

# Les(sen) over dualiteit met single photon interferentie in een koffer

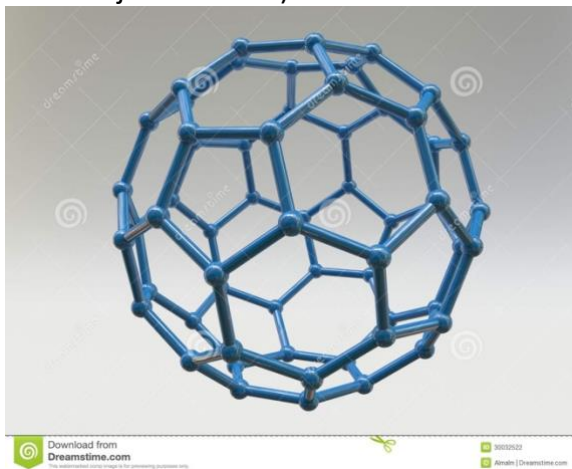
IMPULS project Universiteit Twente

Auteurs: Ed van den Berg, Jeroen Grijsen, Aernout van Rossum, Timo Bomhof  
Datum: februari 2019 met enkele aanvullingen en correcties in december 2019  
Versie: 1.1

Het kofferexperiment is te reserveren voor uitleen bij  
Wim Sonneveld van TU Delft [W.Sonneveld@tudelft.nl](mailto:W.Sonneveld@tudelft.nl)  
John Kooiker van Universiteit Twente [j.h.a.kooiker@utwente.nl](mailto:j.h.a.kooiker@utwente.nl)  
Enno van der Laan van Universiteit Groningen [j.e.van.der.laan@rug.nl](mailto:j.e.van.der.laan@rug.nl)

## Inleiding

Doel van de natuurkunde component van het IMPULS-project van Universiteit Twente was om het vwo-onderwerp quantumwereld meer experimenteel te maken door demonstraties/experimenten te ontwikkelen. Dat werd gedaan door het dubbelspleet experiment met één-voor-één fotonen en door een tunneling experiment met microgolven. Beide experimenten werden uitgetoet met 5 docenten uit het IMPULS-ontwikkelteam en enkele van hun collega's in 5 scholen. In een evaluatiestudie werden enkele lessen gefilmd. Er was een toets voor 180 leerlingen van drie scholen, en er waren interviews met 24 leerlingen van 4 scholen. Doordat er een school was die in 2017/18 later begon met quantumwereld, konden suggesties uit de evaluatie al worden uitgetoet, en nogmaals in twee 5 vwo-klassen in juni 2018. De ervaringen en resultaten werden verwerkt in een eindversie van het lesmateriaal (o.a. deze handleiding) en twee NVOX-artikelen (oktober 2018 en januari 2019).



Figuur 1 Een  $C_{60}$  molekuul

Dualiteit is een van de kernbegrippen van de quantum fysica en centraal in de discussie van dualiteit is het twee spleten experiment dat oorspronkelijk functioneerde als gedachten experiment maar uiteindelijk vanaf 1960 ook spectaculaire interferentie (dus golfgedrag) kon aantonen van steeds grotere deeltjes/moleculen anders dan fotonen die één-voor-één door een dubbelspleet gaan. In 1999 lukte een experiment met buckey balls ( $C_{60}$  moleculen) en momenteel staat het record van *single particle interference* op een molecuul (het deeltje) met meer dan 800

atomen. Let wel, we hebben het hier over golfgedrag aantonen met een dubbele spleet. Golfgedrag van elektronen was in 1927 al aangetoond met het Davisson-Germer experiment met diffractie van elektronen door kristallen en de golflengte in het experiment klopte ook met de Borglie's  $\lambda=h/p$ . Het dubbelspleet experiment is een prachtige illustratie van golfdeeltje dualiteit, maar laat ook de andere cruciale contrasten van quantum versus klassiek zien zoals kans en waarschijnlijkheid versus determinisme.

## Inhoudsbeschrijving

Deze "lesbrief" bestaat uit:

- i. CE Examen syllabus voor dualiteit
- ii. Een lesbeschrijving
- iii. Een korte geschiedenis van de dubbelspleet en single particle interference in de quantum fysica
- iv. Literatuur  
Bijlagen (apart)
- v. Een stroomschema voor dualiteit (Jeroen Grijsen, Sander Wenderich, Ed van den Berg)
- vi. Technische details over het koffer experiment
- vii. NVOX-artikel over de dubbelspleet

## Examensyllabus dualiteit

De kandidaat kan:

1. licht als golfverschijnsel benoemen en dit toelichten,
  - uitleggen in welke situaties buiging van lichtgolven optreedt;
  - een intensiteitspatroon verklaren in termen van constructieve en destructieve interferentie;
2. de golf-deeltjedualiteit toepassen bij het verklaren van interferentieverschijnselen bij elektromagnetische straling en bij materiedeeltjes,
  - berekeningen maken met de deBroglie-golflengte;
  - het dubbelspleet-experiment beschrijven en de betekenis ervan uitleggen;
  - vakbegrippen: waarschijnlijkheid, waarschijnlijkheidsverdeling;
  - minimaal in de context: elektronenmicroscop;
3. het foto-elektrisch effect gebruiken om aan te tonen dat elektromagnetische straling gequantiseerd is,
  - vakbegrippen: foton, uittree-energie, energiequantum;

De potentiële bijdrage van de dubbelspleet les betreft alle onderdelen van punt 2 dus golf-deeltje dualiteit en de Broglie, maar het is ook een mooie introductie voor de rol van waarschijnlijkheid in het gedrag van deeltjes en waarschijnlijkheidsverdeling.

### De dubbelspleet les

**Voorkennis:** Leerlingen zijn al bekend met het foto-elektrisch effect, de constante van Planck, impuls, en de deBroglie golflengte:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (1)$$

Let op, links is een golfeigenschap ( $\lambda$ ) en rechts deeltjeseigenschappen ( $mv$ )! In interviews aan het eind van een serie lessen over quantum wereld herinneren leerlingen zich vaak niets van de Broglie. Het moet meer ingewreven worden.

**Tijd:** De les als geheel is te doen in 45 – 50 minuten, maar het is ook mogelijk stappen 8 – 10 tot de volgende les te bewaren. Bijvoorbeeld, het dr. Quantum filmpje is een mooie samenvatting van resultaten aan het begin van de volgende les en met de PhET applet kunnen de puntjes op de i worden gezet.

#### De les

*Klassieke verschillen tussen deeltjes en golven (enkele minuten)*

Het essentiële verschil tussen klassieke deeltjes en golven is dat deeltjes scherp gedefinieerd zijn in de ruimte met een duidelijk volume en dat golven gespreid zijn in de ruimte, uitgesmeerd zijn over die ruimte, en dat het lastig is aan te geven waar de golf precies zit en wat de grenzen zijn. Als je leerlingen vraagt naar verschillen tussen klassieke golven en deeltjes, ook nadat ze gevorderd zijn in quantumwereld, dan komt dit er niet uit. Daarom is

het goed te starten met het maken van een tabel waarin leerlingen in een individuele of klassikale activiteit de eigenschappen van deeltjes en golven weergeven. Meestal komt daar ongeveer het volgende uit (tabel 1):

Tabel 1 Verschillen tussen deeltjes en golven volgens leerlingen

Deeltjes	Golven
Hebben een massa, snelheid, energie	Hebben een amplitudo, trillingstijd, golflengte Soms definiëren leerlingen een golf als een trilling zonder te verwijzen naar voortplanting ervan. Golven kunnen bestaan uit veel deeltjes die trillen, bijvoorbeeld watergolven
<b>Cruciaal</b> Deeltjes hebben een duidelijk gedefinieerde locatie en een scherp volume op elk tijdstip. Ze zijn <b>gelokaliseerd</b> en compact in de ruimte.	<b>Golven zijn verspreid/uitgesmeerd in de ruimte en zijn niet beperkt tot een scherp gedefinieerde locatie en dus niet gelokaliseerd.</b>

Het helpt om even een video of simulatie te laten zien van watergolven. Dat kost 2 minuten en verfrist het beeld van golven.

### Didactische volgorde dubbelspleet demonstraties

Oorspronkelijk deden we alleen het kofferexperiment over single foton interferentie maar de resultaten werden dan voor zoete koek geslikt zonder verbazing en zonder intellectueel engagement, zoals bleek in interviews met leerlingen. Daarom voegden we enkele experimenten toe als inleiding en dat leidde tot meer verbazing bij het koffer experiment en meer bewustzijn van het bijzondere van golf-deeltje dualiteit (Berg et al, 2018).

Het uiteindelijke en succesvol uitgetoet scenario voor een les van 50 minuten is als volgt:

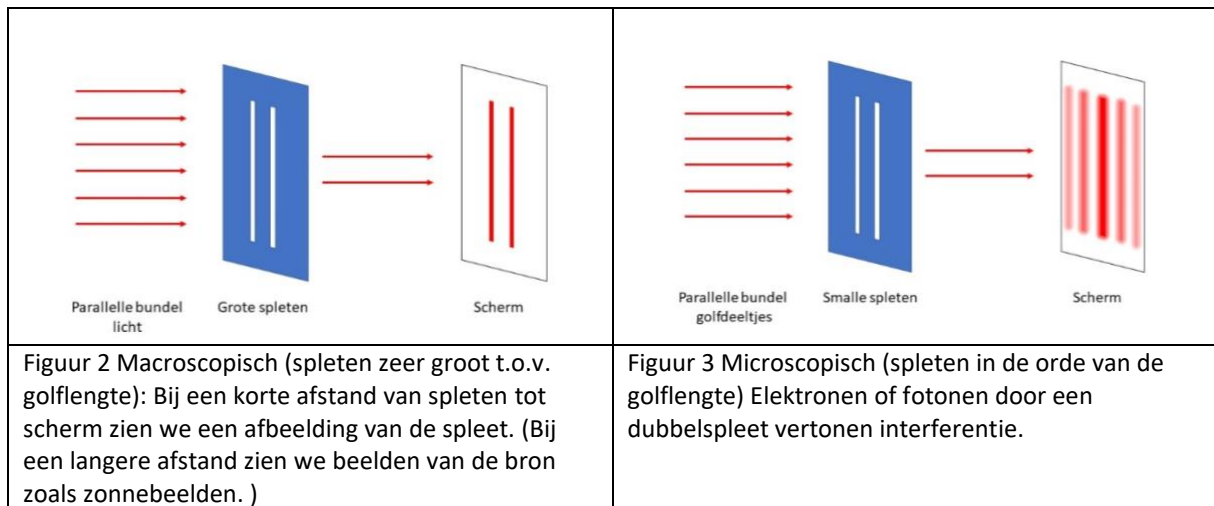
**Stap 1:** Neem een dubbele spleet met macroscopische afmetingen en een blad papier (A4) als scherm een tiental centimeters achter de spleet. Docent: *Als we gekleurd water door de spleten spuiten, wat zie je dan op het scherm? Teken het scherm en wat je daarop ziet (figuur 1).* Leerlingen voorspellen individueel. Dan uitvoering van het experiment met een plantenspuit met gekleurd water of inkt of verf.

**Stap 2:** Wat zou je op het scherm zien als we een evenwijdige lichtbundel op een (macroscopische) dubbelspleet laten vallen? Taak voor leerlingen: *Teken het scherm en wat je daarop zal zien.* Terwijl de leerlingen tekenen maakt de docent een snel (1 minuut) rondje door de klas om te zien wat leerlingen tekenen. Vervolgens demonstreert de docent de afbeelding van de spleet op het scherm.

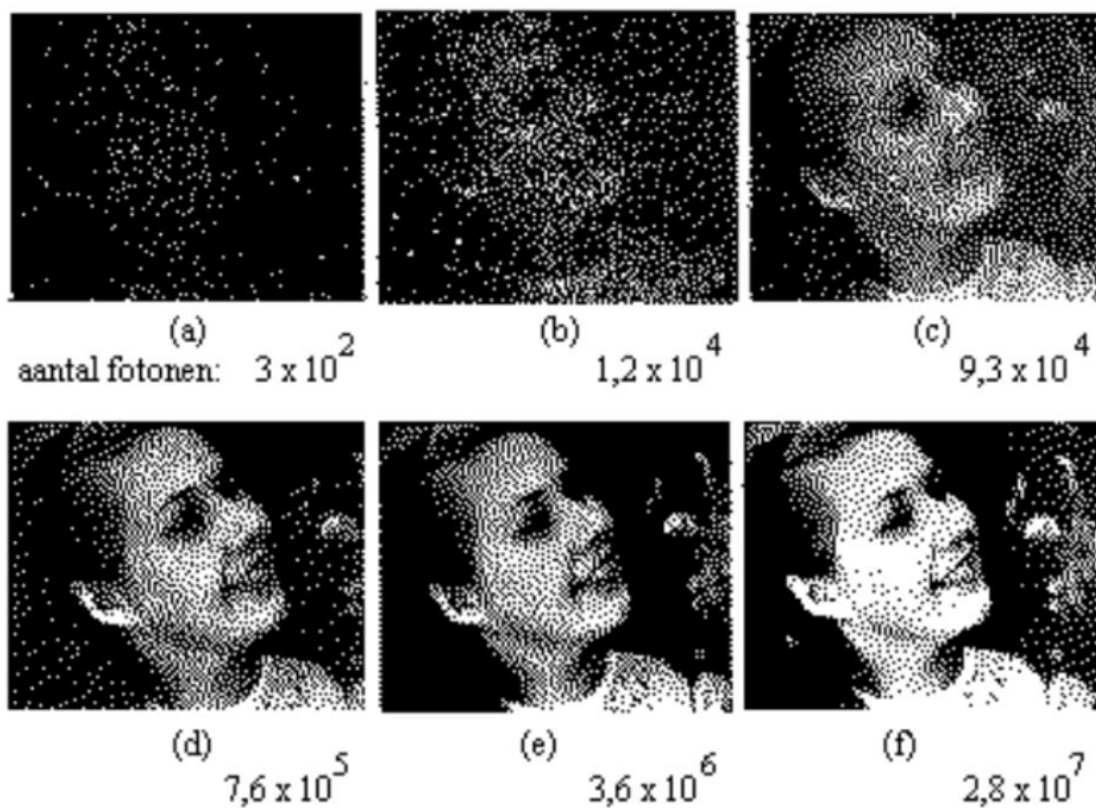
**Stap 3:** Filmpje van watergolven door enkele en dubbele spleet. Golfbak mag ook, maar kost meer tijd. Een ander alternatief is de simulatie van watergolven met een dubbele spleet van PhET of van Falstad.com.

**Stap 4:** Nu vervangen we de macroscopische dubbelspleet door de typische dubbelspleet die in laser experimenten gebruikt wordt en gebruiken we een laserbundel, bijvoorbeeld van een gewone laser pointer. *Wat verwachten we nu op het scherm? Teken dat.* Weer gaat de

docent snel (1 minuut) rond en zet vervolgens de laser aan om het interferentiepatroon te laten zien. Lichtstralen interfereren met elkaar en geven het bekende patroon, typisch voor golfverschijnselen. Maar in het foto-elektrisch effect hebben we geleerd dat die lichtstralen bestaan uit fotonen, golfdeeltjes, een soort kogeltjes, toch wel raar.



**Stap 5:** Je kunt de bekende serie foto's laten zien van sterk onderbelicht tot normaal belicht. De sterk onderbelichte foto's zijn niet alleen donkerder, maar granuleer. Ze lijken een deeltjes structuur te suggereren. Zo zijn er ook foto's van een laserbundel normaal belicht en sterk gefilterd.



figuur<sup>6</sup> 5

bron: A. Rose, *Adv. in biol. and med. phys.*, 5, 211, 1957.

**Stap 6:** Het kofferexperiment: Nu gaan we de fotonen één-voor-één door de spleten schieten. We zetten een filter voor de laser dat slechts 1 op de 1.000.000 fotonen doorlaat. Een hele donkere zonnebril dus. Je kunt berekenen (stap 6) dat er dan op elk moment hooguit 1 of 2 fotonen tussen spleten en scherm zijn. Wat verwacht je dan te zien op het scherm? Opdracht aan de leerlingen: *Teken het patroon dat je verwacht te zien op het scherm nadat er genoeg fotonen door de spleet zijn gegaan.* Weer gaat de docent 1 à 2 minuten rond om te zien wat er getekend wordt. Vervolgens wordt het experiment uitgevoerd en verschijnen de resultaten op het scherm.

**Stap 7:** Het is van groot belang dat de leerlingen inzien dat de fotonen één-voor-één door de spleten gaan en met zichzelf interfereren. We laten leerlingen berekenen hoeveel afstand er tussen de fotonen zit (vele malen de golflengte), aan de hand van het aantal fotonen/tijd op één positie. Een voorbeeld van een schatting is als volgt:

Uitgaan van het output vermogen van de laser: 5 mW.

Het optisch vermogen van de laser is 5.0 mW, gefilterd bij een factor van  $10^{-6}$  (1 foton per miljoen wordt doorgelaten door het filter) dit wordt  $5.0 \cdot 10^{-9}$  W. De energie van een foton met golflengte 635 nanometer is:

$$E=hf = hc/\lambda = 6.63 \cdot 10^{-34} [\text{Js}] \cdot 3.00 \cdot 10^8 [\text{m/s}] / (635 \cdot 10^{-9} [\text{m}]) = 3.13 \cdot 10^{-19} \text{ J.} \quad (2)$$

Van dit vermogen komt 15% door de spleet want de oppervlakte van de spleet is 15% van de dwarsdoorsnede van de laserbundel. Dan is het maximaal aantal fotonen dat het scherm per seconde bereikt:

$$0,15 \cdot 5,0 \cdot 10^{-9} [\text{J/s}] / (3.13 \cdot 10^{-19} [\text{J}]) = 2,2 \cdot 10^9 [\text{fotonen/s}] \quad (3)$$

De fotonen die in 1 seconde de spleet passeren zijn gespreid over een afstand van  $3,0 \cdot 10^8$  m. Dan is de minimumafstand tussen 2 fotonen:

$$3,0 \cdot 10^8 [\text{m/s}] / 2,2 \cdot 10^9 [\text{s}] = 12,5 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 12,5 \text{ cm} \quad (4)$$

Di is ongeveer  $12,5 \cdot 10^{-2} \text{ m} / 635 \text{ nm} = 200.000$  x de golflengte van het foton en op elk moment zijn er slechts 1 of 2 fotonen tussen de spleet en de detector, dus interferentie van een foton met andere fotonen is zeer onwaarschijnlijk. Het interferentie patroon moet dan komen van "single photons".

**Stap 8:** *Het kofferexperiment.* Laat heel kort de opzet van het experiment zien en vraag dan om individuele voorspelling van het patroon dat we op het scherm verwachten te zien. Als leerlingen met verschillende voorspellingen komen, eventueel een korte klassikale discussie. Dan het experiment uitvoeren. We krijgen een interferentiepatroon. Raar. Interfereren fotonen met zichzelf?

**Stap 9:** Dr. Quantum filmpje over dubbele spleet (als er tijd is, anders direct naar stap 9 en het filmpje eventueel aan het begin van de volgende les als samenvatting gebruiken). Het dr. Quantum filmpje benadrukt de onverwachte uitkomsten en bespreekt de invloed van pogingen te detecteren door welke spleet de fotonen gaan. Wanneer we dat proberen vast te stellen, dan verdwijnt het interferentiepatroon.

**Stap 10:** Illustreer dan de uitleg met de PhET applet. Zolang het deeltje (foton, elektron, proton,  $C_{60}$  molecuul) niet gedetecteerd door de ruimte zwerft, gedraagt het zich als een golf gespreid in de ruimte met een waarschijnlijkheidsverdeling. Zodra het gedetecteerd wordt en er absorptie plaats vindt, zien we een stip op het scherm en gedraagt het zich als deeltje met een scherp bepaalde locatie. Uit de detectiekans voor elke locatie volgt de waarschijnlijkheidsverdeling. Vragen aan leerlingen kunnen zijn:

- Waar zit het foton, is daar een antwoord op?
- Door welke spleet is het foton gegaan? Of is het door beide spleten gegaan? Kunnen we dit weten? (zie de discussie in het artikel van Kagan, Perkins & Wieman op p9 van deze handleiding).
- Kun je van 1 foton voorspellen waar het terecht komt (waarschijnlijkheid)? Kun je het patroon voorspellen van 1000 fotonen die 1 voor 1 door de spleet gaan (waarschijnlijkheidsverdeling)? Waarschijnlijkheid versus determinisme is een fundamenteel verschil tussen de quantumwereld en de macrosopische wereld.
- Waar zien we golfgedrag, waar zien we deeltjes gedrag? (Golfgedrag bij voortplanting, deeltjesgedrag bij emissie en absorptie).

Vat de vakbegrippen samen: golf-deeltje dualiteit, waarschijnlijkheid, waarschijnlijkheidsverdeling, verschillen quantum fysica versus klassieke fysica.

**Stap 11** (bijvoorbeeld in de volgende les):

- Wat was de kofferdemonstratie ook al weer? Wat hebben we ervan geleerd? Wat is golf-deeltje dualiteit?
- Golf-deeltje voorbeelden: fotonen, elektronen, protonen, neutronen, en zelfs  $C_{60}$  moleculen.
- Koppelen aan de deBroglie golflengte, als die in de orde van grootte van de afmetingen van het deeltje is, of groter, dan zien we ook golfgedrag.
- De demonstratie illustreerde dus: golf deeltje dualiteit, onvoorspelbaarheid van waar individuele deeltjes terecht komen maar voorspelbaarheid van het patroon van veel deeltjes, waarschijnlijkheid, en golffunctie.

### Hulpmiddelen en bronnen

PhET simulaties van <https://phet.colorado.edu>

Dr. Quantum dubbelspleet: <https://www.youtube.com/watch?v=Q1YqgPAzho>

Het kofferexperiment is te reserveren voor uitleen bij

Wim Sonneveld van TU Delft [W.Sonneveld@tudelft.nl](mailto:W.Sonneveld@tudelft.nl),

John Kooiker van Universiteit Twente [j.h.a.kooiker@utwente.nl](mailto:j.h.a.kooiker@utwente.nl)

Enno van der Laan van Universiteit Groningen [j.e.van.der.laan@rug.nl](mailto:j.e.van.der.laan@rug.nl)

**In de volgende les**, kom nog even terug op dualiteit door de PhET applet te vertonen en samen te vatten dat we niet weten waar het foton zit in die gekleurde wolk of dat die gekleurde wolk het foton is. Verschijnselen m.b.t. voortplanting van licht en deeltjes worden het beste beschreven met een golfmodel, verschijnselen m.b.t. absorptie en emissie worden het best beschreven met een deeltjes model. Golf-deeltje dualiteit geldt voor golfdeeltjes waarvan de deBroglie golflengte in de orde van grootte van het deeltje ligt of groter dus zeg maar voor nanodeeltjes en kleiner (afmetingen  $<10^{-9}$  m).

Tenslotte kan met illustratie van het PhET applet of een dubbelspleet tekening op het bord een mysterieus maar uiterst interessant verschijnsel worden verteld. Als we proberen na te gaan door welke spleet het foton ging en daar een detector opstellen, dan vervalt het interferentie patroon en zien we slechts een dubbele spleet. Dus als er een signaal wordt uitgewisseld met het golfdeeltje, dan gedraagt het zich als deeltje. Zolang het golfdeeltje **ongedetecteerd** door de ruimte gaat, gedraagt het zich als golf.

**Uitbreiding koffer experiment december 2019:** Het is nu ook mogelijk dit bijzondere verschijnsel met de koffer te laten zien. Als je een spleet afplakt met een horizontaal

polarisatie filter en de andere spleet met een verticaal polarisatie filter, dan zijn de fotonen van elke spleet herkenbaar en dan verdwijnt het interferentiepatroon en zien we deeltjesgedrag op het scherm!

Quantum eraser (heel interessant, **maar geen examenstof**): Stel dat we een detector hebben bij de spleten om te zien door welke spleet het golfdeeltje gaat maar dat we die informatie uitwissen (erase) voordat het golfdeeltje het scherm bereikt, dan krijgen we alsnog een interferentiepatroon! In het koffer experiment kan dat bereikt worden door polarisatiefilters op de spleten te plakken, de ene spleet horizontaal, de andere verticaal. Dan kunnen we in de detector zien uit welke spleet het foton komt. Het scherm zal nu twee strepen geven en geen interferentiepatroon. Maar als we een polarisator onder 45 graden tussen spleten en scherm zetten, dan wordt die informatie over polarisatie uitgewist en komt er alsnog een interferentiepatroon. Voor meer informatie over quantum eraser experimenten verwijzen we naar Hillmer en Kwiat (2007) in een populair Scientific American artikel en naar Ananthaswamy (2018) in zijn geschiedenis van dubbelspleet experimenten.

### Een korte geschiedenis van de dubbelspleet

Feynman (1965) start zijn behandeling van de quantum fysica met een hoofdstuk over het dubbelspleet experiment dat volgens hem de kern van quantumfysica laat zien. Daarom hier wat extra informatie over historische en moderne dubbelspleet experimenten.

De golf-versus-deeltje-vraag m.b.t. licht was al opgekomen in de 17<sup>de</sup> eeuw. Huygens legde breking uit met een golfmodel en Newton met een deeltjes model. Rond 1800 introduceerde Young het dubbelspleet experiment dat sterk bewijsmateriaal leverde voor het golfmodel. Fresnel volgde met diverse interferentie experimenten. De lichtdeeltjes supporters van Newton waren nog niet overtuigd maar latere experimenten met polarisatie en het meten van de lichtsnelheid in water door Fizeau en Foucault rond 1850 leverden nog meer bewijsmateriaal voor de golftheorie van licht (Holton & Brush, 2001, p347-350). Uiteindelijk legde Maxwell in de tweede helft van de 19<sup>de</sup> eeuw met zijn wetten een solide basis voor een theorie van elektromagnetische golven inclusief zichtbaar licht.

In 1905 publiceerde Einstein zijn uitleg voor het foto-elektrisch effect met fotonen, deeltjes dus. Eerder had Planck al energiepakketjes gebruikt in uitleg van UV-straling (Kubbinga, 2018). Bij Planck waren de quanta nog een theoretisch trucje, bij Einstein kregen de quanta meer realiteitswaarde, maar dat was zeer controversieel in die tijd. Einstein zelf formuleerde dit heel voorzichtig, hij voegde een deeltjesmodel toe en verwierp het golfmodel niet. Dit is Einstein's formulering uit 1905 (zie *Subtle is the Lord* door Abraham Pais p377):

*Light quantum hypothesis: Monochromatic radiation of low density (i.e. within the domain of validity of the Wien radiation formula) behaves in thermodynamic respect as if it consists of mutually independent energy quanta of magnitude  $R\beta\nu/N$  ( $\beta=h/k$ ,  $R/N=k$ ,  $R\beta\nu/N = h\nu$ ).*

En later op dezelfde pagina:

*The heuristic principle: If, in regard to the volume dependence of the entropy, monochromatic radiation (of sufficient low density) behaves as a discrete medium consisting of energy quanta of magnitude  $R\beta\nu/N$ , then this suggests an inquiry as*



*to whether the laws of the generation and conversion of light are also constituted as if light were to consist of energy quanta of this kind.*

Nadat Compton zijn foton verstrooiing 's experimenten had gepubliceerd in 1923 schreef Einstein een populair artikel in het Berliner Tagblad (p414 van Pais):

*There are therefore now two theories of light, both indispensable, and -as one must admit today despite twenty years of tremendous effort on the part of theoretical physicists- without any logical connections.*

Kort gezegd, Einstein verwierp het golfmodel niet, maar voegde het deeltjesmodel toe. De naam foton werd pas in 1926 voor het eerst gebruikt door Gilbert Lewis (Grangier, 2005).

Einstein kreeg zijn Nobel prijs voor *de ontdekking van de wet van het foto-elektrisch effect*, niet voor het veel fundamentele idee van kwantisering van straling en deeltjeseigenschappen van EM straling. Dat dit laatste nog controversieel was, is duidelijk uit een 1923 publicatie van Bohr/Kramers/Slater waarin de grote Bohr suggereert dat energiebehoud gemiddeld geldt voor veel deeltjes en niet voor individuele deeltjes reacties en ervan uitgaat dat Maxwell eens en voor altijd het golfkarakter van straling beschreven heeft. Maar snel daarna publiceerde Compton zijn experimenten van verstrooiing van Röntgenstraling aan elektronen waarbij hij concludeerde dat resultaten alleen begrepen konden worden door een deeltjes model voor Röntgenstraling en energie- en impulsbehoud in individuele reacties van fotonen met elektronen. Dit historisch uiterst interessante verhaal is te vinden in Pais' biografie van Einstein (Pais, 1982) met een update in Pais' biografie van Bohr (199X).

Met de Broglie, Schrödinger, en Heisenberg kwam de dualiteit. Het golf karakter van elektronen werd al aangetoond in 1927 door Davisson en Germer in elektron diffractie experimenten met kristallen, maar het duurde tot rond 1960 voordat de Duitse PhD student Claus Jönsson erin slaagde elektronen interferentie te zien met een dubbele spleet. Feynman's rond 1964 geschreven hoofdstuk maakte er nog geen melding van en gebruikte de elektronen interferentie bij een dubbele spleet dus nog als gedachtenexperiment.

Na Jönsson kwamen er andere experimenten. Eind jaren 90 (Nairz, Arndt, & Zeilinger, 2003) experimenteerde Zeilinger's groep in Wenen met steeds grotere deeltjes van neutronen in 1988 tot aan C<sub>60</sub> in 1999, het Buckminster fullerene (bucky balls) waarbij 60 carbon atomen gearrangeerd zijn als op de hoekpunten van de pentagons en hexagons van een voetbal (figuur 1). Zelfs met deze zware moleculen was het mogelijk interferentie te verkrijgen en andere typische golfeigenschappen experimenteel aan te tonen. Inmiddels heeft men zelfs nog zwaardere moleculen met rond de 1000 atomen geprobeerd en is het nog onduidelijk hoe ver men kan gaan en waar de grens ligt tussen deeltjes en golfdeeltjes.

Een speciale categorie experimenten zijn die met 1 voor 1 fotonen of andere golfdeeltjes zoals elektronen, protonen, etc.. Hoewel Taylor in 1909 in Engeland al interferentie experimenten deed met extreem lage intensiteit licht, kon je toch nog net niet spreken van "single photons". Zulke experimenten startten in ruim 40 jaar geleden in Italië en werden spectaculair vervolgd in de jaren 80 in Frankrijk door Aspect and Grangier met een Mach-Zehnder interferometer (Ananthaswamy, 2018). Ze lieten duidelijk zien dat single photons

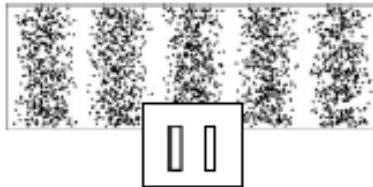
zich als eenheid gedragen en òf in hun geheel gereflecteerd werden òf doorgelaten door een half doorlaatbare spiegel. Ze lieten ook zien dat wanneer er twee wegen beschikbaar waren (zoals bij een dubbelspleet) er interferentie optrad mits het onmogelijk was voor de experimentator te beslissen welke weg het golfdeeltje nam, dus geen detectoren bij de spleet. Dit alles was precies zoals Feynman het beschreef in zijn gedachten experiment begin jaren 60.

Tenslotte zijn er de spectaculaire en eerder genoemde quantum eraser experimenten. Zie Ananthaswamy (2018) voor een boeiend populair overzicht.

### Quantum interpretatie van de dubbelspleet

Kagan, Perkins en Nobelprijswinnaar Carl Wieman (2010) ontwierpen een concept test voor quantum begrippen en vonden uit dat er nogal verschillen zijn in interpretatie van de resultaten van het dubbelspleet experiment tussen verschillende hoogleraren. Wij hebben ons constant gehouden aan de Kopenhaagse interpretatie van dit experiment. Een discussie over een toetsitem van hen is uiterst nuttig om te lezen, die drukken we dus hieronder af:

12. You shoot a beam of photons through a pair of slits at a screen. The beam is so weak that the photons arrive at the screen one at a time, but eventually they build up an interference pattern, as shown in the picture at right. What can you say about which slit any particular photon went through?



- A. Each photon went through either the left slit or the right slit. If we had a good enough detector, we could determine which one without changing the interference pattern.
- B. Each photon went through either the left slit or the right slit, but it is fundamentally impossible to determine which one.
- C. Each photon went through both slits. If we had a good enough detector, we could measure a photon in both places at once.
- D. Each photon went through both slits. If we had a good enough detector, we could measure a photon going through one slit or the other, but this would destroy the interference pattern.
- E. It is impossible to determine whether the photon went through one slit or both.

<p>We believe that the correct answer is D because the wave function must go through both slits to get an interference pattern even though a detector can only measure a photon in one place. If one solves the Schrödinger equation with a wave function going through only one slit, one does not get an interference pattern, so it is not correct to say that the photon went through only one slit, or even that we do not know whether it went through one slit or both. In our wording, we have equated the photon with the wave function (or more precisely, with the electromagnetic wave, since a photon does not technically have a wave function), which we recognize is a particular choice of interpretation. However, without this choice, there does not appear to be any wave-particle duality, and thus no way of testing this concept.</p> <p>In interviews with 27 physics faculty, Dubson <i>et al.</i> found wide disagreement on the correct interpretation of the wave function, with 48% of faculty interpreting the wave function as an information wave, 30% interpreting it as a matter wave, and the remainder holding some kind of mixed view [41]. Given these results, it is not surprising that we have had difficulty finding faculty consensus on any version of this question. Our wording favors a matter wave interpretation, as defined by Dubson <i>et al.</i> Faculty who prefer an information wave interpretation have argued that there is no correct answer, because while it is fair to say that the <i>wave function</i> goes through both slits, one should not say anything at all about the <i>photon</i>. Unfortunately, changing the wording of the question to satisfy these faculty would eliminate the fundamental issue of wave-particle duality from the question, making it merely about the mathematical details of the wave function.</p>	<p>Another problem with interpretation with this question is that the small minority of faculty who prefer Bohm's interpretation of quantum mechanics choose B as the correct answer. Further, a small minority of physics professors argue for answer E, either due to an agnosticism on interpretation or a lack of understanding of the implications of Bell's inequality.</p> <p>In interviews, on the other hand, modern physics students never argue for B or E due to deep issues of interpretation, but only due to a clear misunderstanding of the implications of quantum mechanics. Further, although some previous versions of the question were difficult for students to interpret, the current version does not cause problems for students in terms of simply understanding what the question is asking. Many students state answer D almost verbatim even before reading the options, so it accurately reflects the way that students think about this question.</p>
---	---

De boven beschreven Kopenhaagse interpretatie van Kagan et al klopt ook met die van de PhET applet die door dezelfde onderzoeksgroep is ontwikkeld. Maar er zijn dus andere interpretaties zoals die van Aharonov (2007) et al <https://www.pnas.org/content/114/25/6480> waarin bovenstaande vraag anders beantwoord zou worden. Ananthaswamy (2018) geeft ook een overzicht van verschillende interpretaties.

## Literatuur

- Ananthaswamy, A. (2018). *Through two Doors at Once. The Elegant Experiment That Captures the Enigma of Our Quantum Reality.* Penguin Random House.
- Davison, C., Germer, I. (1927). The scattering of electrons by a single crystal of nickel. *Nature* (London), 119, 558-560.
- Grangier, P. (2005). Experiment with single photons. *Seminaire Poincare* 2, p1-26.  
<http://www.bourbaphy.fr/grangier.pdf>
- Hillmer, R., Kwiat, P. (2007). A Do-It-Yourself Quantum Eraser. *Scientific American*, May 2007, 90-95.
- Holton, G., Brush, S. G. (2001). *Physics, the Human Adventure. From Copernicus to Einstein and Beyond.* Rutgers University Press.
- Kubbinga, H. (2018). A tribute to Max Planck. *Europhysicsnews*, 49(4), 27-30.
- McKagan, S.B., Perkins, K.K., Wieman, C.E. (2010). Design and validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey.
- Nairz, O., Arndt, M., Zeilinger, A. (2003). Quantum interference experiments with large molecules. *American Journal of Physics*, 71, 319-325.
- Pais, A. (1982). *Subtle is de Lord.* Oxford University Press.
- Pais, A. (1993). *Niels Bohr's times. In Physics, Philosophy, and Polity.* Oxford University Press.