

Quantumwereld demonstraties (1)

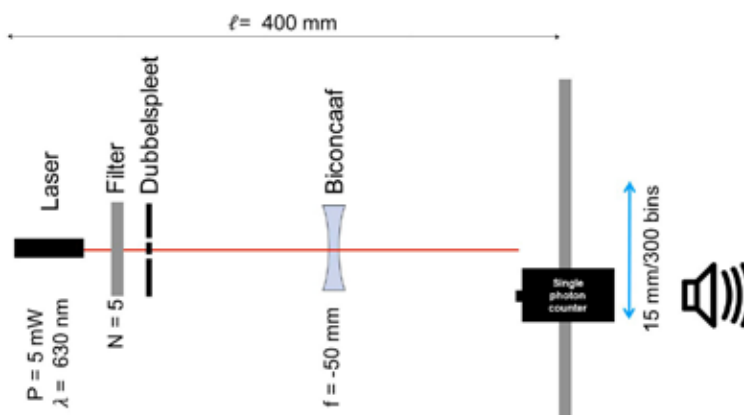
Single foton-interferentie bij een dubbelspleet

Verwondering van leerlingen over golf-deeltje dualiteit blijkt sterk afhankelijk van de gevolgde didactiek. Ze weten eerst niet wat een golf is maar komen uiteindelijk wel tot een acceptabel begrip van golf-deeltje-dualiteit.

In het IMPULS-project ontwikkelden we enkele experimenten voor quantumwereld. Zoals bij alle practicumproeven en docentdemonstraties blijkt dat een deel van de leerlingen andere dingen ziet en denkt dan wij bedoeld hadden. Voor een deel komt dat door – achteraf triviale – didactische tekortkomingen. Door een paar leerlingen na afloop te interviewen over de demonstratie, kom je daarachter, en het blijkt dat er veel winst is te behalen met eenvoudige didactische aanpassingen. We rapporteren onze leservaringen met een dubbelspleet experiment waar fotonen één-voor-één doorheen gaan.

Dubbelspleet

Interferentieverschijnselen bij een dubbelspleet zijn welbekend in de golfoptica, maar wat zou er gebeuren als fotonen één-voor-één door de spleet gaan? Figuren 1 en 2 laten een opstelling zien in een koffer ontwikkeld door Aernout van Rossum en beschikbaar voor uitleen¹. Een bundel fotonen uit een laser passeert een filter dat slechts 1 op de 100.000 fotonen doorlaat. De resterende fotonen gaan één-voor-één door de dubbelspleet. Een detector telt fotonen op 300 locaties in de 1,5 mm doorsnede van de bundel. Het tellen gaat gepaard met geluiden zoals bij een Geiger-Muller telbuis om het deeltjeskarakter en de één-voor-één aankomst te onderstrepen. Tijdens het tellen ontwikkelt zich een grafiek op een scherm van aantal fotonen versus locatie (figuur 3). Meer details zijn te vinden in de



Figuur 1. Schema van het experiment

handleiding² (van Rossum, 2018).

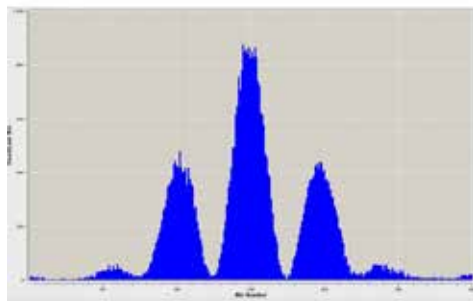
De demonstratie in de klas wordt gevolgd door een demonstratie met de PhET quantum-golf-interferentie applet.

Leerproblemen

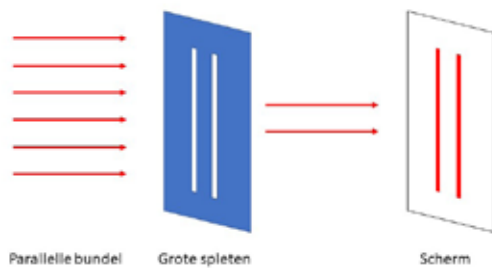
De ervaringen in ons IMPULS-project laten zien dat 6-vwo-leerlingen de resultaten van dubbelspleet experimenten best kunnen rapporteren en verklaren met golf-deeltje dualiteit, en dat de meesten dat interessant vinden. Maar hun begrip wordt gehinderd doordat simpele klassieke begrippen onvoldoende beheerst worden. Ze weten bijvoorbeeld niet wat een golf is en wat het essentiële verschil is met een deeltje. Voor golf-deeltje dualiteit is het cruciale verschil dat een deeltje scherp gelokaliseerd is terwijl een golf juist gespreid is in de ruimte. Maar dit cruciale aspect komt



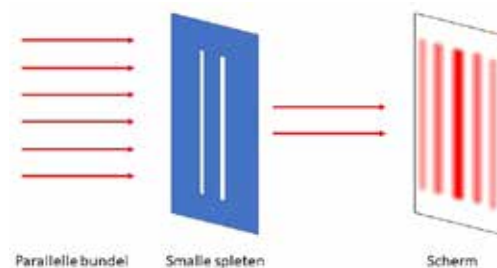
Figuur 2. Foto van het experiment in koffer



Figuur 3. Dubbelspleet interferentiepatroon van één-voor-één fotonen



Figuur 4. Bij een korte afstand van spleten tot scherm zien we de spleet. Bij een langere afstand zien we zonnebeelden.



Figuur 5. Elektronen door een dubbelspleet vertonen interferentie

niet naar voren in leerling antwoorden, zoals “een golf is een trilling, of een golf heeft een golflengte, een deeltje heeft massa”.

In de eerste demonstraties met onze koffer misten we de verrassing en verwondering van leerlingen. Dan heb je zo'n intrigerend verschijnsel voor fysici, maar leerlingen slikken het voor zoete koek, zonder kritische vragen, zonder protest. Dubbelspleet-experiment, het zal wel, of natuurlijk is er interferentie, zelfs als fotonen of elektronen één-voor-één door de spleet gaan, bij de dubbelspleet is er toch altijd interferentie? De oplossing is om de verwachtingen van leerlingen slim te manipuleren door aanpassing van de didactische volgorde in de demonstratie. We deden dat en vonden op een andere school inderdaad de verwondering in de klas en goede resultaten in interviews. De volgorde die we bedachten, bleek precies overeen te komen met die in het beroemde filmpje van Dr. Quantum (<https://www.youtube.com/watch?v=Bm2WievRZWA>).

Didactische volgorde

Het uiteindelijke en uitgetoetste scenario 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? Tekenen het scherm en wat je daarop ziet (figuur 4).* Dan uitvoering van het experiment.

Stap 2: Wat zou je op het scherm zien als we een evenwijdige lichtbundel op een (macroscopische) dubbelspleet laten vallen? *Tekenen het scherm en wat je daarop zult zien.* Terwijl de leerlingen tekenen maakt de docent een snel rondje door de klas. Uiteindelijk laten we de afbeelding van de spleet op het scherm zien.

Stap 3: Filmpje van watergolven door enkele en dubbele spleet.

Stap 4: Nu vervangen we de macroscopische dubbelspleet door de typische dubbelspleet die in laser experimenten gebruikt wordt en gebruiken we een laserstraal. Bijvoorbeeld in de demonstratiekoffer met een wit papiertje als scherm. *Wat verwachten we nu op het scherm? Tekenen dat.* Weer gaat de docent rond en laat vervolgens het interferentiepatroon zien. Lichtstralen interfereren met elkaar en geven het bekende patroon, typisch voor golfverschijnselen. Maar die lichtstralen bestaan uit fotonen, golfdéeltjes, een soort kogeltjes, toch wel raar.

Stap 5: Het kofferexperiment: Nu schieten we de fotonen één-voor-één door de spleten. We zetten een filter voor de laser dat slechts 1 op de 100.000 fotonen doorlaat. Een heel donkere zonnebril dus. *Tekenen het patroon dat je verwacht te zien op het scherm nadat er genoeg fotonen door de spleet zijn gegaan.*

Stap 6: 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 (in de orde van 1 km), aan de hand van het aantal fotonen/tijd op één positie.

Stap 7: *Kunnen we zien door welke spleet een foton gaat?* In het dr. Quantum filmpje blijkt dat het interferentiepatroon verdwijnt! Als leerlingen met verschillende ideeën komen, kan eventueel een korte klassikale discussie volgen. Dan het experiment uitvoeren. Er ontstaat een interferentiepatroon. Raar. Interfereren fotonen met zichzelf?

Stap 8: 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 waarschijnlijk-

heidsverdeling. 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.

Stap 9: Ten slotte koppelen we dit aan De Broglie golflengte en demonstreren we de PhET applet. Volgens De Broglie hoort bij elk deeltje een golflengte volgens de formule $\lambda = h/mv$. Voor macroscopische deeltjes zoals een voetbal, is die golflengte in de orde van 10^{-34} m en merken we niets van golfgedrag. Voor microscopische deeltjes, zoals elektronen, heeft de golflengte dezelfde orde van grootte als de afmetingen van atomen of zelfs groter. Dan merken we wel wat van dat golfgedrag.

Ten slotte

In de slotinterviews na de uiteindelijke versie van de demonstratie stelden we vragen aan de hand van de PhET applet. De meeste leerlingen konden de golf-deeltje dualiteit vragen goed beantwoorden en ze vonden het interessant en speciaal dat ze dit nu bij natuurkunde leerden. Basiskennis van golf-deeltje dualiteit is haalbaar in 6-vwo! Met wat sleutelen aan de didactiek, geïnformeerd door informatie uit interviews, kom je als docent een stuk verder. ●

NOTEN

1. Het kofferexperiment is te reserveren voor uitleen bij Wim Sonneveld van TU Delft, W.Sonneveld@tudelft.nl, bij John Kooiker van Universiteit Twente, j.h.a.kooiker@utwente.nl, of bij Enno van der Laan van de Rijksuniversiteit Groningen, j.e.van.der.laan@rug.nl.
2. Van Rossum, A (2018). *Handleiding bij de single foton interferentie demonstratie*. Enschede: Universiteit Twente.