

# Golf-deeltje dualiteit

Sander Wenderich, Jeroen Grijsen

## Misconcepties golf-deeltje dualiteit

Concepten als waarschijnlijkheid, onzekerheid en superpositie zijn tegen intuïtief en in strijd met het klassieke wereldbeeld dat veel leerlingen hebben. Hetzelfde geldt voor de golf-deeltje dualiteit [1]. Aangaande de golf-deeltje dualiteit worden veel vergelijkbare misconcepties beschreven, die goed samengevat worden door Ayene *et al.* [2]. Zij onderscheiden daarbij drie categorieën interpretaties door scholieren, gebaseerd op de mate van klassiek redeneren:

1. Een *klassieke beschrijving*, waarin elektronen of fotonen worden voorgesteld als klassieke deeltjes met gedefinieerde, rechtlijnig banen. Op een smalle spleet treedt een verandering van richting op, waarna opnieuw een gedefinieerde, rechte baan volgt. Licht gedraagt zich altijd als een golf en heeft geen impuls. Onbepaaldheid is niet fundamenteel, maar komt voort uit externe factoren (zoals meetfouten).
2. Een *gemengde beschrijving*, waarin elektronen of fotonen gedefinieerde, sinusvormige banen volgen. Er wordt of golfgedrag, of deeltjesgedrag vertoond, afhankelijk van de situatie. In een dubbelspleet interfereren enkele fotonen of elektronen daarom niet. Vergelijkingen voor licht worden ook toegepast op elektronen en een relatie tussen impuls en de Broglie golflengte wordt niet herkend.
3. Een *quasi-quantum beschrijving*, waarin elektronen gezien worden als geladen wolken, elektronen en fotonen tegelijk deeltjes en golven zijn, maar geen relatie tussen impuls en interferentiepatroon wordt gezien.

Dutt [3] geeft daarnaast nog twee voorbeelden van misconcepties rondom de de Broglie golflengte:

- de de Broglie golflengte is geen fundamentele eigenschap van microscopische deeltjes,
- de snelheid van een elektron bepaalt zijn karakter: deeltjesgedrag voor kleine snelheden en golfgedrag voor grote snelheden.

[1] K. Krijtenburg-Lewerissa *et al.*, Phys. Rev. Phys. Educ. Res. **13**, 010109 (2017)

[2] M. Ayene *et al.*, Phys. Rev. St Phys. Educ. Res. **7**, 020113 (2011)

[3] A. Dutt, Teaching Science **57**, 4 (2011)

## Leerdoelen lessenserie

Na deze lessen, kan de leerling:

Hoofddoelen:

1. Beredeneren mbv 1foton-2spleet experiment dat licht *tegelijktijd* zowel golf- als deeltjeskarakter heeft.
2. Begrijpen dat golf-deeltjedualiteit een fundamentele eigenschap van een *individueel* foton is. (één foton interfereert met zichzelf).

Subdoelen:

3. Beredeneren dat er één foton door de dubbelspleet gaat.
4. Het staafdiagram van de photo-counter interpreteren.
5. Het interferentiepatroon herkennen uit het staafdiagram van de photo-counter.
6. Het deeltjesmodel toepassen op het enkele foton dat de enkele spleet passeert.
7. Het golfmodel toepassen op het enkele foton dat de dubbelspleet passeert.
8. Beredeneren dat een foton zowel een golf- als een deeltjeskarakter kan vertonen.

### Activeren voorkennis

1. Licht is een golfverschijnsel (immers: golflengte bepaalt kleur!).
2. Het foto-elektrisch effect laat zien dat licht als 'pakketjes' binnen komt: *fotonen* vertonen deeltjesgedrag. [basis om foton als deeltjes te beschouwen]
3.  $E = hc/\lambda$  pakketje en golflengte in één formule! Vertonen fotonen golf- en deeltjes tegelijk of situatieafhankelijk?
4. *Elektronen* vertonen deeltjesgedrag (massa, kinetische energie, positie, etc.).
5. Licht vertoont interferentie [eerder in curriculum na golven oppakken]
6. Impuls klassiek helder

### Opbouw

1. Interferentie is een golfverschijnsel. Laten zien met bekend golfverschijnsel (licht): Young's dubbelspleet. Herhaal: fotonen vertonen golfgedrag.  
*Interferentie zit niet meer in het VWO programma voorafgaand aan quantum!*
2. Demonstratie quantumkoffer: fotonen vertonen golfgedrag en deeltjesgedrag tegelijk! Zie hieronder.
3. Een deeltje (elektron) is geen bolletje, maar een waarschijnlijkheidsgebied.  
Mogelijke vragen: Hoe groot is een elektron? Waarvan is een elektron gemaakt?  
Inspiratie: <https://gravityandlevity.wordpress.com/2015/04/11/how-big-is-an-electron/>
4. Deeltjes (elektronen) vertonen ook interferentie in een dubbelspleet: ook deeltjes met massa vertonen deeltjesgedrag en golfgedrag tegelijk!  
Video: <https://www.youtube.com/watch?v=ZqS8Jkk1HI>  
*Is gebruik concept van waarschijnlijkheidswolk die over beide spleten gaat plausibel?*

### Redenatie demonstratie quantumkoffer

1. Er ontstaat een interferentiepatroon: fotonen vertonen golfgedrag.
2. Het interferentiepatroon wordt opgebouwd uit individueel arriverende fotonen: fotonen vertonen deeltjesgedrag.  
*Conclusie 1:* fotonen vertonen zowel golf- als deeltjesgedrag.
3. Redeneer terug naar 1 foton: het interferentiepatroon geeft een waarschijnlijkheidsverdeling van waar het aan te treffen is. Dat betekent dat één foton tegelijk door beide spleten reist en met zichzelf interfereert: het is echt een golf!  
*Conclusie 2:* een individueel foton interfereert al met zichzelf.
4. Controleproef: afdekken van 1 spleet.  
*Is dit verwarrend in combinatie met de diffractie/heisenberg demonstratie?*

### Lesplan

Les 1	Lesdoel	Activiteit docent	Activiteit leerling	Opmerkingen

### Terminologie

Golfgedrag, deeltjesgedrag

## Testen

Voor:

- Begrip van golfgedrag van licht
- Begrip van deeltjesgedrag van licht
- Begrip van deeltjes-/golf-dualiteit (misconcepties)

Na:

- Begrip van dualiteit *tegelijkertijd*
- Begrip van dualiteit is eigenschap voor *één golfdeeltje*