoten. Verder dient de leerling in te zien wat er met het patroon gebeurt als je λ_{Broglie} (en dus de snelheid) varieert. In Vraag 10 wordt gevraagd de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg te controleren voor dit experiment.

Appendix B: Reader historische inleiding

Kwantumwereld: een korte geschiedenis

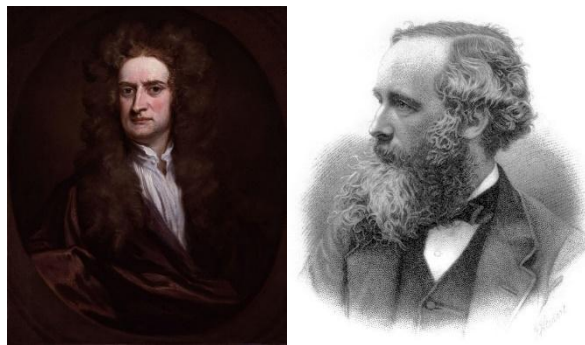
F. Sloff – Eindhoven School of Education – Oktober 2015

Tip vooraf: in de tekst beneden kunnen woorden of uitdrukkingen voorkomen die je niet meteen begrijpt. Zoek de betekenis van deze woorden/uitdrukkingen op in een woordenboek of raadpleeg het internet (b.v. Wikipedia). Dat helpt een stuk met het doorgronden van de tekst.

Het rommelt in de verte

Heb je wel eens een proefwerk gemaakt waarvan je dacht dat je er een heel goed cijfer voor zou halen, maar dat achteraf bleek dat je een zware onvoldoende had? Ongeveer dat gevoel van teleurstelling overkwam de natuurkundigen aan het begin van de twintigste eeuw. Ze dachten dat ze het bijna voor elkaar hadden om de natuurkundige verschijnselen volledig te begrijpen en toen stortte hun wereld opeens helemaal in.

Aan het einde van de negentiende eeuw waren de natuurkundigen erg tevreden over wat ze tot dan toe hadden bereikt. Ze konden veel verschijnselen van materie en licht goed verklaren. Zo leverden de wetten van Isaac Newton (1687) de wiskundige vergelijkingen op voor de beweging van materie en de wetten van James Clerk Maxwell (1865) gaven de vergelijkingen voor licht voorgesteld als een golf.



Isaac Newton (1643-1727) James Clerk Maxwell (1831-1879)

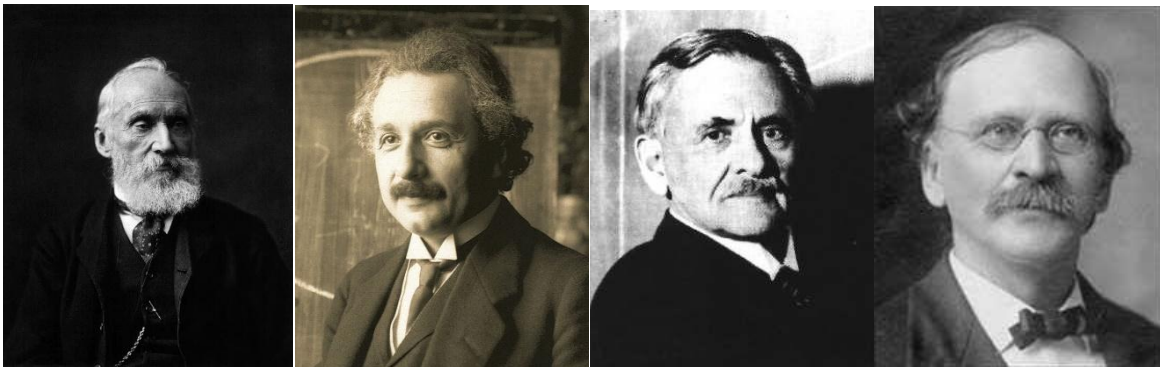
Met misschien hier en daar wat nieuwe wiskunde toevoegen, de natuurkunde een beetje aanpassen en vooral de natuurkundige verschijnselen nauwkeuriger meten, zou het een kwestie van tijd zijn voordat deze verschijnselen met de bekende wetten konden worden begrepen. Dit heet de *Klassieke Natuurkunde*. Deze natuurkunde bood een vertrouwde omgeving die goed paste bij de dagelijkse ervaring. Namelijk dat deeltjes - klein en groot - ten allen tijde een goed gedefinieerde plaats en snelheid hebben, en dat je toekomstige posities en snelheden met wiskunde nauwkeurig kunt uitrekenen als je maar je beginwaarden van de posities en snelheden goed genoeg kunt meten. Deeltjes waren deeltjes en golven waren golven. Punt uit. Atomen waren zeer kleine materiële deeltjes die ook aan de wetten van Newton voldeden. Alles, tot op het kleinste microscopische detail, had zijn plaats en bijbehorende verandering daarvan in de tijd. En er gebeurde niets zonder dat er een oorzaak voor was. De tijd was universeel - d.w.z. geldig in het gehele universum - en liep sinds de schepping met een constante pas in voorwaartse richting.

Er waren echter twee 'kleinigheidjes' die een aantal natuurkundigen zorgen baarde, twee wolkjes aan de horizon van de verder prachtige, heldere natuurkundige hemel. In april 1900 gaf de Britse natuurkundige Lord Kelvin (die van de bekende temperatuurschaal) een speech getiteld:

"The beauty and clearness of physics is at present obscured by two clouds".

Hij was ervan overtuigd dat deze wolkjes op den duur wel zouden verdwijnen, maar ze waren wel het noemen waard. Niets bleek minder waar. Ze zouden uitgroeien tot donderwolven en een ware crisis in de natuurkunde veroorzaken.

Het eerste wolkje was het experiment van de Amerikanen Michelson en Morley (1895) dat aantoonde dat de snelheid van het licht onafhankelijk is van de snelheid van degene die het licht uitzendt. M.a.w. of de zender van het licht nu met een snelheid van je af beweegt of naar je toe, de snelheid van het ontvangen licht bleef altijd constant namelijk $c = 3 \times 10^8$ m/s. Dit heeft uiteindelijk geleid tot de Speciale Relativiteitstheorie van Albert Einstein (1905) en in een later stadium tot zijn Algemene Relativiteitstheorie (1915) die onze begrippen van ruimte, energie, massa en tijd overhoop zouden halen. We gaan ons niet verder in deze onderwerpen verdiepen, want het is een verhaal op zich.



Lord Kelvin (1824-1907) en Albert Einstein (1879-1957)

Albert Michelson (1852-1931) en Edward Morley (1838-1923)

Het tweede wolkje werd gevormd door de aard van het uitgezonden licht door bijvoorbeeld een hete oven of een gloeilamp²¹. Ieder heet lichaam zendt straling uit in de vorm van elektromagnetisch straling ofwel licht. Wat men deed om de karakteristieken van het licht te meten was het gereed maken van een oven die geheel zwart aan de binnenkant was gemaakt waarna het met vuur verwarmd werd. Er was een klein gaatje in de ovenwand geboord waardoorheen een beetje licht kon ontsnappen en waarvan de intensiteit bij een bepaalde golflengte (of frequentie) kon worden gemeten met een lichtintensiteitsmeter (zie fig. 1).

²¹ Onderzoek naar de aard van de straling van gloeilampen was natuurlijk extra interessant vanwege de commerciële toepassingen hiervan (gloeilampen). Dit was ook een van de redenen waarom veel natuurkundigen hier onderzoek naar deden.

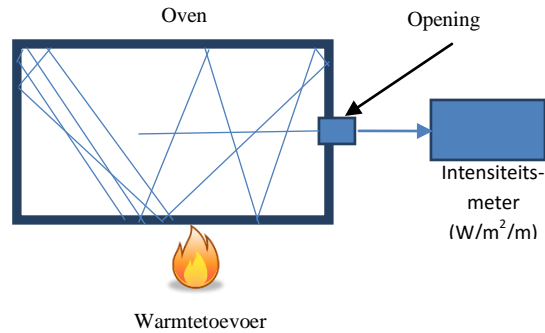


Fig. 1: een hete oven produceert straling waarvan de intensiteit per golflengte gemeten kan worden.

Wat men zag was het volgende (zie ook fig. 2). In eerste instantie, wanneer de oven nog niet zo erg heet was, werd de kleur van het licht typisch rood/oranje, vergelijkbaar met het gloeiende metaal dat uit de oven van b.v. een hoogoven komt. Naarmate de temperatuur van de oven hoger gestookt werd, veranderde het uitgezonden licht van rood, naar groen en groen/blauw en uiteindelijk naar blauw/violet. Het hele spectrum (regenboog) kwam dan achtereenvolgens tevoorschijn. In fig. 2 zie je een paar grafieken die het verband geven tussen de intensiteit (bijvoorbeeld in eenheden van W/m^2 per golflengte eenheid) van het uitgezonden licht en de golflengte van het licht (in m) waarop gemeten werd, en dit steeds bij constante temperatuur van de oven. De verandering van de kleur van de straling naar het blauwe bij toenemende temperatuur kwam doordat het maximum van de grafieken bij toenemende temperatuur steeds verder naar het blauw verschoof, d.w.z. kortere golflengtes.

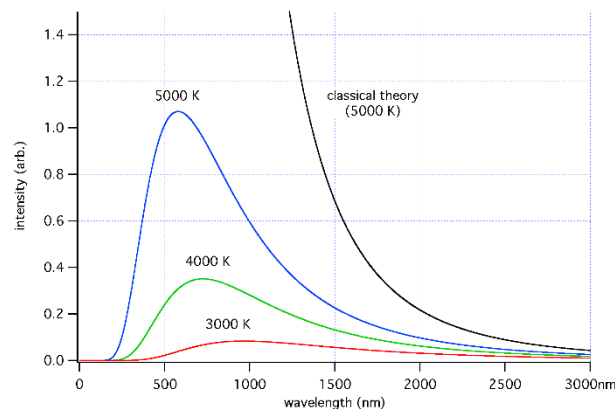


Fig. 2: de stralingsintensiteitsverdeling over de golflengten (b.v. in $Watt/m^2/m$) bij verschillende temperaturen

Maar een heel groot gedeelte van het uitgezonden licht bleef ook in de langere golflengtes zitten. Toen men de klassieke natuurkunde probeerde toe te passen op de situatie van de hete oven kreeg men een heel andere, theoretische figuur. In fig. 2 is deze curve aangegeven voor een temperatuur van de oven van 5000 K, gelabeld 'Classical Theory 5000 K'. Je ziet dat, wanneer we proberen deze grafiek door te tekenen naar het blauwe gedeelte, de waarden van de grafiek naar oneindig gaan. Dat zou betekenen dat de energie uitgezonden door de oven eveneens oneindig zou worden. Dat was een onmogelijke situatie. Dit werd, begrijpelijkerwijs, met de term *Ultraviolette Catastrofe* aangeduid. Ook voorspelde de klassieke theorie dat bij toenemende temperatuur alle straling in de kleinere golflengtes (d.w.z. hogere frequenties, links in de figuur) zou gaan zitten. Zo zelfs, dat bij extreem hoge temperatuur een hete staaf

voor het oog onzichtbaar zou worden omdat alle straling in het Ultraviolet zou worden uitgezonden. In de praktijk bleek dat er nog steeds veel energie in langere golflengtes bleef zitten en de staaf gewoon zichtbaar bleef. Men begreep er niets van.



Een belangrijke figuur die een eerste aanzet gaf tot een iets beter begrip van de ultraviolette catastrofe was de Duitser Max Planck (1858-1947). Hij brak zich het hoofd over hoe het nu kon dat de klassieke theorie zo'n fout antwoord gaf. Na geruime tijd van sleutelen en aanpassen van de wiskundige formules, merkte hij in 1900 bij toeval dat wanneer hij de straling afgegeven door de moleculen en atomen van de oven niet meer opvatte als continu variërend maar als bestaande uit verschillende afgebakende pakketjes energie ter grootte van²² $E = h \cdot f$, hij de juiste formule kreeg die de gemeten vorm van de grafieken kon reproduceren.

Dit ging lijnrecht in Max Planck (1858-1947) tegen de toen heersende klassieke opvatting dat energie altijd continu verandert en nooit in stapjes. Planck en anderen dachten dat de aanname alleen maar een wiskundige truc was om het juiste antwoord te krijgen en waren van mening dat er op den duur een betere verklaring zou komen. Men dacht nog steeds dat de natuur op de vertrouwde manier zou werken, namelijk in overeenstemming met de klassieke, continue wijze.

De lucht gaat betrekken

Er waren andere alarmerende berichten binnengekomen dat er iets niet klopt met de klassieke theorie. Zo was er het experiment van het *Foto-elektrisch Effect* (fig 3). Hierbij valt elektromagnetische straling (licht) op een stukje metaal en zorgt ervoor dat de atomen aan het oppervlak geïoniseerd raken zodat er vrije elektronen ontstaan en er een elektrische stroom opgewekt kon worden.

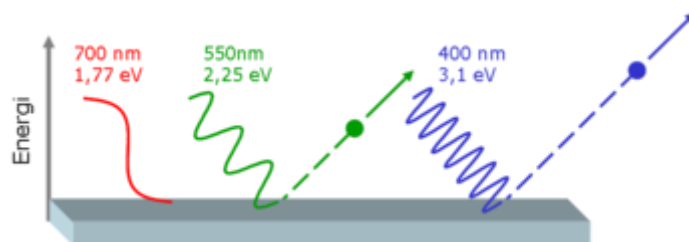


Fig. 3: de werking van het foto-ëlektrisch effect. Licht met lange golflengte (hoe intens ook) kan geen elektronen vrijmaken. Licht met kortere golflengte kan dat wel en geeft het vrijkomende elektron extra energie naarmate de kleur blauwer wordt.



Het was Heinrich Hertz (1857-1894) die al in 1887 ontdekt had dat niet de intensiteit van de straling ervoor zorgde dat de elektronen vrijkwamen uit metalen, maar de *frequentie* f : hoe hoger de frequentie - blauw licht heeft hogere frequentie dan groen en rood licht - des te sneller kwamen de elektronen vrij. Er bleek voor elk metaal zelfs een grenswaarde f_0 te bestaan waarboven elektronen pas vrijkwamen en daaronder niet. Dit was tegen de heersende gedachte dat hoe

Heinrich Hertz (1857-1894)

²² h is een constante die nog bepaald moest worden maar die later de *Constante van Planck* is gaan heten. h is heel klein: $6,63 \times 10^{-34}$ Js. f is de frequentie van het licht, met $c = \lambda \cdot f$, c de snelheid van het licht en λ de golflengte van het licht.

meer energie je toevoegde aan de straling - door de intensiteit op te hogen - de kans groter was dat elektronen vrijkwamen uit het metaal. Het is te vergelijken met ballengooien op de kermis. Een enkel licht balletje gooien, bijvoorbeeld een sponsballetje, zal de blikjes niet doen omvallen maar een heleboel sponsballetjes in een keer gooien doet dat wel. Dit beeld dus bleek niet te kloppen. Alleen de frequentie van het licht, te vergelijken met de kleur van het sponsballetje, was belangrijk. Dat was een bizarre constatering vond men.

Zoals zoveel in de geschiedenis van de moderne natuurkunde, stond Einstein aan de basis van een oplossing. Hij stelde in 1905 voor dat licht bestaat uit deeltjes, die hij *fotonen* noemde²³. Deze lichtdeeltjes hadden voor de frequentie f een energie gelijk aan $E = h \cdot f$, een precieze waarde van de energie dus. Je noemt dat het *Energiekwantum van een Foton*. Als zo'n lichtdeeltje/foton op een elektron in een atoom valt, draagt het foton zijn energie over aan het elektron. Indien dit genoeg is om het atoom vrij te maken uit het metaalrooster, dan komt het elektron los van het atoom en schiet het de ruimte in met een kinetische energie E_k die bepaald wordt door het overschot aan energie dat het foton had na vrijkomen. In formule:

$$h \cdot f = E_k + W$$

Hierbij is W de *Uittree-energie* van het atoom²⁴. Deze is verschillend voor elk materiaal. Men schrijft ook wel $W = h \cdot f_0$, waarbij f_0 de grenswaarde van de frequentie is waarboven het metaal atoom zijn elektron kwijtraakt. Het bijzondere aan Einsteins voorstel was dat zijn oplossing impliceerde dat licht zich als een deeltje kon gedragen, naast het gedrag als golf dat waargenomen werd in interferentieverschijnselen. Met zijn idee werd ook de truc die Planck had toegepast (zie boven) opeens iets heel reëls en natuurkundigs. Voor de natuurkundigen begon zich een crisis op te doemen. Hoe kon licht nu zowel een deeltje als een golf zijn? Ze begrepen er helemaal niets meer van.

Een ander verschijnsel dat veel zorgen baarde werd gevormd door de *Spectra van Atomen*. Indien men licht (b.v. van een hete gloeilamp) laat vallen op doorzichtig materiaal zoals waterstofgas of heliumgas en men bekijkt het licht daarna met een spectroscop, dan ziet men de kleuren van het visuele spectrum met daardoorheen scherpe zwarte lijnen. Deze lijnen worden *Absorptielijnen* genoemd.

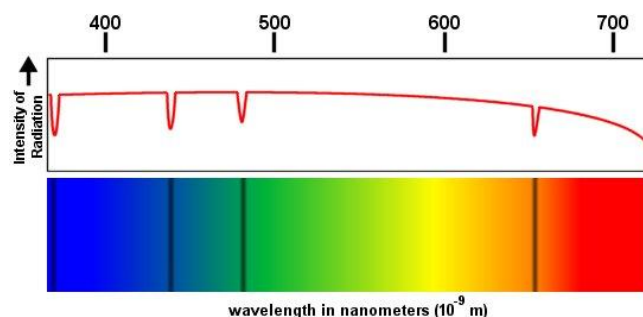


Fig. 4: absorptielijnen in een continu achtergrond spectrum.

²³ Voor zijn verklaring van het foto-elektrisch effect kreeg Einstein in 1922 de Nobelprijs voor de natuurkunde. Zijn relativiteitstheorie heeft nooit een prijs gekregen!

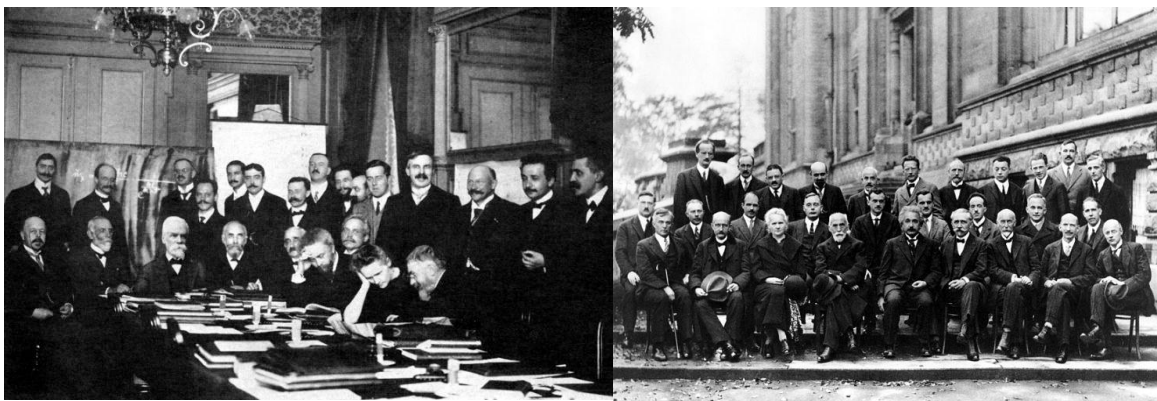
²⁴ Merk op dat het symbool voor de uittree-energie W (Work) is; er moet immers door het foton een kracht F op het elektron worden uitgeoefend over een afstand s om het elektron uit het metaal vrij te maken.

In fig. 4 zie je de intensiteit van continue straling afkomstig van de achtergrond (bijvoorbeeld gloeilamp) voorgesteld als een rode lijn. Op heel specifieke plekken zie je scherpe absorptie van straling overeenkomstig met een heel nauwkeurig bepaalde frequentie (of golflengte). Dit was wederom een aanwijzing dat energie in de natuur, maar misschien ook veel andere natuurkundige grootheden, op microscopisch niveau alleen in kwanta (brokjes) werd uitgewisseld.



Hendrik Lorentz (1853-1928), Niels Bohr (1885-1962) en Ernest Rutherford (1871-1937)

In 1911 waren de natuurkundigen de onzekerheid zat en organiseerden onder voorzitterschap van de Nederlander Hendrik Lorentz²⁵ (1853-1928) een conferentie in Brussel – dit was de eerste *Solvay-conferentie* die gesponsord werd door de rijke Belgische industrieel Ernest Solvay - om te praten over de verschijnselen die waren waargenomen. Veel verder kwamen ze niet gedurende deze conferentie, maar de vier volgende Solvay-conferenties, allemaal onder voorzitterschap van Lorentz, en vooral de laatste in 1927 zouden veel meer helderheid verschaffen over de kwantumtheorie.



De eerste (1911) en de vijfde (1927) Solvay-conferentie onder voorzitterschap van Lorentz. Hij zit rechts van Einstein op de tweede foto. Let op Marie Curie, de enige vrouw in het gezelschap.

In 1913 maakte de Deense natuurkundige Niels Bohr (1885-1962) een belangrijke stap in het verklaren van de zwarte lijnen in de waargenomen spectra van atomen. Hij stelde het atoommodel voor dat nu zijn naam draagt en werd bij het bedenken hiervan geïnspireerd door het werk van de Nieuw-Zeelandse natuurkundige Ernest Rutherford (1871-1937). Simpel gezegd komt het model er op neer dat een atoom

²⁵ Hendrik Antoon Lorentz is naast Christiaan Huygens misschien wel Nederlands grootste natuurkundige. Door zijn tijdgenoten werd hij als een autoriteit gezien. Einstein beschouwde hem als een soort vaderfiguur. Hij is bekend van de Lorentzkracht, een theorie van elektronen en de zogenaamde Lorentz-contractie. Het laatste is het relativistisch inkrimpen van meetlatten die zich met hoge snelheid bewegen t.o.v. de waarnemer.

uit een positief geladen kern bestaat waaromheen de negatief geladen elektronen bewegen. Elk elektron beweegt zich met een heel specifieke energie in een schil (de schillen K, L, M, N, etc.), en als een lichtfoton wordt geabsorbeerd door een elektron dan gaat het elektron naar een hogere schil onder absorptie van het foton. De frequentie van het foton dat wordt weggenomen uit het licht - waarmee dus het ontstaan van de zwarte lijn verklaard wordt - wordt gegeven door:

$$h \cdot f = E_n - E_m$$

Hierbij is E_m de energie van de lagere schil en E_n die van de hogere schil. m en n zijn gehele getallen die de schillen aanduiden (bijvoorbeeld K: $m = 1$, L: $m = 2$, etc.).

Helaas was deze verklaring voor de spectra niet waterdicht. Een van de gevolgen van het feit dat elektronen zich in gekromde cirkel- ellipsbanen om de kern heen bewegen, is dat ze steeds van richting veranderen. Uit de theorie van Maxwell volgde dat elektronen dan ook straling uit moesten zenden. En als de elektronen straling uitzenden, dan verliezen ze energie en zouden ze uiteindelijk naar de kern toe spiraliseren. Bohr had dit probleem omzeild door te beweren dat de natuur nu eenmaal zo werkte en dat alleen de schillen stabiel zouden zijn. Hij had hiervoor een ad-hoc mechanisme ingevoerd dat leek op de truc die Planck had toegepast met licht fotonen, namelijk dat ook de snelheden (impulsen) van de elektronen alleen maar discrete waarden aan kunnen nemen. Niemand begreep waarom dit zo moest zijn.

Het gaat stormen

Dit was de situatie vlak na het einde van de eerste wereldoorlog (1918-1920), toen alle oorlogvoerende landen probeerden op te krabbelen uit de verwoestingen:

- Er hadden zich inmiddels aanwijzingen opgehoopt dat er iets mis was met de klassieke natuurkunde indien dit werd toegepast op microscopisch kleine deeltjes zoals atomen en moleculen wanneer ze interactie met licht ondergaan.
- Er waren wat pogingen gedaan door Einstein en Bohr om het foto-elektrisch effect en de spectra van atomen te verklaren.

Maar erg bevredigend was het allemaal niet. In de jaren twintig, zeg tussen 1923 en 1927, kwam alles in een stroomversnelling. Op de achtergrond verliepen vier Solvay-congressen waar alle natuurkundigen hun ideeën uit konden wisselen en erover konden debatteren. Allereerst was er het idee van de Louis-Victor de Broglie (1892-1987), een Frans edelman en filosoof die zich volledig op de natuurkunde had geworpen. Hij bedacht in 1924 het volgende: als golven zich als deeltjes gedragen, waarom zou de natuur niet symmetrisch kunnen zijn en dat deeltjes zich ook als golven kunnen gedragen? Dit betekent dat ieder bewegend materieel (microscopisch) deeltje met snelheid v en massa m ook een bijbehorende golflengte heeft. Hij gaf de volgende uitdrukking voor de golflengte:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

Dit idee van *Materiegolven* werd in het begin door vrijwel iedereen genegeerd (behalve door Einstein), want wat moest men precies voorstellen bij zo'n golf? De golf was zeker niet elektromagnetisch van aard zoals lichtgolven, anders was dit wel in een experiment waargenomen. Dus waar bestond die golf dan uit? Wat trilde er nu precies? De Broglie stelde ook voor dat deze materiegolven, net zoals elektromagnetische golven, zouden kunnen interfereren. Er konden zich dus ergens in de ruimte

optellingen van dergelijke golven bevinden, golfpakketjes, waarmee in principe experimenten gedaan konden worden. In 1927 vonden Clinton Davisson (1881-1958) en Lester Germer (1896-1971) inderdaad dat er een experiment met elektronendiffractie opgezet kon worden. Indien ze elektronen op een rooster van metaalatomen lieten botsen, kregen ze hetzelfde patroon als bij experimenten waarbij licht op een rooster schijnt. Zie fig 5. De Broglie had inderdaad gelijk gehad.

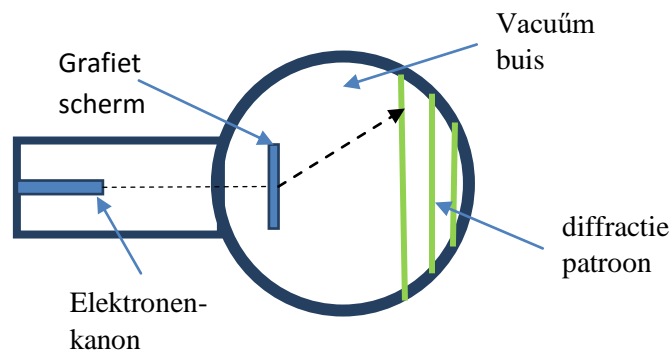
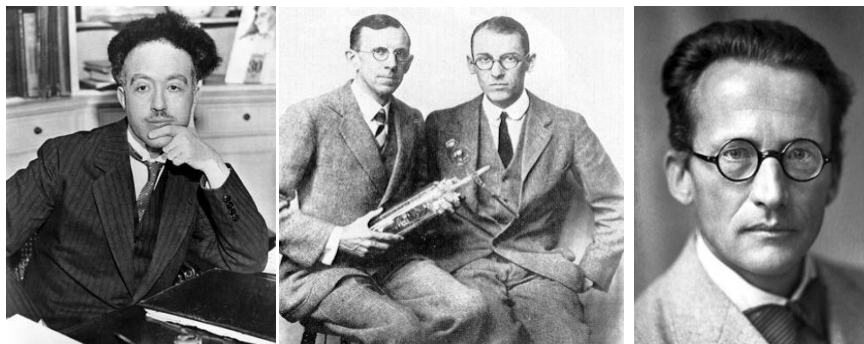


Fig. 5: schematische tekening van het experiment van Davisson en Germer (1927). Elektronen worden geschoten op een plaatje grafiet die zich voor de elektronen als een soort rooster gedraagt. Er ontstaan diffractiepatronen op de buiswand.



De Broglie (1892-1987), Clinton Davisson (1881-1958) & Lester Germer (1896-1971) en Erwin Schrödinger (1887-1961)

Het idee van de Broglie zette de natuurkundigen in de loop van 1925 wel aan het nadenken (het experiment van Davisson en Germer was toen nog niet bekend). De vraag werd: als materiedeeltjes ook golven zijn, wat was dan de wiskundige formule die daarbij hoorde? Erwin Schrödinger kwam in 1925 met een voorstel, dat later beroemd werd onder de naam *Schrödingervergelijking*. Die vergelijking zag er zo uit (niet schrikken, we gaan hem niet gebruiken):

$$\frac{i\hbar}{2\pi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) + E \cdot \psi$$

- $\psi = \psi(x, y, z, t)$: de uitwijking van de materiegolf ten tijde t op plek (x, y, z) .
- $E = E(x, y, z, t)$: de energie van een veld (b.v. magnetisch veld) ten tijde t en op plek (x, y, z) waarin het materiedeeltje van massa m zich bevindt. Voor een vrij deeltje geldt $E = 0$.
- \hbar : de constante van Planck ($6,62 \times 10^{-34}$ Js)
- i : het imaginaire getal i , met $\sqrt{-1}$.

- $\frac{\partial\psi}{\partial t}$ is de afgeleide van ψ naar de tijd, en $\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}$ is de tweede afgeleide van ψ naar de x -coördinaat.

De functie ψ - ook wel *Golffunctie* genoemd - is in elk punt van de ruimte en op elk tijdstip in de tijd gedefinieerd en geeft de uitwijking aan van de materiegolf. De tijdsverandering van de golffunctie ψ op een bepaalde de plaats (x, y, z) wordt ook wel *Golfmechanica* genoemd. De Schrödinger-vergelijking gaf echter nog geen antwoord op de vraag van wat de golffunctie nu precies moest voorstellen.

De Duitse natuurkundige Max Born (1882-1970) bracht in 1926 helderheid. Born was een meester in het verklaren van optische verschijnselen zoals interferentie, diffractie etc.. Hij had daar geleerd dat het **kwadraat** van de uitwijking van het magnetische of het elektrische veld, B^2 of E^2 , iets zei over de dichtheid van de waargenomen straling op een scherm. Hij maakte de moedige stap om te zeggen dat voor materiedeeltjes ψ^2 een soortgelijke rol moest vervullen. Echter, ψ^2 moest nu volgens hem een *Waarschijnlijkheidsdichtheid* zijn om een materiedeeltje ergens aan te treffen op een bepaalde tijd t . D.w.z. $\psi^2(x, y, z, t)\Delta x. \Delta y. \Delta z$ is de kans om het deeltje aan te treffen in het ruimtelijke kubusje bepaald door de uiteinden (x, y, z) en $(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$.

Een heel andere benadering in 1927 door de Duitse natuurkundige Werner Heisenberg (1901-1976) leverde iets op wat de natuurkundige gemeenschap deed sidderen. Samen met Pascual Jordan (1902-1980) en ook weer Max Born ontwikkelde hij de zogenaamde *Matrixmechanica*. Deze extreem abstracte natuurkunde stelde deeltjes niet als golven voor maar meer als wiskundige algebraïsche objecten waarvoor kwantum-rekenregels opgesteld konden worden. Deze rekenregels volgden uit de waarnemingen.



Werner Heisenberg (1901-1976), Max Born (1882-1970) en Pascual Jordan (1902-1980)

Uiteindelijk waren de natuurkundige antwoorden in deze theorie niet meer voorspellingen van de exacte waarden van de te meten natuurkundige grootheden, maar meer de *kansen* dat bepaalde waarden gemeten konden worden. Natuurkunde, op het niveau van atomen, was meer abstracte kansberekening geworden dan dat men exacte voorspellingen kon doen.

Een van de uitvloeiselen van de matrixrekening was de beruchte *Heisenberg Onbepaaldheidsrelatie*:

$$\Delta p. \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$

Deze vergelijking zegt dat de statistische spreiding Δp , d.w.z. de onbepaaldheid in waarde bij het meten van de impuls $p = m. v$ van een deeltje, en de statistische spreiding Δx in het meten van de plaatscoördinaat x niet beiden **tegelijkertijd** willekeurig klein gemaakt kunnen worden. M.a.w. als je de plaats heel nauwkeurig wilt weten m.b.v. een experiment is het altijd zo dat de impuls minder

nauwkeurig bepaald kan worden. Vul bijvoorbeeld $\Delta x \approx 0$ in bovenstaande formule in en je krijgt een enorme onbepaaldheid $\Delta p \approx \infty$ ervoor terug. Deze onzekerheden hebben niets te maken met de onnauwkeurigheden van de gebruikte meetinstrumenten of het aflezen hiervan. Het is een fundamentele natuurwet. Het is net alsof er in de natuur een ondergrens is aan wat je principieel tegelijkertijd kunt meten. Je kunt dit begrijpen door - om b.v. de positie van een deeltje te bepalen - je altijd een minimum hoeveelheid energie met het te meten deeltje moet uitwisselen, bijvoorbeeld een enkel foton. Deze uitwisseling verstoort onmiddellijk de snelheid van het deeltje en dus ook de bijbehorende impuls zodat je een andere waarde voor je impuls meet dan je eigenlijk gewild had. Je kunt de Heisenberg relatie ook voorstellen als een gesloten gordijn waarachter alle kwantumverschijnselen plaatsvinden. Probeer je het gordijn open te doen om heel even door een kiertje te kijken om het daarna weer snel te sluiten (je doet dan een nauwkeurige 'plaatsbepaling'), dan gaat het gordijn ter plekke en op aangrenzende plaatsen heftig bewegen en wordt het kiertje instabiel.

Het bleek al heel snel (1927) dat de matrixmechanica van Heisenberg wiskundig equivalent is aan de golfmechanica van Schrödinger en dus in feite precies hetzelfde beschrijft. Stel je voor dat er twee theorieën waren die elkaar tegenspraken, dan was de ramp helemaal niet te overzien geweest.

Het klaart op

Tegen 1930 was 't stof van het natuurkundige geworstel wel een beetje neergedaald en werden de eerste successen van de kwantumtheorie zichtbaar:

- Met de waarschijnlijkheidsinterpretatie (ψ^2) van Born konden de verschillende spectra van eenvoudige atomen goed verklaard/berekend worden.
- Deeltjes konden zich als golven gedragen en golven als deeltjes (fotonen). Hoe de fotonen/deeltjes zich gedroegen was afhankelijk van de aard van het experiment; zo gedraagt een elektron zich de ene keer als een golf en de andere keer als een deeltje (zelfde voor foton). Hiermee konden verschillende experimenten verklaard worden zoals die van de elektronendiffractie van Davisson en Germer.
- De stabiliteit van atomen kon verklaard worden m.b.v. de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg. Immers als het elektron op de kern valt wordt zijn positie nauwkeuriger ($\Delta x \rightarrow 0$), zodat tegelijkertijd het elektron door de relatie een veel grotere impuls/snelheid moet krijgen ($\Delta p \rightarrow \infty$). Hierdoor beweegt het zich weer van de kern af.

Het sluitstuk van de onzekere tijd werd gevormd door de uitgave van twee belangrijke leerboeken:

1. *Principles of Quantum Mechanics* (1930) door de Britse natuurkundige Paul Dirac (1902-1980).
2. *The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (1932) door de Hongaar/Amerikaan John von Neumann (1903-1957).

Beide boeken zijn nog steeds standaardwerken van de kwantumtheorie.



Paul Dirac (1902-1978), John von Neumann (1903-1957), Wolfgang Pauli (1900-1958)

Intussen had Einstein niet stilgezeten. Hij had een enorme hekel gekregen aan de richting waarin de kwantumtheorie was ingeslagen, en dat is nog zacht uitgedrukt. Het botste met elke vezel van zijn natuurkundige wezen die zei dat de natuur niet volgens kansen werkte maar altijd op een exact voorspelbare manier. Tijdens de laatste Solvay-congressen kreeg hij het meermalen aan de stok met Bohr over hoe de kwantumtheorie nu precies te begrijpen, te interpreteren. Hij verzon gedachtenexperimenten - hij was daar een meester in - om de basis van de theorie onderuit te halen. I.h.b. de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg omdat dit de kern van de kwantumtheorie is. En telkens kon Bohr binnen het kader van de kwantumtheorie en soms met Einstein's eigen relativiteitstheorie (!) een goed antwoord geven. Zo was Bohr van mening dat deeltjes pas reëel, d.w.z. iets werkelijk bestaands kunnen worden op het moment dat je ze meet. Vóór het tijdstip van meting kun je niet zeggen of ze wel of niet bestaan. Het is een zinloze vraag. Einstein was echter van mening dat dit evidente onzin was en dat de deeltjes weldegelijk bestonden zonder dat ze gemeten werden, hoe klein ze ook zijn. Van hem is de cynische uitspraak: *"Bestaat de maan zonder dat we ernaar kijken?"*. Je zou inderdaad kernachtig het probleem van kwantumtheorie kunnen omschrijven als: bestaan deeltjes en eigenschappen van deeltjes als ze nog niet in meetinstrumenten zijn geregistreerd, m.a.w. als we ze nog niet 'gezien' hebben?

Verder was Bohr van mening dat je alleen statistische uitspraken kunt doen over wat je kunt meten aan een deeltje en dat de uiteindelijke meetwaarden fundamenteel aan kansen onderhevig zijn. Een deeltje op microscopisch niveau lijkt op een muntje dat je op een tafel laat ronddraaien. Door het draaien kun je niet zien of het kop of munt is. Maar als je met de platte hand op het muntje slaat ('meten') is er uiteindelijk altijd een kant die bovenop komt liggen, kop of munt. Einstein geloofde dit niet en zei schamper op een van de Solvay congressen: *"Onze lieve God dobbelt niet"*, waarop Bohr terugriep *"Stop met te zeggen wat God wel of niet moet doen, Albert!"*. Einstein dacht dat er nog een hele wereld achter de statistische golf functie ψ bestond en als we die zouden kennen, dan konden we alles weer exact uitrekenen op de manier zoals we die kennen uit de klassieke natuurkunde. Hij geloofde in zogenaamde "Verborgene Variabelen" die hopelijk eens ontdekt zouden worden.

De meningsverschillen tussen Bohr en Einstein kun je samenvatten onder de noemer *Verskil in interpretatie van de Kwantumtheorie*. Beide natuurkundigen waren het niet zozeer oneens over de uitkomst van de berekeningen maar meer over hoe je de verschijnselen moest begrijpen, moest uitleggen. Dit had alles te maken met wat voor filosofie ze als individu de natuurkunde en de natuur benaderden. Einstein was van mening dat er een onderliggende objectieve werkelijkheid in de natuur opgesloten zit die we in staat zijn te leren kennen. Bohr was van mening dat je nooit bij die werkelijkheid kon komen en dat je zelfs niet mocht spreken over die objectieve werkelijkheid zonder dat je metingen had uitgevoerd.

Na de storm ziet alles er anders uit

Inmiddels, we zijn in de jaren dertig beland, waren er twee interpretatie kampen in de natuurkunde ontstaan. Een kamp Bohr met medestanders vooral in Heisenberg en de Amerikaanse Oostenrijker Wolfgang Pauli²⁶ (1900-1958) en een kamp Einstein met o.a. Schrödinger als medestander en een aantal

²⁶ Pauli was een van de eersten die belangrijke toepassingen van de kwantumtheorie ontdekte. Hij was de ontdekker van het uitsluitingsprincipe voor elektronen. Dit principe zegt dat twee of meer elektronen zich niet in dezelfde energietoestand kunnen bevinden. Dit is in de scheikunde van groot belang voor de vulling van de

minder bekende natuurkundigen. Bohr's kijk op de kwantumtheorie heet de *Orthodoxe Kopenhagen Interpretatie*. Van Schrödinger zijn de volgende uitspraken m.b.t. de kwantumtheorie bekend:

"I am no friend of probability theory (in quantum theory), I have hated it from the first moment when our dear friend Max Born gave it birth".

"I don't like it, and I'm sorry I ever had anything to do with it."

Kortom, zelfs degenen die hebben bijgedragen tot de basis van de kwantumtheorie keerden zich er op den duur van af. Ze herkenden de klassieke wereld van vroeger niet meer en vonden de theorie afschuwelijk en lelijk.

Gedesilluseerd hield ook Einstein op mee te denken over de verdere opbouw van de kwantumtheorie. Een laatste poging om de theorie onderuit te halen ondernam hij in 1934 d.m.v. het zogenaamde *Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) Gedachtenexperiment*. Hierin trachtte hij de Kwantumtheorie belachelijk te maken door de consequenties van de theorie tot in het extreme door te voeren. Zijn gedachtegang betekende dat twee deeltjes die ooit met elkaar in contact waren geweest en samen een golf functie hadden gevormd (dat kan volgens de kwantumtheorie), nog steeds een gezamenlijke golf functie kunnen hebben nadat ze zich tot op grote afstand van elkaar hebben verwijderd²⁷. Het andere deeltje kan zelfs aan de andere kant van ons melkwegstelsel zijn, of nog verder. Meting van een eigenschap van het ene deeltje zou volgens de kwantumtheorie **onmiddellijk** dezelfde eigenschap van het andere deeltje reël maken. M.a.w. er wordt dan als het ware informatie uitgewisseld tussen de twee deeltjes met een snelheid oneindig groter dan die van het licht, en dit kan niet volgens de relativiteitstheorie. Een experiment in 1980 in Parijs o.l.v. Alain Aspect (geb. 1947), weliswaar op veel kleinere schaal maar nog wel representatief, toonde aan dat Einstein ongelijk had; er bestaat weldegelijk nog fysisch contact tussen twee dergelijke deeltjes!



Alain Aspect (1947), Peter Higgs (1929), David Bohm (1917-1992) en Carl Anderson (1905-1991)

De geschiedenis van de kwantumtheorie is hiermee zeker niet klaar. Nadat de fundamentele principes in 1930 eenmaal stonden, veranderde de theoretische natuurkunde meer en meer in een wiskundige bezigheid. Vooral Dirac was een voorstander de kwantumtheorie te laten leiden door wiskundige schoonheid en symmetrie. Op deze wijze ontdekte hij, nadat hij de kwantumtheorie met de speciale relativiteitstheorie

schillen K, M, N, ... met elektronen. Het uitsluitingsprincipe is ook de reden dat je niet door de vloer zakt en dat de meeste materie zo hard en ondoordringbaar is. Het kwantumgedrag van elektronen houdt dit tegen.

²⁷ Zulke deeltjes en bijbehorende golf functies heten in het Engels *Entangled*. In het Nederlands betekent dit zoiets als *verstrengeld*.

had verbonden, het *positron* of anti-elektron in zijn vergelijkingen²⁸. Het positron is een kopie van het elektron maar dan positief geladen en is het eerste deeltje waarvan het bestaan eerst theoretisch voorspeld is en later pas is aangetoond in een experiment (1932, Carl Anderson). De ontdekking van het positron vormde een aanzet om de kwantumtheorie nog meer als een wiskundige bezigheid te beschouwen. Heden ten dage is deze houding tot in het extreme doorgevoerd. Een prachtig voorbeeld van de door Dirac begonnen zucht naar wiskundige orde en symmetrie in de natuurkunde is de ontdekking van het Higgs-deeltje in 2013. In 1965 door Peter Higgs (geb. 1929) opgevoerd als een ontbrekend symbool in een wiskundige vergelijking, maar bijna 50 jaar later ontdekt in het grootste meetinstrument dat mensen ooit hebben gebouwd (CERN, Zwitserland).

Tegenwoordig is de zogenaamde *String Theorie* populair, een zeer geavanceerde en abstracte kwantumtheorie. Deze vat de fundamentele deeltjes zoals elektronen en quarks niet meer op als harde bolletjes maar als trillende snaartjes (soort van trillende elastiekjes) die open of gesloten kunnen zijn en op verschillende manieren kunnen trillen. Elke soort trilling hoort dan bij een fundamenteel deeltje. Het merendeel van de natuurkundige gemeenschap is redelijk zeker over het bestaan van zulke strings, maar om dit experimenteel aan te tonen heeft men apparatuur nodig ter grootte van de baan van de maan om de aarde. Niet iets wat in de nabije toekomst gaat gebeuren.

Verder zijn er naast de orthodoxe Kopenhagen interpretatie nog andere interpretaties van de kwantumtheorie verzonnen, die alle dezelfde antwoorden geven maar de natuur op microscopisch niveau verschillend opvatten. Zo is er de interpretatie van David Bohm (1917-1992) uit 1950 waarbij deeltjes hun realiteit enigszins hebben teruggekregen en waar banen en snelheden van de deeltjes weer te berekenen zijn. Maar wat je ervoor terug krijgt is een fundamenteel niet-lokaal gedrag van de natuur, waarbij het heel gewoon is dat er verbanden zijn tussen deeltjes die eigenlijk niets met elkaar te maken kunnen hebben en waarbij de wereld als een holistisch geheel opgevat dient te worden.

Verder zijn er ook natuurkundigen die niets moeten hebben van bovenstaande filosofische geneuzel. Een belangrijke figuur is Richard Feynman (1918-1988) die het "Shut up and Calculate" principe aanhing: gebruik nu maar alleen de wiskundige principes en regels van de kwantumtheorie en denk verder niet na over interpretaties. Dat is zinloos en zonde van je tijd.

Het zonnetje schijnt weer, maar wel in een vreemde wereld

Welkom in de prachtige (heldere?), maar bizarre wereld van de kwantumtheorie.

- Waar deeltjes niet lijken te bestaan voordat minstens een eigenschap gemeten is (Bohr interpretatie).
- Waar contact tussen deeltjes de wetten van de relativiteit lijken te breken (EPR-experiment).
- Waar deeltjes zo maar kunnen ontstaan uit het niets zonder dat er een reden voor was. Oorzaak en gevolg staat op losse schroeven.
- Waar deeltjes soms door ondoordringbare barrières heen kunnen gaan (tunneleffect).
- Waar deeltjes als een golf van het ene punt naar het andere punt lijken te gaan door eerst alle mogelijke paden af te 'testen' en een pad uit te kiezen die het meest waarschijnlijk is (maar niet altijd).
- Waar fundamentele deeltjes geboren worden in wiskundige vergelijkingen en hun feitelijke ontdekking slechts een kwestie van beschikbare technologie lijkt te zijn.

²⁸ Dirac zelf dacht in eerste instantie dat de voorspelling van het positron niet waar kon zijn. Toen Anderson het bestaan van het positron experimenteel eenmaal aangetoond had, zou Dirac hebben gezegd dat de vergelijking intelligenter was dan zijn ontdekker.

- Waar schoonheid en symmetrie de klok slaat.

Maar waar niets zeker meer is...

De toekomst

Hoewel de theorie van de kwantummechanica misschien schokkend en in wezen onbegrijpelijk is, zullen de praktische toepassingen ervan verstrekkende consequenties krijgen in jullie latere leven. Hier beneden volgen enkele voorbeelden van het gebruik van kwantumtheorie die we nu al tegenkomen of die in de toekomst een rol zullen spelen.

1. Medische technologie: NMR, PET- en SPECT-scanners.
2. Zonne-energie: foto-elektrisch effect.
3. Nano-technologie, d.w.z. het schemergebied tussen kwantum gedrag en klassiek gedrag van materiële deeltjes.
4. Kwantum informatie technologie: kwantum computers!
5. Jouw uitvinding? Misschien heb jij later wel een goed idee dat gebruik maakt van de kwantumtheorie en de wereld ietsje beter maakt....

Opgave

Maak een lijst van alle genoemde natuurkundige grootheden in bovenstaande tekst, zoals positie, snelheid/impuls, golffunctie etc.. Geef de definities, symbolen en eenheden.

Referenties:

Alle foto's van de natuurkundigen zijn afkomstig uit de Nederlandse versie van Wikipedia.

[1] Fig 2: <https://alfal survey.wordpress.com/2009/03/11/how-hot-is-that-galaxy/>

[2] Fig 3: http://nl.wikipedia.org/wiki/Foto-elektrisch_effect

Appendix C: Questionnaire

Naam:

Klas:

Hieronder volgen een aantal vragen.

- Vul ze in aan de hand van wat je de laatste drie lessen hebt opgestoken.
- Het is voor de evaluatie van de lessenserie belangrijk om te weten **waarom** je een bepaalde keuze bij een vraag hebt gemaakt. Vul dus je toelichting – indien dit gevraagd wordt – serieus in en niet met iets zoals ‘omdat we dit hebben geleerd’. Denk erover na.
- Laat bij het nadenken je intuïtie en voorstellingsvermogen samenwerken met je verstand. Het gaat er bij dit onderzoek ook om te weten **hoe** je de stof begrijpt.
- Laat je niet in verwarring brengen doordat er geen exacte antwoorden als keuze opgegeven zijn.

Bedankt voor het invullen!

1. Als je gaat kijken naar hoe in de kwantumtheorie het meten in natuurkundige experimenten wordt opgevat, dan moet je concluderen dat atomen en andere microscopisch kleine deeltjes niet bestaan. Ja, misschien eventjes tijdens de meting, maar daarna verdwijnen ze weer.
 - A. Helemaal mee eens
 - B. Meer eens dan oneens
 - C. Zowel eens als oneens
 - D. Meer oneens dat eens
 - E. Helemaal mee oneens.

Ik kies dit antwoord omdat:

2. Zelfde als vraag 1, maar nu m.b.t. fotonen i.p.v. deeltjes.
 - A. Helemaal mee eens
 - B. Meer eens dan oneens
 - C. Zowel eens als oneens
 - D. Meer oneens dat eens
 - E. Helemaal mee oneens.

Ik kies dit antwoord omdat:

3. Dat gefilosofeer of atomen/fotonen wel of niet bestaan is onbelangrijk . Natuurkunde moet zich bezighouden met fysische dingen die werken en nut hebben.
 - A. Helemaal mee eens
 - B. Meer eens dan oneens
 - C. Zowel eens als oneens

- D. Meer oneens dat eens
- E. Helemaal mee oneens.

4. Kwantumtheorie kun je het beste met wiskundige formules begrijpen.

- A. Helemaal mee eens
- B. Meer eens dan oneens
- C. Zowel eens als oneens
- D. Meer oneens dat eens
- E. Helemaal mee oneens.

5. Ondanks alles is het toch mogelijk dat je een visuele voorstelling (tekening) van deeltjes atomen en moleculen kunt maken die realistisch is.

- A. Helemaal mee eens
- B. Meer eens dan oneens
- C. Zowel eens als oneens
- D. Meer oneens dat eens
- E. Helemaal mee oneens.

6. Microscopisch kleine deeltjes bewegen zich voort van punt naar punt in de ruimte, waarbij de baan de vorm van een golf heeft.

- A. Helemaal mee eens
- B. Meer eens dan oneens
- C. Zowel eens als oneens
- D. Meer oneens dat eens
- E. Helemaal mee oneens.

7. De golffunctie ψ van microscopisch kleine deeltjes is niet iets fysisch/bestaands. Het bevat alleen maar informatie over deeltjes – d.w.z. de kans om deeltjes ergens aan te treffen - en meer niet.

- A. Helemaal mee eens
- B. Meer eens dan oneens
- C. Zowel eens als oneens
- D. Meer oneens dat eens
- E. Helemaal mee oneens.

Ik kies dit antwoord omdat:

8. Als je een kwantum experiment opstelt is dit per definitie niet-objectief van aard, omdat bij elke meting een deeltje verstoord wordt door de waarneming en dus door de waarnemer die het experiment heeft opgesteld. In de kwantumtheorie zijn dus geen objectieve waarnemingen mogelijk.

- A. Helemaal mee eens
- B. Meer eens dan oneens
- C. Zowel eens als oneens

- D. Meer oneens dat eens
- E. Helemaal mee oneens.

Ik kies dit antwoord omdat:

9. In het Twee Spleten Experiment met materiële deeltjes gaan de deeltjes steeds door 1 spleet tegelijk en niet door twee spleten.
- A. Helemaal mee eens
 - B. Meer eens dan oneens
 - C. Zowel eens als oneens
 - D. Meer oneens dat eens
 - E. Helemaal mee oneens.

Ik kies dit antwoord omdat:

10. Er bestaat in wezen geen verschil tussen fotonen en materiële deeltjes omdat beide zowel golf- als deeltjeseigenschappen in experimenten vertonen.
- A. Helemaal mee eens
 - B. Meer eens dan oneens
 - C. Zowel eens als oneens
 - D. Meer oneens dat eens
 - E. Helemaal mee oneens.

Ik kies dit antwoord omdat:

11. Hoe zit het met de snelheid waarmee die ψ -golf zich voortplant, denk je?
- De snelheid waarmee ψ zich voortplant is precies gelijk aan c , de lichtsnelheid ($\pm 3 \times 10^8$ m/s).
- A. Helemaal mee eens
 - B. Meer eens dan oneens
 - C. Zowel eens als oneens
 - D. Meer oneens dat eens
 - E. Helemaal mee oneens.

Ik kies dit antwoord omdat:

12. We hebben de proef van Young opgesteld en laten fotonen (i.p.v. materiële deeltjes) richting de spleten gaan. We zien op het scherm erachter een interferentiepatroon ontstaan. Het optische interferentiepatroon verdwijnt als we kijken door welke spleet de fotonen gaan.

- A. Helemaal mee eens
- B. Meer eens dan oneens
- C. Zowel eens als oneens
- D. Meer oneens dat eens
- E. Helemaal mee oneens.

13. Als we een foton op bijvoorbeeld een elektron schieten, dan kan er een botsing optreden waarbij het elektron een extra snelheid krijgt en het foton van aard verandert (b.v. richting of frequentie f van het foton).

- A. Helemaal mee eens
- B. Meer eens dan oneens
- C. Zowel eens als oneens
- D. Meer oneens dat eens
- E. Helemaal mee oneens.

14. Elk individueel materieel deeltje heeft zijn eigen golffunctie ψ

- A. Helemaal mee eens
- B. Meer eens dan oneens
- C. Zowel eens als oneens
- D. Meer oneens dat eens
- E. Helemaal mee oneens.

15. Elk individueel foton heeft zijn eigen golffunctie ψ

- A. Helemaal mee eens
- B. Meer eens dan oneens
- C. Zowel eens als oneens
- D. Meer oneens dat eens
- E. Helemaal mee oneens.

16. Indien het Twee Spleten Experiment voor deeltjes herhaald wordt, dan ziet het interferentiepatroon op het scherm er niet hetzelfde uit.

- A. Helemaal mee eens
- B. Meer eens dan oneens
- C. Zowel eens als oneens
- D. Meer oneens dat eens
- E. Helemaal mee oneens.

Ik kies dit antwoord omdat:

17. Het Twee Spleten Experiment toont aan dat (meerdere) elektronen met elkaar interfereren. Dat een elektron met zich zelf interfereert kan niet.

- A. Helemaal mee eens
- B. Meer eens dan oneens

- C. Zowel eens als oneens
- D. Meer oneens dan eens
- E. Helemaal mee oneens.

Ik kies dit antwoord omdat:

18. Hoe men over deeltjes of fotonen denkt is afhankelijk het soort experiment dat je ermee uitvoert.
- A. Helemaal mee eens
 - B. Meer eens dan oneens
 - C. Zowel eens als oneens
 - D. Meer oneens dan eens
 - E. Helemaal mee oneens.

Ik kies dit antwoord omdat:

19. Elektronen worden een voor een afgeschoten op een scherm met twee spleten. De waarneming dat het interferentiepatroon op het detectiescherm zich langzamerhand opbouwt, toont aan dat ieder elektron een eigen golf functie ψ heeft.
- A. Helemaal mee eens
 - B. Meer eens dan oneens
 - C. Zowel eens als oneens
 - D. Meer oneens dan eens
 - E. Helemaal mee oneens.

Ik kies dit antwoord omdat:

20. Een elektron in het atoom bestaat uit een in de ruimte uitgesmeerde ladingswolk.
- A. Helemaal mee eens
 - B. Meer eens dan oneens
 - C. Zowel eens als oneens
 - D. Meer oneens dan eens
 - E. Helemaal mee oneens.

Laatste vraag: welke top 3 dingen neem je mee naar de gewone lessen over Kwantumwereld?

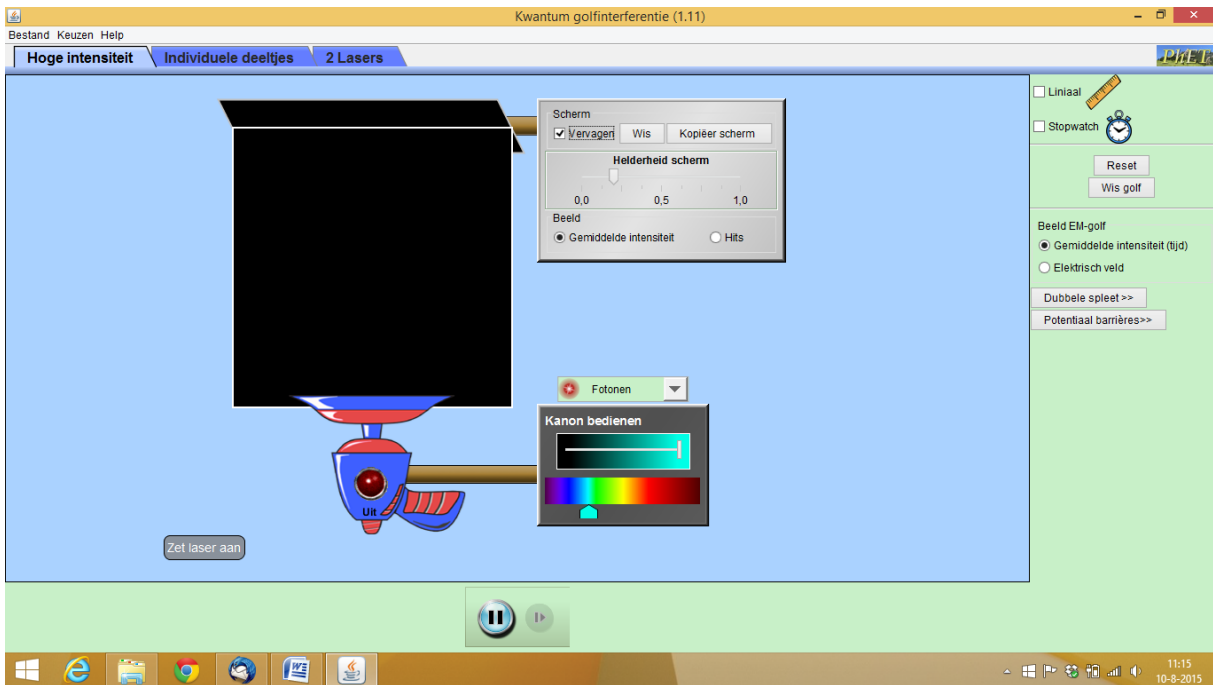
Appendix D: Practicum handleiding

Namen:

Klas:

Vooraf:

Als je het applet hebt opgestart, verschijnt het volgende startscherm:



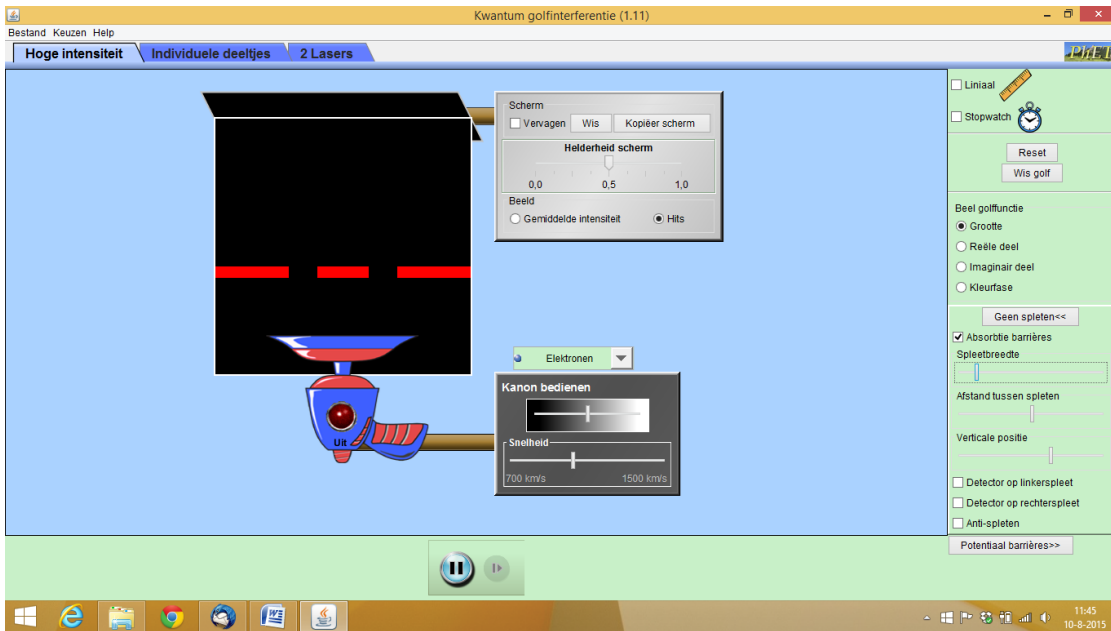
Je ziet een kanon dat deeltjes en fotonen kan afschieten. Het kanon is aan en uit te zetten met de rode knop. De intensiteit, d.w.z. het aantal deeltjes dat per seconde wordt afgeschoten, is bij 'kanon bedienen' in te stellen. Ook de snelheid van de afgevuurde deeltjes is in te stellen. De deeltjes/fotonen kunnen vallen op een (rood) scherm waarin spleten kunnen zitten. Dit scherm kun je rechts configureren. Als de fotonen/deeltjes door de spleten gegaan zijn, vallen ze op een scherm waar ze gedetecteerd worden.

Voordat je begint, stel de simulatie parameters van het applet als volgt in. Het is niet belangrijk dat de waarden bij de schuifbalkjes exact zoals boven moeten worden ingesteld. Probeer zo goed mogelijk te gokken.

- **Kies tab 'Hoge intensiteit' (deze is standaard bij het opstarten).**
- **Box 'Scherm':**
 - 'Helderheid scherm': 0,5
 - Vink 'hits' aan
 - Klik 'vervagen' uit, d.w.z. verwijder het vinkje.
- **Box 'Kanon bedienen':**
 - Zet het schuifbalkje op 50% intensiteit door het balkje met je muis naar het midden van het bereik te schuiven.
 - Deeltjes:
 - Kies 'elektronen' waar in eerste instantie 'fotonen' staat.
 - 'Snelheid' elektronen: ± 1000 km/s, d.w.z. stel het schuifbalkje in op iets minder dan halweg tussen 700 en 1500 km/s.

- Klik 'Dubbele spleet' aan (rechts van het scherm):
 - 'Spleetbreedte': 10%
 - 'Afstand tussen spleten': 50%
 - 'Verticale positie': 65%

Als je alles correct hebt gedaan, krijgt je het volgende scherm:



Bewaar deze instellingen in een file op je computer. Geef zelf een naam en onthoud de directory. Doe dit door in het menu linksboven 'bestand' te kiezen en de file te saveen. Je kunt deze instellingen op elke moment later weer ophalen en activeren.

Opmerkingen:

1. Bij het laden van de instellingen zul je steeds de vetgedrukte parameters opnieuw moeten instellen. Alleen de configuratie van het scherm met de spleten wordt bewaard.
2. VERANDER NIETS AAN DE INSTELLINGEN, BEHALVE ALS DIT VERMELD WORDT IN DE OPGAVEN.

Ga nu aan de gang met het practicum. Lever na afloop de antwoorden in.

Veel succes!

Het elektronenkanon is met bovengegeven configuratie zodanig ingesteld dat het een paar honderd elektronen per seconde kan afvuren. Het scherm aan de achterkant – je kijkt er een beetje schuin van boven op – detecteert de elektronen die door de spleet/spleten gaan.

1. De rechter spleet wordt geblokkeerd. Je doet dit door aan de rechterkant van het scherm de knop 'Potentiaal barrières' in te drukken en vervolgens 'Voeg barrière toe' te kiezen. Je zet het rode blok dat verschijnt op de rechter spleet zodat er geen elektron door kan. Wat is je voorspelling voor wat je op het scherm gaat zien als het kanon twee seconden wordt aangezet?

Mijn voorspelling is:

Druk nu de rode knop aan en na twee seconde weer uit. De gedetecteerde elektronen worden als volgt op het detectiescherm worden uitgespreid:

- a) over een smal gebied tegenover de spleet
- b) meestal op de linkerhelft van het scherm
- c) alleen op de linkerhelft van het scherm
- d) gelijk verdeeld over het gehele scherm

Schets het resultaat op je scherm hier onder (druk eventueel op knop 'Kopieer scherm' om een goed beeld van het resultaat te krijgen):

2. Wis het scherm door de knop 'Wis' in box 'Scherm' in te drukken. Probeer te voorspellen hoe het detectie scherm er uit zal zien als het experiment uit vraag 1 wordt herhaald.

Mijn voorspelling is:

De nu opnieuw het experiment uit vraag 1. Als het experiment wordt herhaald zal het scherm er als volgt uit zien:

- a) precies hetzelfde
- b) bijna hetzelfde
- c) zeer verschillend

Schets het resultaat op je scherm hier onder:

3. Wis het scherm. Blokkeer vervolgens nu de linkerspleet, terwijl de rechterspleet open blijft. Doe dit door het rode blok te verplaatsen met de muis. Probeer te voorspellen hoe het detectiescherm er uit zal zien als het experiment uit vraag 2 wordt herhaald.

Mijn voorspelling is.....

Schets het patroon dat zich op het scherm zal vormen nadat je het kanon weer twee seconden afvuurt.

Vergelijk dit patroon met het patroon uit de vorige opgave. Is er verschil?

.....

4. Wis het scherm. Haal de potentiaalbarrière weg door het kruisje in te drukken, zodat beide spleten weer open zijn. Vuur het kanon weer twee seconden af. Het scherm zal detectie van elektronen tonen die
- a) gelijk verdeeld over het scherm zijn.
 - b) zich in één geconcentreerd gebied bevinden dat aan de randen langzaam verdwijnt.
 - c) zich in twee geconcentreerde gebieden bevinden. Het midden zal weinig 'hits' hebben.
 - d) zich in drie geconcentreerde gebieden. Het midden zal vele 'hits' hebben.

Schets het resultaat op je scherm hier onder:

Vergelijk dit patroon met de patronen waarbij ofwel de linker- ofwel de rechterspleet afgedekt was. Leg uit waarom dit resultaat je **moet** verbazen:

Je gaat vervolgens de intensiteit van het kanon verminderen zodat er slechts één elektron tegelijkertijd door de spleten gaat. Je doet dit als volgt: verminder de intensiteit van het kanon bij 'kanon bedienen' tot beneden de 5% door de schuifbalk voldoende naar links te verzetten.

5. Wis het scherm en zet de helderheid van het scherm op 0,8. Als nu je het kanon continu zou laten vuren en je het voortschrijdende resultaat zou bekijken, probeer een voorspelling van het resultaat te geven en een reden hiervoor.

Mijn voorspelling is:

Laat nu het kanon continu vuren en bekijk het voortschrijdende resultaat. Zet na verloop van tijd (2 minuten) het vuren stil. De meeste elektronen zullen nu landen:

- a) overal op het scherm
- b) bijna overal, maar het waarschijnlijkst in het midden
- c) het waarschijnlijkste zowel in het midden als in twee gebieden links en rechts van het midden op ongeveer 1,2 nm. Gebruik eventueel een lineaalstijl om dit aan te tonen.

- d) Het waarschijnlijkste zowel ongeveer 1.2 nm als op 3.0 nm. Gebruik eventueel een lineaalstokje om dit aan te tonen.

Schets het resultaat op je scherm hier onder:



Je gaat nu de intensiteit van het kanon verminderen zodat er zich slechts één elektron tegelijkertijd in het experiment bevindt; het volgende deeltje wordt pas afgeschoten als de vorige op het scherm is gearriveerd. Je doet dit als volgt:

- ga naar de tab 'individuele deeltjes'.
 - haal de bewaarde configuratie uit de vorige opgaven op en laad hem.
 - Zet de vetgedrukte parameters (zie ook top van dit document) op hun standaardwaarden.
 - Activeer 'Autoherhalen' bij 'kanon bedienen' en 'Rapid' (onderaan het scherm) om de meting sneller te laten verlopen.
6. Wis het scherm. Vuur het kanon af en wacht een tijdje (4-5 minuten) en kijk naar het patroon dat ontstaat. Je kunt halverwege eventueel de knop 'kopieer scherm' indrukken om een betere indruk te krijgen van de resultaten.
Voordat je het experiment uitvoert, probeer een voorspelling van het resultaat te geven en een reden hiervoor.
Mijn voorspelling is:

Hoe zal het patroon op het scherm er nu uitzien?

- a) één uitgespreid gebied dat de som is van twee uitgespreide gebieden behorend bij de individuele spleten.
- b) drie uitgespreide gebieden omdat elke individueel elektron zich als een golf gedraagt.
- c) drie uitgespreide gebieden omdat de elektronen tegen spleetranden kaatsen.

Schets het resultaat op je scherm hier onder:



7. Nu wordt er een detector toegevoegd aan de linkerspleet. Deze detector zal je in staat stellen te detecteren of elektronen door de linker- of door de rechterspleet gaan. Immers, bij detectie gaat het elektron door de linkerspleet en bij niet-detectie gaat hij door de rechterspleet. Een detector blokkeert overigens niet de doorgang van elektronen.
- Ga terug naar de tab 'hoge intensiteit'.
 - Start vanaf het begin door de startconfiguratie weer in te laden en vul de vetgedrukte parameters weer in.
 - vink het veld 'detector op linkerspleet' aan.

- Wis het scherm.
- Activeer het kanon gedurende twee seconden.

Schets het resultaat op je scherm hier onder:

Vergelijk dit patroon met de patronen waarbij ofwel de linker- ofwel de rechterspleet afgedekt was. Heeft het plaatsen van de detector invloed op het resultaat? Probeer weer uit te leggen waarom dit resultaat je **moet** verbazen:.....

8. Wis het scherm. Als je de detector weer weghaalt (vinkje weghalen), en je vuurt het kanon weer gedurende 2 seconden af, dan gaat het elektron door
- de linkerspleet
 - de rechterspleet
 - ofwel de linkerspleet ofwel de rechterspleet, maar je kunt niet weten welke
 - beide spleten
 - geen van beiden spleten

Leg uit waarom je de keuze hierboven hebt gemaakt.....

9. De interferentiepatronen ontstaan doordat een bewegend elektron een voortbewegende golf is. Deze golf gaat door beide spleten en iedere spleet is op zich een trillende bron. De golflengte van een elektron wordt gegeven door $\lambda = h/m_e v$. Hier is:
- $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ kg, de massa van het elektron.
 - $v =$ b.v. 1500 km/s, de snelheid van het elektron.
 - $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Js, de constante van Planck.

Reken voor bovengenoemde waarden de golflengte λ in nm uit. Meet met de liniaal hoe breed de spleten zijn en vergelijk deze waarden met de berekende λ . Is het experiment (kanon, scherm met spleten etc.) met het blote oog te zien? Leg uit waarom wel/niet.

Antwoord:

Als de elektronen zich sneller gaan bewegen, wat gebeurt dan met het gemeten patroon, denk je? Denk aan het experiment van Young uit de les waarbij geen elektronen maar gewoon licht (fotonen) wordt gebruikt. Voordat je het experiment uitvoert, probeer een voorspelling van het resultaat te geven en een reden hiervoor.

Mijn voorspelling is:

.....

Voer nu het experiment uit.

- het patroon zal helderder worden

- b) het patroon zal vager worden
- c) de heldere vlekken zullen dichterbij elkaar gaan staan
- d) de heldere vlekken zullen verder van elkaar af gaan staan

Schets het resultaat met $v = 700$ km/s op je scherm hier onder:

Schets het resultaat met $v = 1500$ km/s op je scherm hier onder:

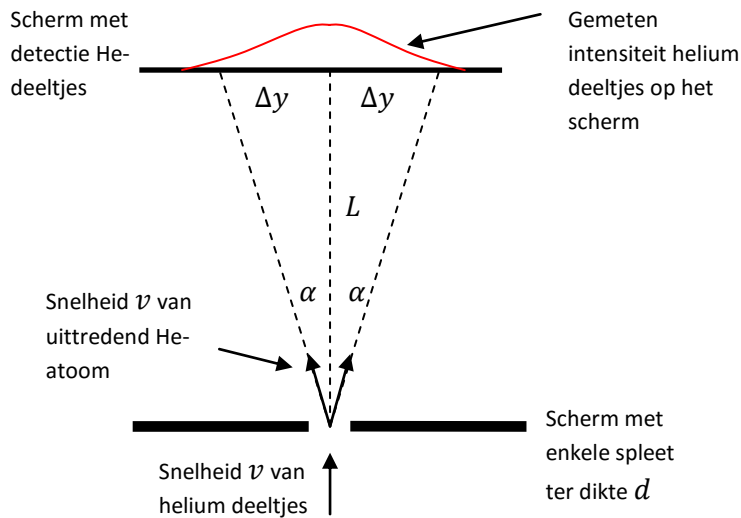
10. Als laatste onderzoeken we de Heisenberg onbepaaldheidsrelatie. Deze relatie zegt dat als je de meeton nauwkeurigheid Δx in de positie bepaalt (in ons experiment is dat de breedte van een spleet), de meeton nauwkeurigheid van de impuls Δp van het deeltje daarvan afhangt. Het verband is: $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2\pi$. We gaan onderzoeken of dit verband inderdaad ook geldt in het volgende experiment.

We gaan uit van een hele nieuwe meetsituatie. Stel de volgende parameters in:

- Helium atomen
- 'Kanon bedienen': 20%
- Snelheid: 0,15 km/s
- 'Helderheid scherm': 60%
- Scherm: 'hits', zet 'vervagen' uit.
- Vink 'anti-spleten' aan.
- 'Spleetbreedte': 60%
- 'Afstand spleten': 100%
- 'Verticale positie': 90%

Wat we in dit experiment in feite doen is d.m.v. de spleet een plaatsbepaling van het He-atoom uitvoeren. De meeton nauwkeurigheid en dus de onnauwkeurigheid Δx van de plaats is d , de breedte van de spleet. Heisenberg zegt dat je een dergelijke plaatsbepaling alleen kunt doen indien je een stuk van de impuls nauwkeurigheid Δp opgeeft. We gaan in dit experiment bepalen hoe groot Δx en Δp zijn.

Wanneer je het kanon weer 2 seconden laat afvuren, zie je op het scherm dat de He-atomen voornamelijk binnen een gebied van 80% op het scherm worden gedetecteerd. De volgende figuur geeft de situatie schematisch aan.



- Zie figuur: meet L , Δy , d in nanometers (nm) m.b.v. de liniaal. Hierbij is d de dikte van de spleet.
- Wat is de massa m_{He} , van een He-atoom in kg? Gebruik tabel 25 van het BINAS boek.
Berekening m_{He} :

- De impuls van een binnenvallend He-atoom is $p = m_{\text{He}} \cdot v$, waarbij v de snelheid is van het binnenvallende He-atoom. Je kunt er vanuit gaan dat alleen de richting van de snelheid van het atoom nadat het door de spleet is gegaan verandert, en niet de grootte (zie figuur hierboven). Ga nu na dat:

$$\Delta p = m_{\text{He}} \cdot v \cdot \sin(\alpha) = m_{\text{He}} \cdot v \cdot \frac{\Delta y}{L}$$

- Check nu dat $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2\pi$, met $\Delta x = d$.
Berekening:

Appendix E: Reductie van de ingevulde questionnaire

Beschrijving der kolommen:

- Kolom 1 ('Nr'): leerling nummer. De namen van de leerlingen zijn geanonimiseerd.
- Kolom 2-21 ('1-20'): de individuele beantwoording van de 20 vragen.
- Kolom 22 ('Score'): de score van een leerling wordt gegeven als het gemiddelde over de twintig vragen van de absolute waarde van de afwijking van een voorkeursantwoord:

$$S := \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} |v(i) - v_i|$$

Hierbij is $v(i)$ het antwoord (waarden: 1...5) op vraag i en v_i (waarden: 1...5) het voorkeursantwoord op vraag i . N.B.: een score wordt als beter geïnterpreteerd indien S een kleiner getal is.

- Kolom 23 ('Cijfer'): het cijfer op het eindrapport 5-VWO per leerling.

Beschrijving der rijen:

- R1: het voorkeursantwoord op de vraag (rood gekleurd)
- R2: statistische spreiding (per klas) van de gegeven antwoorden om het voorkeursantwoord R1 (rood gekleurd)
- R3: Het gemiddelde van de gegeven antwoorden per vraag
- R4: de spreiding om het gemiddelde R3

Op de plekken waar een geel veld is, heeft de betreffende leerling niets ingevuld. Hiermee is rekening gehouden bij de berekening van S .

Tabel 1: Resultaten Klas A (controle groep, passief)

Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	S	Cijfer
1	3	3	3	2	4	4	1	2	1	5	1	5		1	5	1	5	2	5	1	1,16	5,4
2	1	1	4	4	4	1	1	5	5	1	5	1	1	1	5	5	5	1	5	1	1,30	7,3
3	1	5	4	1	2	4	2	5	2	4	4	4	3	5	5	5	5	1	1	2	1,60	5,3
4	1	1	3	3	1	3	1	1	4	1	3	5	1	1	1	5	5	1	1	1	1,50	5,7
5	2	2	4	4	2	2	2	2	4	4	4	2	2	2	2	4	3	4	2	4	1,60	6,5
6	3	3	2	3	2	5	1	1	4	5	3	4	2	2	4	4	5	2	4	2	1,40	7,1
7	1	1	3	5	2	3	1	2	5	1	4	1	5	2	4	4	3	2	5	1	1,60	6,9
8	4	2	1	1	1	3	4	5	2	4	3	5	1	1	1	2	1	1	2	4	1,85	7,0
9	2	2	5	2	4	1	1	2	1	4	5	2	2	1	1	2	5	4	1	1	1,25	6,9
10	3	3	4	3	1	5	1	2	5	2	3	1	2	2	2	5	4	1	2	4	1,60	7,3
11	1	1	2	5	1	1	1	5	1	5	5	5	1	2	2	5	1	5	1	5	2,20	7,6
12	2	2	3	5	4	2	1	2	3	4	3	1	1	1	1	4	4	1	1	1	1,15	6,0
13	1	1	5	5	2	1	3	2	4	2	4	1	2	2	2	5	5	2	5	2	1,55	6,9
14	1	1	5	5	3	2	2	4	1	2	4	1	1	1	3	3	3	1	5	1	1,40	6,5
15	1	3	4	5	2	1	4	1	3	5	5	5	1	1	1	5	5	2	5	2	1,60	6,8
16	1	1	3	4	2	3	1	1	3	3	3	2	1	1	5	5	5	1	1	1	1,00	7,1
17	5	5	5	3	4	5	3	2	2	4	3	4	1	4	5	4	5	1	3	3	1,40	7,9
18	5	4	4	4	4	2	3	4	3	5	2	2	1	3	2	2	1	2	1	2	1,65	6,7
19	1	1	5	2	4	3	1	2	5	1	1	1	1	5	5	5	5	1	4	1	1,35	8,1
20	2	2	4	4	2	3	3	4	4	2	4	1	1	1	1	2	2	1	2	2	1,30	6,3
21	3	3	5	4	4	2	2	3	4	1	5	4	5	1	1	5	4	1	1	5	2,00	6,4
R1	1	1	3	2	5	5	3	2	3	5	5	1	1	1	5	1	5	1	2	1	1,5	6,7
R2	1,8	2,0	1,4	2,0	2,8	2,6	1,5	1,7	1,4	2,4	2,0	2,6	1,6	1,8	2,9	3,3	1,9	1,4	1,8	1,9	(gem)	(gem)
R3	2,1	2,2	3,7	3,5	2,6	2,7	1,9	2,7	3,1	3,1	3,5	2,7	1,8	1,9	2,8	3,9	3,9	1,8	2,7	2,2		
R4	1,3	1,3	1,1	1,3	1,2	1,4	1,1	1,5	1,4	1,6	1,2	1,7	1,3	1,3	1,7	1,3	1,5	1,2	1,7	1,4		

- R1: het voorkeursantwoord op de vraag
- R2: statistische spreiding (per klas) van de gegeven antwoorden om het voorkeursantwoord R1
- R3: Het gemiddelde van de gegeven antwoorden per vraag
- R4: statistische spreiding om het gemiddelde R3

Tabel 2: Resultaten Klas B (interventie groep, actief)

Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	S	Cijfer
1	2	4	3	1	4	3		2	1	4		2	1	4	2	5	2	2	4	1	1,63	5,3
2	5	5	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	5	1	1	5	1,80	6,9
3	1	2	3	1	1	5	2	2	5	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,10	8,8
4	2	4	1	3	4	1	4	4	5	5	4	2	1	1	5	1	3	5	1	3	1,40	5,7
5	2	4	2	2	4	2	2	2	1	4	4	1	3	2	4	1	1	2	4	2	1,30	5,8
6	2	4	5	5	2	1	5	2	5	5	4	4	2	2	4	2	1	1	1	1	1,65	5,1
7	1	1	2	2	1	2	1	1	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	5	1,30	8,4
8	4	5	5	2	1	1	1	1	3	2	5	1	1	1	1	1	1	1	5	4	1,85	6,2
9	4	2	1	5	1	1	1	2	5	5	5	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1,35	5,8
10	3	3	5	2	2	4	5	2	5	4	5	2	4	2	2	1	5	2	2	3	1,30	6,7
11	4	4	3	2	2	2	3	1	5	5	3	4	1	2	4	1	4	1	1	1	1,20	8,8
12	2	2	3	4	2		1	2	5	3	1	1	2	1	1	1	1	1	1	5	1,63	6,3
13	2	3	1	4	2	1	2	4	5	4	4	1	2	4	3	1	1	2	3	1	1,65	5,8
14	5	4	4	4	2	3	3	4	3	5	2	2	2	2	4	2	3	2	1	4	1,60	7,5
15	4	4	3	2	1	3	2	2	3	5	4	2	2	5	4	1	2	2	4	5	1,55	8
16	5	5	5	5	5	5	1	1	5	4	5	1	1	1	5	1	5	1	5	1	1,10	6,7
17	3	3	1	5	1	1	2	1	5	3	5	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1,70	7,2
18	2	5	3	2	2	2	1	2	1	4	1	2	1	1	5	1	1	1	4	3	1,45	7,3
19	5	1	1	2	1	2	1	4	3	2	3	1	3	1	1	1	5	3	1	5	1,75	7,4
20	1	1	2	1	2	2	5	4	5	1	1	1	1	1	1	5	1	1	5	1	1,85	7,1
21	4	4	2	2	2	2	2	3	2	3	2	2	2	1	4	1	4	2	2	1	1,30	7,9
22	5	1	1	4	1	1	5	5	5	1	5	1	1	1	1	1	1	5	1	5	2,20	6,0
23	2	3	3	2	2	5	2	3	4	3	2	1	1	2	2	1	5	3	1	2	1,10	7,6
R1	1	1	3	2	5	5	3	2	3	5	5	1	1	1	5	1	5	1	2	1	1,5	6,9
R2	2,5	2,7	1,5	1,6	3,4	3,2	1,8	1,3	1,8	2,3	2,5	1,1	1,0	1,3	3,0	1,2	3,2	1,5	1,6	2,4	(gem)	(gem)
R3	3,0	3,2	2,6	2,7	2,0	2,7	2,4	2,4	3,8	3,4	4,0	1,6	1,6	1,7	2,7	1,4	2,5	1,9	2,3	2,7		
R4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,2	1,4	1,5	1,2	1,6	1,5	1,6	0,9	0,8	1,1	1,6	1,2	1,7	1,2	1,6	1,7		

- R1: het voorkeursantwoord op de vraag
- R2: statistische spreiding (per klas) van de gegeven antwoorden om het voorkeursantwoord R1
- R3: Het gemiddelde van de gegeven antwoorden per vraag
- R4: statistische spreiding om het gemiddelde R3

Appendix F: Statistische verwerking per vraag

Kolom 'Keuze': 1 (Helemaal mee eens) t/m 5 (Helemaal mee oneens).

Kolom 'Aantal': het aantal keren dat de vraag gekozen is, per klas.

Kolom 'Rel.Freq': $(\text{Aantal gekozen})/(\text{Aantal antwoorden})$. Niet altijd zijn vragen door leerlingen ingevuld, zodat de noemer kan afwijken van respectievelijk 23 en 21.

Het voorkeursantwoord per vraag wordt onder de vraag tussen haakjes aangegeven. Bijvoorbeeld voor VRAAG 1 is het voorkeursantwoord (1).

VRAAG 1
(1)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	3	0,13	1	10	0,48
2	8	0,35	2	4	0,19
3	2	0,09	3	4	0,19
4	5	0,22	4	1	0,05
5	5	0,22	5	2	0,10
	23			21	

VRAAG 2
(1)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	4	0,17	1	8	0,38
2	3	0,13	2	5	0,24
3	4	0,17	3	5	0,24
4	8	0,35	4	1	0,05
5	4	0,17	5	2	0,10
	23			21	

VRAAG 3
(3)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	7	0,30	1	1	0,05
2	4	0,17	2	2	0,10
3	7	0,30	3	5	0,24
4	1	0,04	4	7	0,33
5	4	0,17	5	6	0,29
	23			21	

VRAAG 4
(2)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	4	0,17	1	2	0,10
2	10	0,43	2	3	0,14
3	1	0,04	3	4	0,19
4	4	0,17	4	6	0,29
5	4	0,17	5	6	0,29
	23			21	

VRAAG 5
(5)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	9	0,39	1	4	0,19
2	10	0,43	2	8	0,38
3	0	0,00	3	1	0,05
4	3	0,13	4	8	0,38
5	1	0,04	5	0	0,00
	23			21	

VRAAG 6
(5)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	7	0,32	1	5	0,24
2	7	0,32	2	5	0,24
3	4	0,18	3	6	0,29
4	1	0,05	4	2	0,10
5	3	0,14	5	3	0,14
	22			21	

VRAAG 7
(3)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	8	0,36	1	11	0,52
2	7	0,32	2	4	0,19
3	2	0,09	3	4	0,19
4	1	0,05	4	2	0,10
5	4	0,18	5	0	0,00
	22			21	

VRAAG 8
(5)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	6	0,26	1	4	0,19
2	9	0,39	2	9	0,43
3	2	0,09	3	1	0,05
4	5	0,22	4	3	0,14
5	1	0,04	5	4	0,19
	23			21	

VRAAG 9
(3)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	4	0,17	1	4	0,19
2	1	0,04	2	3	0,14
3	4	0,17	3	4	0,19
4	1	0,04	4	6	0,29
5	13	0,57	5	4	0,19
	23			21	

VRAAG 10
(5)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	4	0,17	1	5	0,24
2	2	0,09	2	4	0,19
3	4	0,17	3	1	0,05
4	6	0,26	4	6	0,29
5	7	0,30	5	5	0,24
	23			21	

VRAAG 11
(5)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	4	0,18	1	2	0,10
2	3	0,14	2	1	0,05
3	2	0,09	3	7	0,33
4	5	0,23	4	6	0,29
5	8	0,36	5	5	0,24
	22			21	

VRAAG 12
(1)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	14	0,61	1	8	0,38
2	7	0,30	2	4	0,19
3	0	0,00	3	0	0,00
4	2	0,09	4	4	0,19
5	0	0,00	5	5	0,24
	23			21	

VRAAG 13
(1)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	14	0,61	1	12	0,60
2	6	0,26	2	5	0,25
3	2	0,09	3	1	0,05
4	1	0,04	4	0	0,00
5	0	0,00	5	2	0,10
	23			20	

VRAAG 14
(1)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	14	0,61	1	11	0,52
2	6	0,26	2	6	0,29
3	0	0,00	3	1	0,05
4	2	0,09	4	1	0,05
5	1	0,04	5	2	0,10
	23			21	

VRAAG 15
(5)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	9	0,39	1	7	0,33
2	3	0,13	2	5	0,24
3	1	0,04	3	1	0,05
4	7	0,30	4	2	0,10
5	3	0,13	5	6	0,29
	23			21	

VRAAG 16
(1)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	19	0,83	1	1	0,05
2	2	0,09	2	4	0,19
3	0	0,00	3	1	0,05
4	0	0,00	4	5	0,24
5	2	0,09	5	10	0,48
	23			21	

VRAAG 17
(5)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	11	0,48	1	3	0,14
2	2	0,09	2	1	0,05
3	2	0,09	3	3	0,14
4	3	0,13	4	3	0,14
5	5	0,22	5	11	0,52
	23			21	

VRAAG 18
(1)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	11	0,48	1	12	0,57
2	7	0,30	2	6	0,29
3	3	0,13	3	0	0,00
4	0	0,00	4	2	0,10
5	2	0,09	5	1	0,05
	23			21	

VRAAG 19
(2)

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	12	0,52	1	8	0,38
2	2	0,09	2	4	0,19
3	2	0,09	3	1	0,05
4	4	0,17	4	2	0,10
5	3	0,13	5	6	0,29
	23			21	

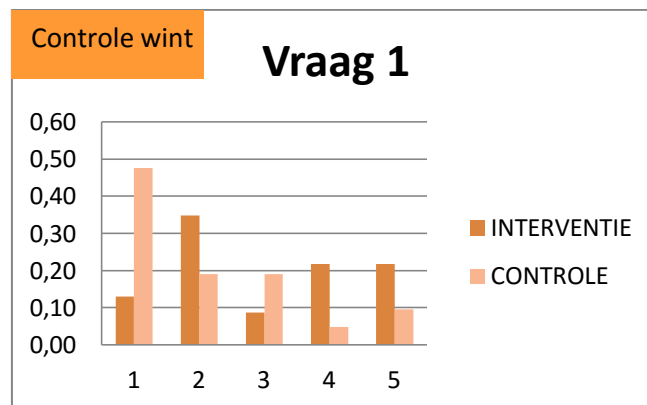
VRAAG 20**(1)**

INTERVENTIE			CONTROLE		
Keuze	Aantal	Rel.Freq	Keuze	Aantal	Rel.Freq
1	10	0,43	1	9	0,43
2	2	0,09	2	6	0,29
3	3	0,13	3	1	0,05
4	2	0,09	4	3	0,14
5	6	0,26	5	2	0,10
	23			21	

Appendix G: Analyse per vraag

In de figuren die beneden volgen zijn per vraag uit de questionnaire de relatieve frequenties gegeven van de antwoorden die de twee klassen hebben gegeven. In blauw, de donkere staaf, is steeds het voorkeursantwoord aangegeven (deze zijn gegeven in [Tabel 3-1](#)). De bepaling van de relatieve frequenties uit de ruwe data, wordt gegeven [Appendix E: Reductie van de ingevulde questionnaire](#).

Linksboven is aangegeven welke groep beter scoort in het beantwoorden van de betreffende vraag: controle of interventie. Om het lezen eenvoudiger te maken, zijn alle vragen nog eens letterlijk overgenomen. Rechtsboven is aangegeven waar de mis- (M) dan wel preconcepties (P) verwacht werden. Bij geen verwachting is het veld leeg gelaten.



Vraag:

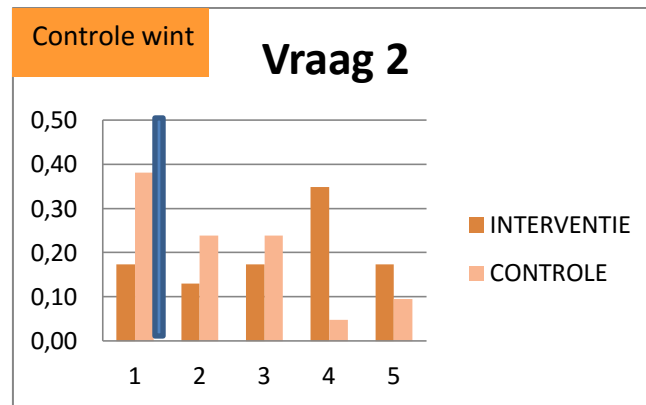
Als je gaat kijken naar hoe in de kwantumtheorie het meten in natuurkundige experimenten wordt opgevat, dan moet je concluderen dat atomen en andere microscopisch kleine deeltjes niet bestaan. Ja, misschien eventjes tijdens de meting, maar daarna verdwijnen ze weer.

Bespreking:

De controle groep is gemiddeld genomen zekerder van zijn zaak dan de interventie groep, en geeft ook het juiste antwoord. De interventie groep is verdeeld hierover, met een lichte bias naar het juiste antwoord.

Conclusie:

De controle groep accepteert Bohr's visie (d.w.z. de juiste voor meetprocessen) voor deeltjes beter dan de interventie groep. Een mogelijke verklaring is dat dit onderwerp ook in de documentaire aan de orde is geweest.



Vraag:

Zelfde als vraag 1, maar nu m.b.t. fotonen i.p.v. deeltjes.

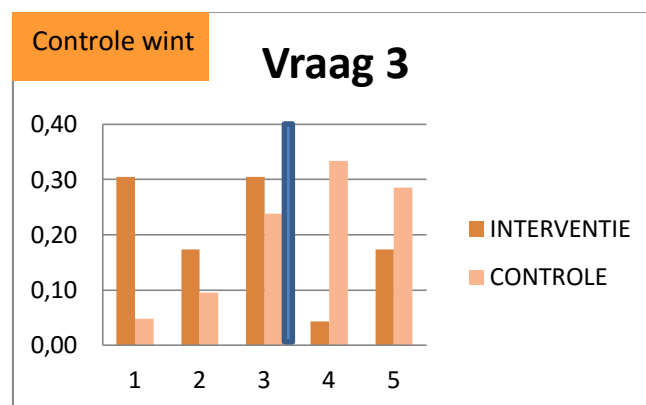
Bespreking:

Deze vraag had het zelfde beantwoord moeten worden als vraag 1: eigenschappen van individuele fotonen zijn volgens Bohr evenmin reëel als deeltjes, wanneer ze niet gemeten worden.

De controle groep is consistent in zijn antwoord t.o.v. vraag 1. De interventie groep niet. De interventie groep schat individuele fotonen reëler in dan deeltjes, hetgeen niet juist is.

Conclusie:

De controle groep accepteert Bohr's visie voor fotonen beter dan de interventie groep. Een mogelijke verklaring is dat dit onderwerp ook in de documentaire aan de orde is geweest.



Vraag:

Dat gefilosofeer of atomen/fotonen wel of niet bestaan is onbelangrijk . Natuurkunde moet zich bezighouden met fysische dingen die werken en nut hebben.

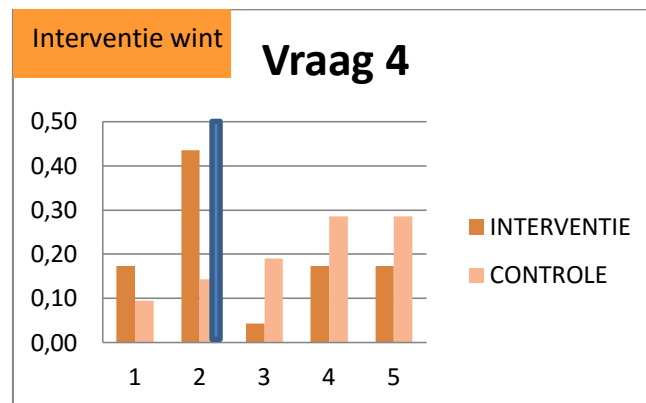
Bespreking:

Hier wordt gevraagd naar de mening van leerlingen over een derde interpretatie van de kwantumtheorie, namelijk die van Feynman ("Shut up and calculate"). Aangezien hier om een mening gevraagd wordt, is er geen eenduidig antwoord mogelijk op deze vraag.

Conclusie:

De controle groep wil gemiddeld genomen meer betekenis toekennen aan kwantum verschijnselen (interpreteren) dan de interventie groep. En mogelijke verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat actieve leerlingen meer bezig zijn met het uitvoeren van recepten (dit is ook de dagelijkse praktijk van kwantum

mechanici) dan met feitelijk stil staan bij wat er gebeurt. Een andere verklaring is dat dit onderwerp ook in de documentaire aan de orde is geweest.



Vraag:

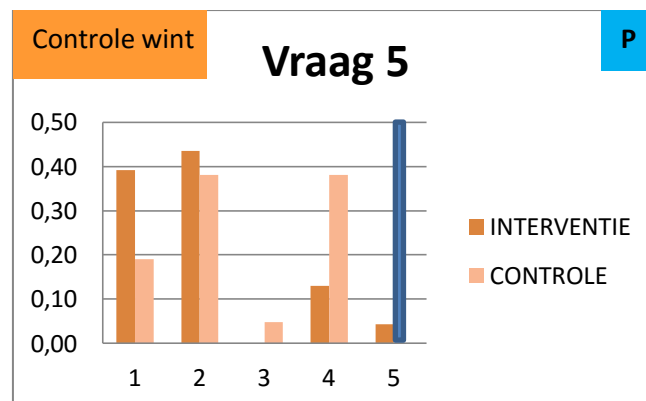
Kwantumtheorie kun je het beste met wiskundige formules begrijpen.

Bespreking:

Deze vraag lijkt op de vorige vraag, maar gaat een stapje verder door te stellen dat de kwantumwereld in principe onbegrijpelijk is en dat de natuur op dit niveau alleen via de wiskunde tot ons spreekt. Dit is maar gedeeltelijk waar. Dagelijkse praktijk is wel wiskunde, maar fysieke interpretatie blijft belangrijk.

Conclusie:

De controle groep neigt meer naar ontkennen van de vraag, en tracht te begrijpen wat er aan de hand is.



Vraag:

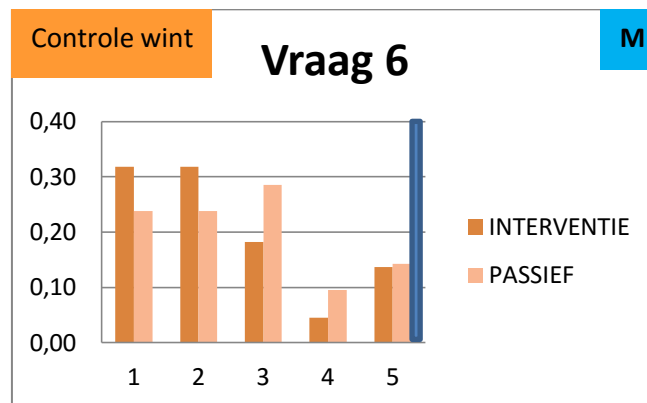
Ondanks alles is het toch mogelijk dat je een visuele voorstelling (tekening) van deeltjes atomen en moleculen kunt maken die realistisch is.

Bespreking:

Beide klassen denken onterecht dat, ondanks de fuzzyheid van de microscopische natuur, het toch mogelijk is om realistische tekeningen te maken van atomen. Dit is een voorbeeld van een **preconceptie**. In de kwantumtheorie is het niet mogelijk om realistische tekeningen te maken van microscopische deeltjes. Kennelijk wordt dit gevoed door het idee dat alle natuurkundige begrippen/concepten altijd voorstelbaar moet zijn.

Conclusie:

Er is nog wel een belangrijke component in de controle groep die naar het juiste antwoord neigt.



Vraag:

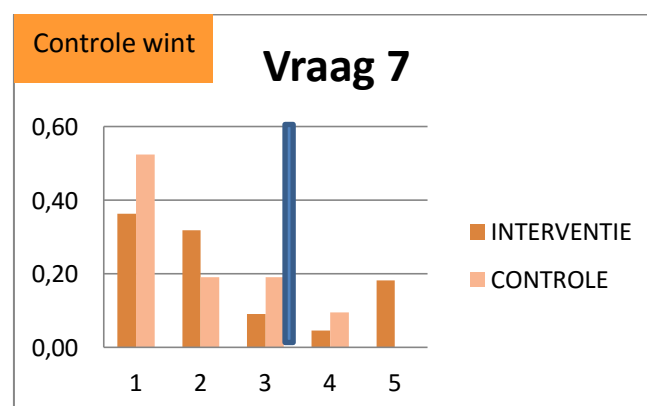
Microscopisch kleine deeltjes bewegen zich voort van punt naar punt in de ruimte, waarbij de baan de vorm van een golf heeft.

Bespreking:

Beide klassen neigen naar bevestigend antwoord. Beide klassen verwarren hierbij de trillende waarschijnlijkheidsgolf met rechte lijnige voortbeweging van deeltjes.

Conclusie:

Dit is een voorbeeld van een **misconceptie**. Deeltjes bewegen zich op microscopisch niveau niet voort in vorm van een golf. Deze misconceptie wordt ook vermeld in de literatuur ((Koopman, 2011) en (Ireson, 2000)). Koopman alleen misconcepten bij universitaire studenten). Beide klassen hebben last van deze misconceptie.



Vraag:

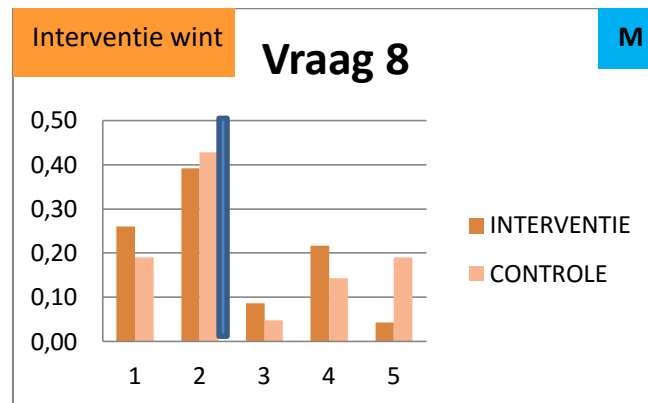
De golf functie ψ van microscopisch kleine deeltjes is niet iets fysisch/bestaands. Het bevat alleen maar informatie over deeltjes – d.w.z. de kans om deeltjes ergens aan te treffen - en meer niet.

Bespreking:

Deze vraag²⁹ motiveert leerlingen na te denken over de aard van de golffunctie. Geeft deze alleen informatie over de eigenschappen van deeltjes (d.w.z. is epistemologisch van aard, een ‘stukje software’) of is deze werkelijk fysisch reëel zoals elektromagnetische golven (ontologisch van aard, een ‘stukje hardware’)? De wetenschappers zijn het er heden ten dage nog steeds over eens. Vandaar 3 als antwoord.

Conclusie:

Kennelijk zien de leerlingen uit beide klassen de golffunctie vaker als informatiebron en niet als fysische realiteit. Geen significant verschil tussen de twee klassen.



Vraag:

Als je een kwantum experiment opstelt is dit per definitie niet-objectief van aard, omdat bij elke meting een deeltje verstoord wordt door de waarneming en dus door de waarnemer die het experiment heeft opgesteld. In de kwantumtheorie zijn dus geen objectieve waarnemingen mogelijk.

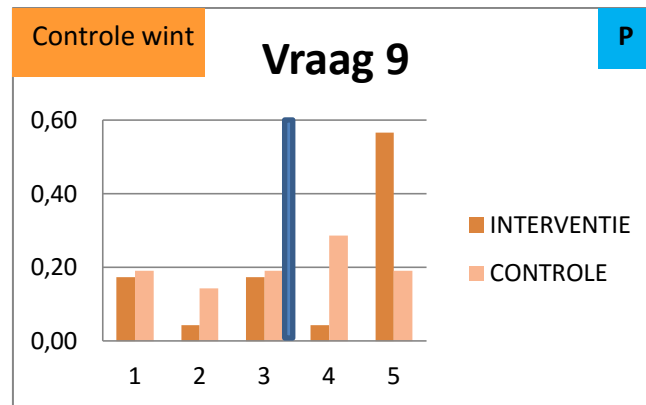
Bespreking:

Beide klassen neigen naar de **misconceptie** van een niet-objectieve natuur op microscopisch niveau. Dit wordt ingegeven door de gedachte dat je als waarnemer het gemeten objecten indirect verstoort bij waarneming. Natuurlijk zijn er objectieve, herhaalbare experimenten mogelijk. De uitkomsten zijn echter niet meer deterministisch, maar dit wil niet zeggen dat het experiment subjectief is. Het opzetten of veranderen van het experiment heeft wel subjectieve trekken: je krijgt waar je om vraagt: deeltje of golfeigenschap. Juist antwoord moet dus 2 zijn.

Conclusie:

Beide klassen neigen naar een niet-objectieve manier van waarnemen, maar tot op zekere hoogte. Geen significant verschil tussen de twee klassen.

²⁹ Een woord van kritiek over de exacte bewoording van de vraag: de leerlingen hebben tijdens de lessen geleerd dat de golffunctie ψ kansverdelingen bevat. Een aantal leerlingen hebben de vraag mogelijk niet goed gelezen en blind gestaard op het laatste. Bij een eventueel volgende enquête dient deze vraag scherper te worden gesteld.



Vraag:

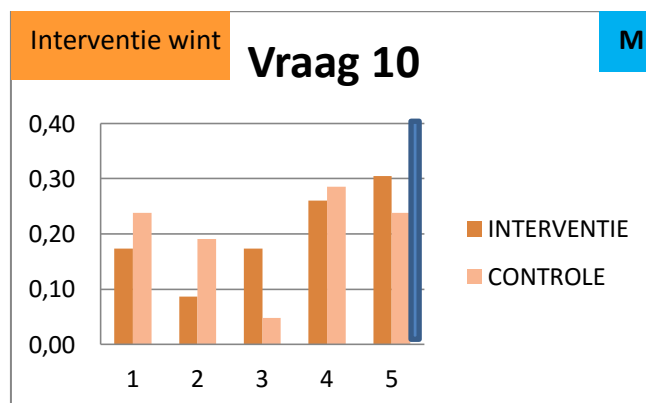
In het Twee Spleten Experiment met materiële deeltjes gaan de deeltjes steeds door 1 spleet tegelijk en niet door twee spleten.

Bespreking:

Dit is de situatie die standaard verwarring en mogelijk een **misconceptie** oplevert, niet alleen bij middelbare scholieren maar ook bij wetenschappers. Men kan niet voorstellen dat deeltjes door twee spleten tegelijk lijken te gaan (preconceptie). Het ligt aan de wijze waarop je het experiment opzet: als je in het experiment naar golfeigenschappen vraagt, dan lijken de deeltjes door twee spleten te gaan. Als je naar deeltjeseigenschappen vraagt, dan gaan de deeltjes door een spleet. Antwoord moet dus 3 zijn.

Conclusie:

De controle groep is van mening verdeeld. De interventie groep ziet het deeltje zich voornamelijk als materiële deeltjes gedragen en niet als golf.



Vraag:

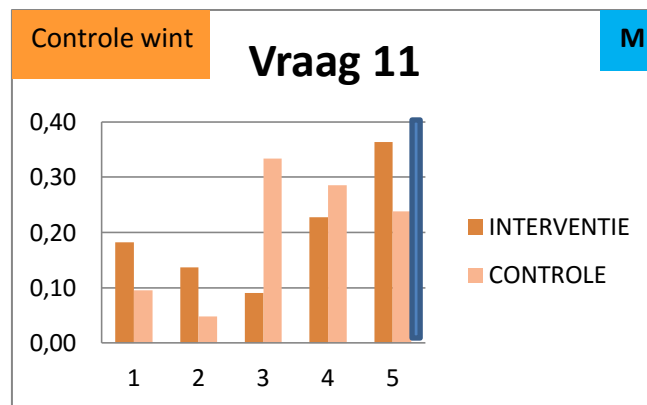
Er bestaat in wezen geen verschil tussen fotonen en materiële deeltjes omdat beide zowel golf- als deeltjeseigenschappen in experimenten vertonen.

Bespreking:

De meesten zijn er het wel over eens dat naast de golfeigenschappen, er meerdere verschillen zijn tussen fotonen als deeltjes. In beide klassen zie je leerlingen die vanwege de kwantumexperimenten toch de **misconceptie** vatten dat er in de kwantumtheorie geen principiële verschillen zijn tussen fotonen en materiële deeltjes.

Conclusie:

Geen significant verschil tussen de beide klassen.



Vraag:

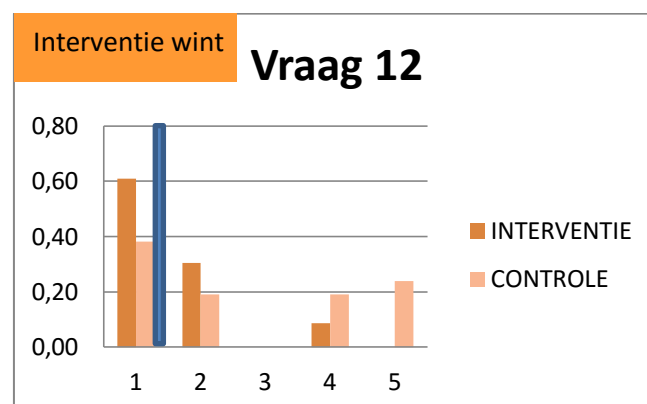
Hoe zit het met de snelheid waarmee die ψ -golf zich voortplant, denk je? De snelheid waarmee ψ zich voortplant is precies gelijk aan c , de lichtsnelheid ($\pm 3 \times 10^8$ m/s).

Bespreking:

De ψ -golf beweegt zich voort met de snelheid van het microscopische deeltje. Uit het commentaar blijkt dat sommigen onterecht denken dat dit met de snelheid van het licht of zelfs met oneindige snelheid gaat. De interventie groep geeft iets vaker het juiste antwoord, mogelijk omdat dit beter in het applet wordt gevisualiseerd bij het afschieten van het deeltjeskanon. Opvallend is dat er een grote component in de controle groep is die het niet weet.

Conclusie:

Er is hier sprake van het relatief vaak voorkomen van een **misconceptie** dat de ψ -golf zich net zoals licht voortbeweegt met de lichtsnelheid. Deze misconceptie kan potentieel sneller voorkomen in de controle groep, aangezien relatief veel aangeven dat ze het antwoord niet weten. Hier bewijst het applet zijn voordeel.



Vraag:

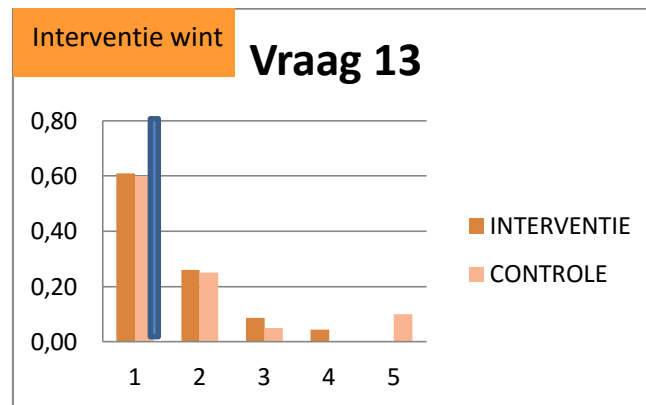
We hebben de proef van Young opgesteld en laten fotonen (i.p.v. materiële deeltjes) richting de spleten gaan. We zien op het scherm erachter een interferentiepatroon ontstaan. Het optische interferentiepatroon verdwijnt als we kijken door welke spleet de fotonen gaan.

Bespreking:

In dit experiment gedragen fotonen zich hetzelfde als materiële deeltjes. De meeste neigen naar het goede antwoord (d.w.z. 1). Een aantal ziet toch nog onterecht verschil in gedrag.

Conclusie:

Interventie groep doet het beter dan de controle groep.



Vraag:

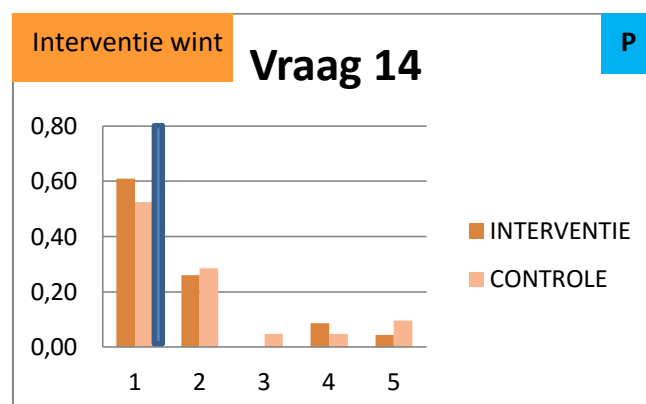
Als we een foton op bijvoorbeeld een elektron schieten, dan kan er een botsing optreden waarbij het elektron een extra snelheid krijgt en het foton van aard verandert (b.v. richting of frequentie f van het foton).

Bespreking:

Antwoord 1 is juist. Dit is het Compton-effect. Hoogenergetische fotonen kunnen inderdaad botsen met deeltjes. Bij hoge energie komen de deeltjes eigenschappen van fotonen naar voren. Dit is ook bekend uit het foto-elektrisch effect.

Conclusie:

Gemiddeld genomen goed begrepen door beide klassen. Geen verschil.



Vraag:

Elk individueel materieel deeltje heeft zijn eigen golf functie ψ .

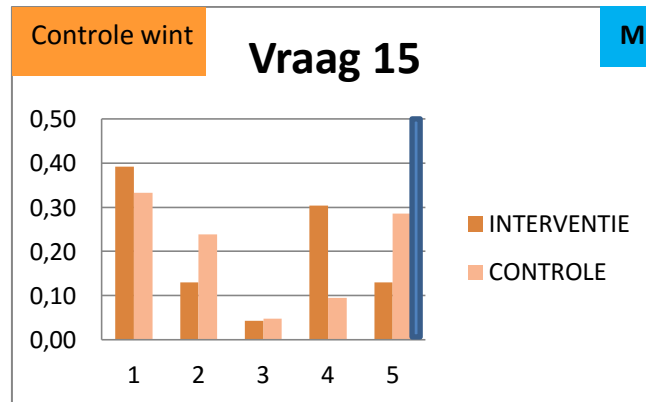
Bespreking:

Je zou verwachten dat ψ meerdere elektronen zou beschrijven, maar dit is niet zo. Belangrijk is dat leerlingen doorzien dat, hoewel de golf functie van statistische aard is, elk individueel deeltje zijn eigen golf functie heeft. M.a.w. indien identieke deeltjes op gelijke wijze geprepareerd worden, is de uitkomst

van de meting afhankelijk van toeval en meestal verschillend voor de individuele elektronen. Globaal geven alle elektronen tezamen het interferentiepatroon.

Conclusie:

Sommigen hebben de **preconceptie** dat, vanwege het statistisch karakter van ψ , er meerdere elektronen moeten horen bij een enkele *golffunctie* ψ . Verder geen verschil tussen beide klassen³⁰.



Vraag:

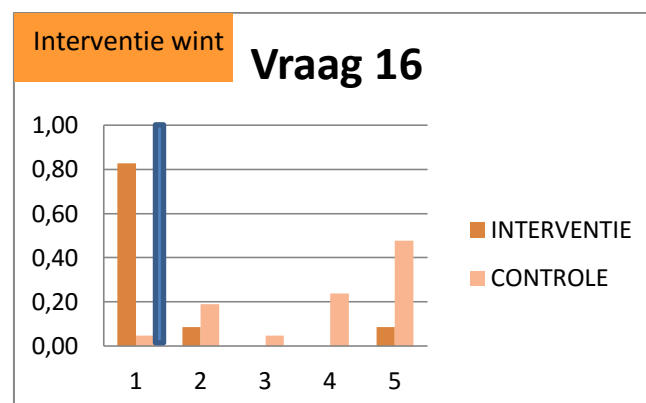
Elk individueel foton heeft zijn eigen golffunctie ψ .

Bespreking:

Een foton heeft geen rustmassa en dus ook geen golflengte gedefinieerd voor een ψ -golf. Op de vraag is maar een duidelijk antwoord mogelijk, namelijk 5. Beide klassen lijken in twee kampen verdeeld: voor en tegen.

Conclusie:

Hier is sprake van een **misconceptie**. Het elektromagnetische veld van fotonen mag niet verward worden met de ψ -golf van materiële deeltjes. Beide klassen zijn beperkt gevoelig voor deze misconceptie en in gelijke mate.



Vraag:

³⁰ Mogelijk is deze vraag (achteraf) niet scherp genoeg gesteld aan de leerlingen. De vraag had het contrast met een ψ die meerdere elektronen beschrijft moeten aanstippen.

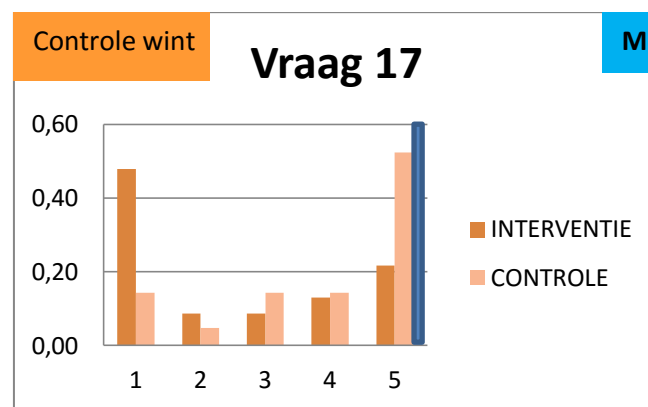
Indien het TSE voor deeltjes herhaald wordt, dan ziet het interferentiepatroon op het scherm er niet hetzelfde uit.

Bespreking:

Hier zien we een groot verschil in antwoord tussen de twee klassen. De interventie groep heeft m.b.v. het applet kunnen zien dat elk interferentiepatroon in detail er anders uit ziet, maar grof gezien hetzelfde is. Dit heeft de controle groep niet kunnen zien, terwijl dit toch in de les besproken is. Er kan een **misconceptie** in de controle groep ontstaan dat het interferentiepatroon hetzelfde is op detail en ook op grof niveau na herhaling van een experiment. Hiermee kan een leerling het belangrijke aspect van de statistische aard van het patroon op detailniveau missen.

Conclusie:

De interventie groep heeft door het applet het voordeel gehad dat het interferentiepatroon op twee wijze bekeken kan worden: in detail en grof gezien. Hier bewijst het applet zijn voordeel.



Vraag:

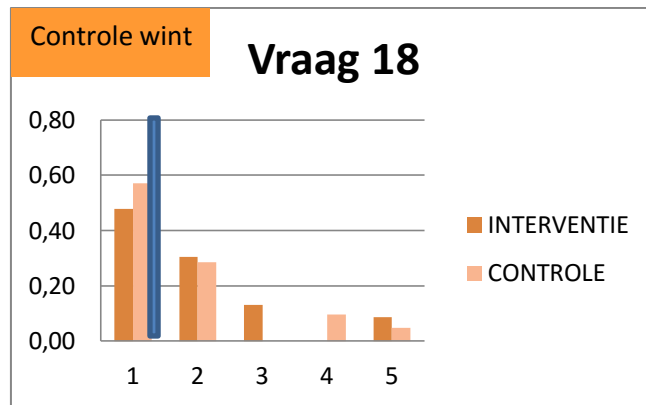
Het Twee Spleten Experiment toont aan dat (meerdere) elektronen met elkaar interfereren. Dat een elektron met zich zelf interfereert kan niet.

Bespreking:

Het valt voor leerlingen (en wetenschappers) niet mee om te accepteren dat een elektron met zichzelf interfereert: het elektron veroorzaakt door zijn snelheid een waarschijnlijkheidsgolf die zich in de ruimte rondom het elektron verspreidt. Het is deze golf afkomstig van een individueel elektron die voor interferentie zorgt.

Conclusie:

Er bestaat vooral bij de interventie groep de **misconceptie** dat meerdere elektronen met elkaar moeten interfereren om het patroon te bewerkstelligen. De controle groep ziet dit gemiddeld wel goed. Waarom dit verschil bestaat, ligt mogelijk aan de hybride wijze waarop het applet het interfereren in het experiment visualiseert: het kanon vuurt individuele deeltjes af (deeltjes karakter benadrukt) en het interfereren wordt als golfverschijnsel afgebeeld (golfkarakter). Hier kan het applet dus misconcepties introduceren.



Vraag:

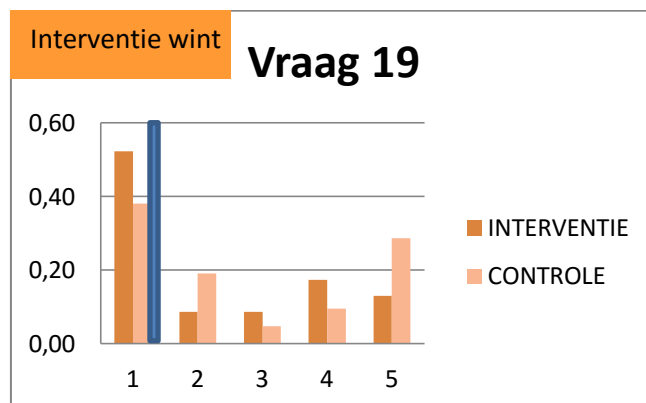
Hoe men over deeltjes of fotonen denkt is afhankelijk het soort experiment dat je ermee uitvoert.

Bespreking:

Deze vraag heeft relatie met vraag 8 (over de objectiviteit van kwantumwaarnemingen). Het idee is dat de antwoorden, die de natuur geeft op vragen die waarnemers stellen via experimenten, afhankelijk zijn van waar men in het experiment naar vraagt: vraag je naar golfeigenschappen dan krijg je golfeigenschappen, en het zelfde voor deeltjeseigenschappen.

Conclusie:

Beide klassen geven gemiddeld genomen het goede antwoord. Geen verschil tussen beide klassen.



Vraag:

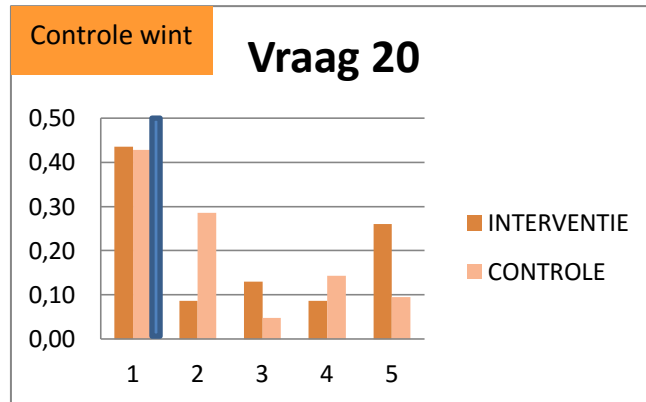
Elektronen worden een voor een afgeschoten op een scherm met twee spleten. De waarneming dat het interferentiepatroon op het detectiescherm zich langzamerhand opbouwt, toont aan dat ieder elektron een eigen golf functie ψ heeft.

Bespreking:

Deze vraag heeft een relatie met vraag 14, maar hier wordt gevraagd of het TSE impliceert dat een elektron zijn eigen golf functie heeft. Dit is inderdaad het geval. Het komt uitdrukkelijk aan de orde in het practicum.

Conclusie:

Er is een marginaal verschil tussen de beide klassen: je ziet aan de relatieve frequenties dat de interventie groep iets nadrukkelijker bevestigend beantwoordt. Het applet heeft hier mogelijk invloed gehad.



Vraag:

Een elektron in het atoom bestaat uit een in de ruimte uitgesmeerde ladingswolk.

Bespreking:

Dit is een van de bekende beelden van atomen die in de natuur- en scheikunde worden gebruikt, namelijk orbitalen. In wezen is dit dezelfde vraag als het TSE met materiële deeltjes waarbij het onduidelijk is of deeltjes steeds door 1 spleet tegelijk gaan of door twee spleten (vraag 9). De beantwoording van de twee vragen is consistent: beide klassen neigen naar het beeld van elektronen die op meerdere plaatsen tegelijk aanwezig zijn.

Conclusie:

Geen significant verschil tussen de beide klassen.
