Quantumfysica (3): Golven of deeltjes?

Dit is het derde artikel uit het dossier Quantumfysica. In het tweede artikel bespraken we de straling van zwarte lichamen.

In de voorgaande twee artikelen hebben we diverse aanwijzingen gezien voor het feit dat licht uit deeltjes bestaat. Het foto-elektrisch effect bleek goed verklaard te kunnen worden door aan te nemen dat lichtdeeltjes kleine “tikjes” tegen de elektronen in een metaal geven. Ook zagen we hoe Max Planck erin slaagde om het spectrum van zwarte stralers te beschrijven met behulp van lichtquanta – een beschrijving waarin zonder de deeltjeshypothese nog niemand geslaagd was. Het leek er aan het begin van de 20e eeuw dus sterk op dat de lichtdeeltjes of -quanta, ook wel *fotonen* genoemd, inderdaad bestaan.

Dat leverde echter direct een groot probleem op. Tot aan het einde van de 19e eeuw had men namelijk altijd aangenomen dat licht uit golven bestond, en ook daar waren heel goede redenen voor. Een typisch golfverschijnsel dat licht vertoont is *interferentie*. Interferentie is het verschijnsel waarbij verschillende golven elkaar versterken of juist uitdoven. Een eenvoudig voorbeeld van interferentie zien we wanneer we twee stenen in het water gooien.

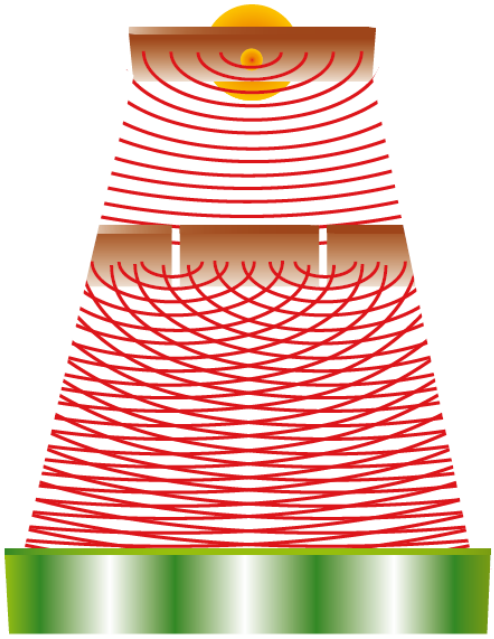


Afbeelding 1. Interferentie.Als we twee stenen in het water gooien, zien we dat de golven elkaar op bepaalde plekken versterken, maar op andere plekken juist uitdoven. (Foto: Paul Doherty)

Als we één steen in het water gooien, ontstaat het bekende patroon van cirkelvormige golven, die voortkomen uit het punt waar de steen het wateroppervlak heeft geraakt. Doen we ditzelfde met twee stenen (zie afbeelding 1), dan zien we iets bijzonders. Op punten op het wateroppervlak waar de golven van beide stenen een piek hebben, wordt het water extra ver omhoog getild. Op plaatsen waar beide golven een dal hebben, wordt het water extra ver omlaag getrokken. Er zijn echter ook punten waar één golf een piek heeft en de andere een dal, en daar kunnen de twee golven elkaar precies uitdoven. Op deze manier ontstaat het “ruitjespatroon” dat we in afbeelding 1 zien op de plekken waar de twee golven elkaar tegenkomen.

Het is goed om te beseffen dat dit gedrag een essentieel verschil vormt tussen golven en deeltjes. Als we een deeltje nemen, en we doen daar nog een deeltje bij, zullen we natuurlijk twee deeltjes overhouden. Maar als we een golf nemen, en we doen daar nog een golf bij, kan het gebeuren dat de twee golven elkaar opheffen en we dus géén golf overhouden.

Dat licht interferentie vertoont, was al sinds het begin van de 19e eeuw bekend. Een beroemd experiment is bijvoorbeeld het tweespletenexperiment van de Engelse natuurkundige Thomas Young – zie afbeelding 2. Young liet licht van één golflengte (dus: van één kleur) vallen op een plaatje waarin vlak naast elkaar twee spleetvormige openingen waren gemaakt. Het licht dat door de spleten heen kwam, viel vervolgens op een projectiescherm.



Afbeelding 2. Het tweespletenexperiment van Young.Licht valt vanuit een lichtbron die één kleur licht geeft (achter) op een plaatje met daarin twee spleten (midden). De spleten fungeren als nieuwe lichtbronnen, waarvan het licht op een scherm (voor) valt. Op het scherm zien we een interferentiepatroon van lichte en donkere banden.

In dit experiment gebeurt precies hetzelfde als bij de twee stenen de in het water worden gegooid. Er ontstaan twee bronnen van golven, en we kunnen op het scherm zien dat die golven elkaar op sommige plaatsen versterken, maar op andere plaatsen, waar de ene golf een piek heeft en de andere een dal, juist uitdoven. Op die manier ontstaat een karakteristiek interferentiepatroon van lichte en donkere banden. De proef is met een laserpointer en twee scheermes-spleten in een stuk papier vrij eenvoudig thuis uit te voeren, en wie dat doet zal na wat proberen het interferentiepatroon inderdaad zien verschijnen. Dus… is licht dan toch een golf?

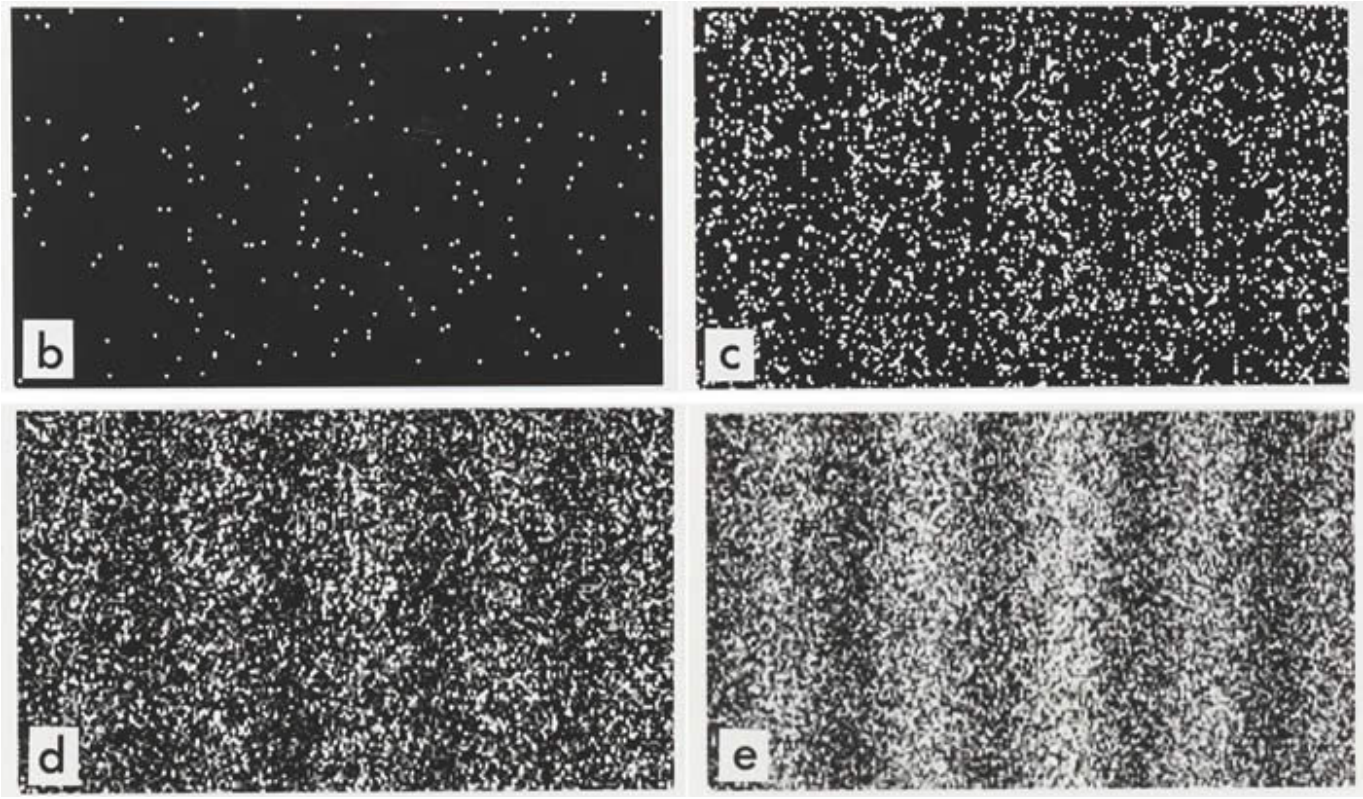
Nog bizarder wordt het wanneer we het tweespletenexperiment met heel kleine

hoeveelheden licht tegelijk uitvoeren. Als we de hoeveelheid licht maar klein genoeg maken, zouden we verwachten dat we op een gegeven moment één lichtdeeltje tegelijk uitzenden. Dat is iets wat in een gewoon huiskamerexperiment helaas niet voor elkaar te krijgen is, maar in een laboratorium is het geen groot probleem. Als we vervolgens het scherm achter de dubbele spleet vervangen door een fotografische plaat kunnen we precies zien wat het resultaat van de proef is. We zien dat in afbeelding 3 hieronder.



Afbeelding 3. Het tweespletenexperiment.Als we het tweespletenexperiment met heel weinig licht uitvoeren zien we duidelijk dat het licht in pakketjes (deeltjes) aankomt. (Afbeelding uit een experiment van A. Tonomura. In dit specifieke experiment werden overigens elektrongolven gebruikt in plaats van lichtgolven.)

Het resultaat lijkt duidelijk: op de plekken waar de fotonen het scherm hebben geraakt, zijn witte stippen te zien. Het lijkt hiermee onomstotelijk bewezen dat licht uit deeltjes bestaat, en niet uit golven. Maar wat gebeurt er als we het experiment gedurende heel lange tijd laten doorgaan? De resultaten zijn te zien in afbeelding 4:



Afbeelding 4. Het tweespletenexperiment.In het experiment van afbeelding 3 wordt nu steeds meer licht verzameld. We zien dat de individuele spikkels uiteindelijk een interferentiepatroon gaan vormen.

We zien dat er steeds meer spikkels op het scherm komen… en dat die spikkels uiteindelijk een interferentiepatroon gaan vormen! Aan de ene kant zien we hier dus het deeltjeskarakter van licht – de spikkels – maar aan de andere kant tegelijk ook het golfkarakter – het interferentiepatroon. Het vreemde is alleen dat die twee resultaten elkaar volkomen tegen lijken te spreken. Om een interferentiepatroon te vormen moet een golf door beide spleten tegelijk gaan – alleen dan kan het ene deel van de golf het andere deel immers uitdoven. Maar een enkel deeltje zou maar door één spleet tegelijk moeten gaan… We lijken op een groot mysterie te zijn gestuit.

Om het mysterie nog iets groter te maken: in de jaren ’20 van de 20e eeuw deden de Amerikaanse natuurkundigen Clinton Davisson en Lester Germer een soortgelijk experiment als Young, maar ditmaal met elektronen – de geladen deeltjes die rond atoomkernen cirkelen en die zorgen voor de chemische eigenschappen van allerlei stoffen, en voor de elektriciteitsgeleiding in metalen. Elektronen waren altijd gezien als *deeltjes*, maar door ze op een kristal te laten vallen, dat fungeerde als een mini-versie van de dubbele spleet, en vervolgens te detecteren waar de elektronen aankwamen, lieten Davisson en Germer zien

dat ook elektronen interferentiepatronen vertoonden – en dat ook elektronen zich dus gedroegen als *golven*!

Niet alleen bleken “klassieke” golven (zoals licht) dus allerlei deeltjeseigenschappen te hebben; “klassieke” deeltes (zoals elektronen) hebben ook golfeigenschappen. Daarmee stonden natuurkundigen voor een raadsel. Is licht nu een golf of een deeltje? Zijn elektronen deeltjes of golven?

Het antwoord kwam in 1924 van de Duitse natuurkundige Max Born. Born zei: licht en elektronen zijn geen golven *of* deeltjes: licht en elektronen zijn *allebei*. Dat klinkt als een science-fictionantwoord, maar Born gaf een heel duidelijke uitleg van wat hij daarmee bedoelde. In het volgende artikel beschrijven we het idee van Born, en zien we hoe we nu precies over de golf- en deeltjeseigenschappen van licht en elektronen na moeten denken.

Dit is het derde artikel uit het dossier Quantumfysica. In het vierde artikel zien we hoe het idee van golffuncties het golf-deeltjeprobleem oplost.