

De zonderlinge theorie van licht en materie

Ty Finnally, juli 2017

Dit is een samenvatting van de eerste twee hoofdstukken van het boek *QED* van Richard Feynman. Hierin wordt beschreven hoe je rekt aan de interactie tussen licht en materie. Het waarom wordt verder niet op ingegaan. Hoofdstuk drie en vier van het boek *QED* behandelen dusdanig afwijkende onderwerpen, dat deze niet in deze samenvatting passen. De samenvatting bestaat uit acht colleges.

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| 1. Licht | Wat is licht eigenlijk? |
| 2. Reflectie | Hoe werkt reflectie? |
| 3. Stopwatch | Zo moet je rekenen met licht |
| 4. Spiegel | Hoe werkt een spiegel? |
| 5. Tralie | Wat is een tralie? |
| 6. Badmeester | Gaat licht rechtdoor? |
| 7. Vergrootglas | Hoe werkt een vergrootglas? |
| 8. Samengestelde gebeurtenis | |

1. Licht

Richard Feynman is befaamd door zijn verfrissende blik op de wereld. Alles werd opnieuw door hem doordacht. Hierdoor slaagde hij er regelmatig in om nieuwe en verdiepte inzichten te verwerven in de natuur. Inzichten die met karakteristieke directheid werden geformuleerd en vevat zijn in pakkende beelden. Hij laat in *QED* aan de hand van eenvoudige diagrammen zien hoe natuurkundigen de kans bepalen waarmee een detector door een foton getroffen wordt.



Richard Feynman

QED gaat over een onderwerp dat uiterst ingewikkeld is: de theorie van quantum elektrodynamica. Dit onderwerp is gewoonlijk slechts voorbehouden aan universitaire studenten in de theoretische natuurkunde. Ik zal echter proberen om op eenvoudige manier uit te leggen hoe één en ander in elkaar steekt. *QED* is door zijn nauwgezetheid, volledigheid en eerlijkheid één van de meest succesvolle theorieën.

In veel popularisaties wordt een schijnbare eenvoud bereikt ten koste van een grove vertekening van het onderwerp. Echter, in deze samenvatting wordt de essentie van *QED* uiteengezet zonder haar geweld aan te doen.



Paul Drude

Omstreeks 1900 werd door Paul Drude een theorie ontwikkeld om de eigenschappen van materie te verklaren. Dit was de elektronentheorie van de materie. Deze stelde dat binnen de atomen kleine geladen deeltjes bestaan. Daaruit ontwikkelde zich het besef dat een atoom bestaat uit een zware atoomkern met daar omheen lichte elektronen.

De gangbare ideeën uit die tijd boden geen enkel houvast om te begrijpen wat er op atomaire schaal aan de hand was. Uiteindelijk lukte het in 1926 om een theorie op te stellen waarmee het gedrag van elektronen in materie kon worden beschreven. Deze theorie was nogal zonderling, maar dat was het gedrag van de elektronen ook. Het was de theorie van de quantummechanica.

De theorie van de quantummechanica verklaarde een overvloed aan bekende feiten. Bijvoorbeeld hoe het komt dat één zuurstof atoom een verbinding aangaat met twee waterstofatomen. Maar een goede beschrijving van de wisselwerking tussen licht en materie ontbrak nog. Rond 1929 lukte het om ook hiervoor een theorie op te stellen: de quantum elektrodynamica, of *QED*. Hiermee wordt de *kans* berekend dat een detector door een foton wordt getroffen.

Met deze theorie kon echter niet erg nauwkeurig gerekend worden. Pas in 1948 werd de ingenieuze correctie bedacht, waarmee alle experimenten konden worden bevestigd. De theorie is de afgelopen 60 jaar grondig aan de tand gevoeld. Heel precieze experimenten hebben bijvoorbeeld het magnetisch moment van een elektron vastgesteld tot op 11 cijfers achter de komma. Dit getal wordt met dezelfde nauwkeurigheid uit de theorie afgeleid. Op de afstand van Maastricht naar Amsterdam komt die nauwkeurigheid neer op minder dan de dikte van een haar.



Ontleding van wit licht in kleuren

We beginnen met het verschijnsel licht. Toen Newton het licht bestudeerde, ontdekte hij al snel dat hij met een prisma zonlicht kon ontleden in verschillende kleuren. Het licht van één kleur, bijvoorbeeld rood, was niet verder te ontleden. Met licht, bedoel ik naast zichtbaar licht ook *onzichtbaar* licht, zoals infrarood en ultraviolet licht. Maar ook röntgenstraling, gammastraling, microgolven en radiogolven maken deel uit van het complete spectrum van 'licht'. Dit is vergelijkbaar met geluid. Er bestaat hoorbaar geluid, maar ook *onhoorbaar* geluid, met een hele hoge of hele lage frequentie.

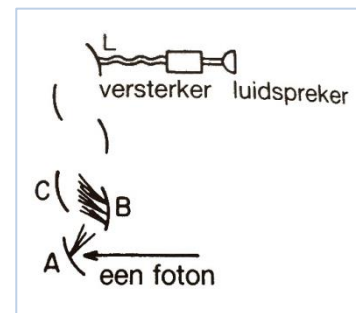
Newton dacht dat licht uit deeltjes bestond en noemde ze *corpuscula*. Hij had gelijk, ook al was zijn redenering niet helemaal correct. We weten nu dat licht uit deeltjes bestaat, tegenwoordig fotonen geheten. Het menselijk oog is een prima meetinstrument. Vijf of zes fotonen zijn al voldoende om een zenuwcel te activeren.

Maar met een goede detector zoals de *fotomultiplier* kunnen echter ook losse fotonen worden waargenomen. De fotomultiplier is echter een uiterst gecompliceerde detector, die pas mogelijk werd vanaf 1934.

Werking van de fotomultiplier

In de fotomultiplier valt één foton op plaat A waardoor een elektron wordt losgeslagen. Dit elektron wordt aangetrokken door plaat B waar meerdere elektronen vrij komen.

Dit proces wordt een aantal maal herhaald totdat miljarden elektronen een elektrische stroom op gang brengen in plaat L. Deze stroom wordt versterkt en weergegeven als een luide tik. In feite is een fotomultiplier gewoon een versterker voor losse fotonen.



Met een groot aantal fotomultipliers in een test-opstelling, en een zwakke lichtbron van een enkele kleur, horen we uitsluitend tikjes van dezelfde sterkte. De tikjes worden veroorzaakt doordat de fotonen één voor één de fotomultipliers raken. Er is geen verschil in geluidssterkte tussen de tikjes. Wanneer één fotomultiplier tikt (het is heel zwak licht), dan zijn de andere stil.

Fotonen bestaan dus niet uit golven maar uit deeltjes. Er wordt soms gesproken van de *golf-deeltje-dualiteit* van licht. Dit komt doordat het gedrag van licht niet altijd éénduidig kan worden beschreven als deeltje. Hier komen we in deze samenvatting echter niet op terug.

In het volgende college gaan we het hebben over de reflectie van licht. Waaruit bestaat reflectie, aan welke zijde van een glasplaat reflecteert licht, en wat heeft de dikte van de glasplaat er mee te maken?

Noot 1: De ik-persoon is Richard Feynman

Noot 2: De polarisatie van licht wordt in deze samenvatting volledig buiten beschouwing gelaten

2. Reflectie

Ik neem aan dat je vertrouwd bent met de meeste bekende eigenschappen van licht. Licht volgt een rechte lijn; licht wordt door water gebroken; bij spiegeling is de hoek van terugkaatsing gelijk aan de hoek van inval; wit licht kan opgedeeld worden in verschillende kleuren; licht kan met een lens gebundeld worden. Ik gebruik deze bekende verschijnselen ter illustratie van het vreemde en vaak zelfs bizarre gedrag van lichtdeeltjes. Hierbij houd ik mij strikt aan de theorie van de quantum elektrodynamica.

Nieuw is misschien dat licht uit deeltjes bestaat. Niet nieuw is dat licht gedeeltelijk teruggekaatst wordt door reflecterende oppervlakken, bijvoorbeeld door water. Ook door een glasplaat wordt licht gedeeltelijk weerkaatst. In deze samenvatting wordt uitsluitend gesproken over weerkaatsing door een reflecterend oppervlak. In werkelijkheid is de interactie tussen licht en materie erg ingewikkeld. Voor onze berekening maakt dat, vreemd genoeg, niets uit. Het berekende resultaat is exact gelijk aan de experimentele waarneming.

De mogelijkheid bestaat dat je mij gewoon niet gelooft. Of je kunt mijn betoog maar moeilijk volgen, en daarom haak je af. Hoe kan ik ook iets uitleggen dat universitaire studenten pas in het derde jaar krijgen? Ik zal dit aan de hand van een voorbeeld duidelijk maken. De Maya-priesters kenden in hun tijd al veel astronomische fenomenen. Zij konden voor ieder dag de opkomst van de zon berekenen, en maansverduisteringen voorspellen. Om getallen weer te geven gebruikten zij een systeem van punten en strepen, inclusief de nul.

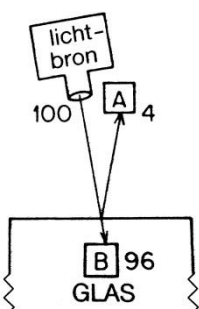
Zo een berekening is een ingewikkelde aangelegenheid. Daarom vragen wij de Maya-priester om uitleg van slechts één stapje, bijvoorbeeld het van elkaar aftrekken van twee getallen. Hierbij gaan we ervan uit dat we analfabeet zijn, en niet weten hoe een aftreksom werkt. Hoe zou de priester ons dat dan uitleggen? Hij kan ons uitleggen hoe getallen worden gemaakt, met punten en strepen, en ons dan de regels van het aftrekken leren.

Maar hij zou ons ook kunnen vertellen wat hij eigenlijk doet. Stel dat we 236 willen aftrekken van 584. Tel dan eerst 584 bonen af en doe ze in een pot. Neem er dan 236 uit, en tel de bonen die zijn achtergebleven. Dat aantal is het verschil van 584 en 236. Je zou misschien zeggen dat dat erg omslachtig is. Daarom, zegt de Maya-priester, zijn ook de regels voor het aftrekken gemaakt. Die regels zijn nogal ingewikkeld maar werken veel sneller dan het aftellen van bonen.



Dresdener codex

Om gedeeltelijke reflectie van licht aan een oppervlak te verklaren, zijn omstreeks 1600 verschillende theorieën opgesteld. Eén ervan stelde dat het grootste deel van het glasoppervlak uit 'gaten' bestaat die het licht doorlaten, terwijl het overige deel met stukjes reflecterend materiaal bedekt is. Een andere theorie ging ervan uit dat licht een golfverschijnsel is, en verklaarde aldus de reflecterende eigenschappen van licht. Maar de werkelijkheid blijkt nog veel vreemder te zijn.

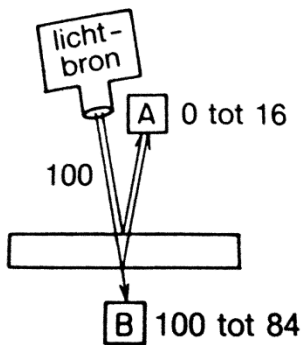


Enkelzijdige reflectie

We gaan nu ons eerste experiment uitvoeren. Zwak licht van dezelfde kleur, bijvoorbeeld rood, wordt door een lichtbron uitgezonden naar een glasoppervlak. Een detector, de fotomultiplier, staat boven het glasoppervlak bij A om gereflecteerde fotonen op te vangen. Om te kijken hoeveel fotonen door het glasoppervlak heendringen, wordt *binnenin* het glas bij B een tweede detector geplaatst (een goede experimentator krijgt dat wel voor elkaar).

Wat blijkt nu? Van iedere honderd fotonen komen er gemiddeld 4 bij A en 96 bij B. Gedeeltelijke reflectie betekend in dit geval dat 4% van de fotonen door het glasoppervlak wordt teruggekaatst, en dat 96% wordt doorgelaten. Dat is precies wat we zouden verwachten van gedeeltelijke reflectie.

Een voorbeeld van enkelvoudige reflectie is een wateroppervlak. Het percentage licht dat gereflecteerd wordt, wordt uitsluitend bepaald door het reflecterend vermogen van het oppervlak van het water, omdat normaal gesproken de bodem niet reflecterend is. In ons eerste experiment is het glasoppervlak min of meer gelijkwaardig aan het wateroppervlak. De reden dat ik voor ons experiment een glasoppervlak heb genomen, is dat ik een vervolg experiment voor ogen heb. Dan is het handig om hetzelfde materiaal, glas, te gebruiken.



Bij ons tweede experiment wordt gedeeltelijke reflectie aan *twee* oppervlakken gemeten. We vervangen het glasoppervlak door een dunne glasplaat, en meten de reflectie aan de voorkant én de achterkant van de glasplaat. Detector B zetten we daarom nu *achter* de glasplaat, tegenover de lichtbron.

Nog steeds moeten bij A en B samen, alle fotonen gedetecteerd worden, en dat is ook het geval. Als de voorkant van de glasplaat 4% van het licht reflecteert, en de achterkant 4% van de resterende 96%, dan zou je verwachten dat bij A ongeveer 8% van het licht gedetecteerd wordt, en bij B ongeveer 92%.

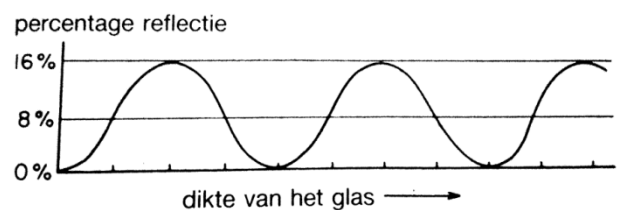
Dubbelzijdige reflectie

In werkelijkheid is dit percentage afhankelijk van de dikte van de glasplaat!

Dus, de dikte van de glasplaat dicteert welk percentage van het licht weerkaatst wordt. Uit ons experiment aan glasplaten van verschillende diktes, blijkt dat de weerkaatsing van licht niet constant is. Soms is de weerkaatsing 2%, soms 8%, soms 12% of iets er tussenin. Het lijkt willekeurig, dus dit vraagt om nog een experiment.

In ons derde experiment nemen we eerst de aller dunste glasplaat die we kunnen vinden. Deze reflecteert bijna geen licht. Een net iets dikkere glasplaat reflecteert bijvoorbeeld 2% van het licht. Nemen we geleidelijk aan steeds dikkere glasplaten, dan zien we de weerkaatsing toenemen tot maximaal 16%. Met nog dikkere glasplaten neemt de reflectie weer af tot deze weer 0% bereikt. Zo schommelt de reflectie op en neer tussen 0% en 16%, terwijl de glasplaten steeds dikker en dikker worden.

Naarmate de dikte van de glasplaat heel langzaam groter wordt, schommelt het percentage licht dat bij A aankomt blijkbaar tussen de 0% en 16%. Dit is experimenteel vastgesteld voor hele dunne glasplaten, dunner dan een haar, tot glasplaten van wel 50 meter dik.



De reflectie schommelt naarmate de dikte van het glas toeneemt

Hoe valt deze vreemde relatie tussen licht reflectie en glasdikte te verklaren? Hoe kan het *glasoppervlak* 4% van de fotonen weerkaatsen (ons eerste experiment), terwijl de reflectie op te heffen is door een *glasplaat* te nemen met een geschikte glasdikte? En versterkt worden tot 16% bij een iets andere dikte? Wat zou een derde of vierde reflecterend oppervlak voor effect hebben?

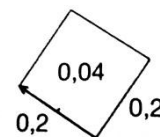
Deze reflectie verschijnselen gebruik ik in het volgende college als voorbeeld voor een berekening met de quantum elektrodynamica. Ik laat zien 'hoe de bonen geteld moeten worden'. Dat wil zeggen, wat natuurkundigen doen om het goede antwoord te vinden. Ik ga niet uitleggen hoe fotonen 'beslissen' om al dan niet terug te kaatsen. Dat weet niemand, en de vraag is waarschijnlijk zinloos. Ik laat alleen zien hoe de je de *kans* bepaalt dat licht aan een glasplaat van een bepaalde dikte reflecteert.

3. Stopwatch

Gedurende vele jaren na Newton werd gedeeltelijke reflectie naar algemene tevredenheid verklaard met de golftheorie. Totdat uit experimenten met uiterst zwak licht en fotomultipliers bleek dat ze toch niet klopte. Bij afnemende lichtsterkte bleven de fotomultipliers even krachtig tikken, maar gaven een minder aantal tikken. Dit is precies wat je van deeltjes zou verwachten. Ook nu nog bestaat er geen bevredigend model ter verklaring van gedeeltelijke reflectie. We kunnen alleen de *kans* berekenen waarmee een foton weerkaatst.

Zet je schrap. Nu eens niet omdat het zo onbegrijpelijk is, maar eerder vanwege de kinderlijke eenvoud. We gaan pijltjes tekenen op een stuk papier. Ieder pijltje staat voor een *mogelijke weg* van lichtbron naar detector, en dat betekent dat we dus voor iedere *mogelijke weg* een pijltje moeten tekenen. Dit wordt hieronder toegelicht.

Ons eerste experiment was nog vrij eenvoudig. De fotonen konden slechts aan één oppervlak reflecteren. Daarom hoeft voor ieder foton maar één pijltje getekend worden, en er is maar één *mogelijke weg*.



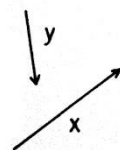
De kans dat hier reflectie plaatsvindt is 4%. De eerste regel van QED: neem het *kwadraat* van een pijltje, om de kans te berekenen dat een foton bij de detector komt. De lengte van het pijltje is dus gelijk aan 0,2, want het kwadraat hiervan is 0,04 ofwel 4%.

Het pijltje gekwadrateerd

In het volgende experiment waren *twee* reflecterende oppervlakken, de voorkant en de achterkant van de glasplaat. Er zijn daarom voor ieder foton *twee mogelijke wegen*, en er moeten dus *twee* pijltjes getekend worden. Regel twee van QED: de pijltjes moeten worden *opgeteld* om het juiste resultaat te krijgen. Van het samengestelde pijltje, de *resultante*, moet weer het kwadraat worden genomen (regel 1).

Pijltjes optellen

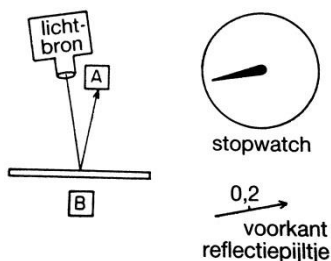
Hoe tellen we de pijltjes op? Stel dat we pijltje X en pijltje Y willen optellen. De punt van X wordt aan de staart van Y gezet (of andersom, want dat maakt niets uit). Door de staart van X aan de punt van Y te verbinden ontstaat een samengestelde pijl, of *resultante*.



Op deze manier kunnen we een willekeurig aantal pijltjes optellen. Het lijkt op een dansles. Elk afzonderlijk pijltje geeft aan hoe ver een danspas voert en in welke richting. De resultante geeft aan hoe je in één sprong op dezelfde bestemming aan kunt komen.

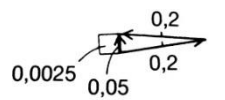
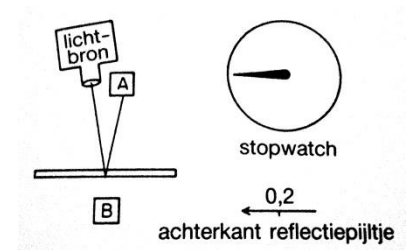
Om de kans te bepalen dat licht reflecteert aan een glasplaat hebben we een *resultante* nodig. Om de resultante te krijgen moeten we de pijltjes van alle *mogelijke wegen* optellen. Zijn er meerdere *mogelijke wegen*, dan wordt ook de richting van de pijltjes van belang. Om de richting van de pijltjes te bepalen gebruiken we een *stopwatch* die aan iedere *mogelijke weg* is gekoppeld. De wijzer van deze stopwatch draait héél erg snel rond.

De stopwatch begint te lopen zodra een *mogelijke weg* begint (foton verlaat lichtbron). De stopwatch stopt zodra de *mogelijke weg* stopt (foton komt bij detector). De wijzer van de stopwatch staat dan in een bepaalde richting, en zo moet het pijltje getekend worden. Regel drie van QED: als het foton tegen de voorkant van de glasplaat weerkaatst, moet het pijltje 180° gedraaid worden, anders niet.



We bekijken nu de pijltjes voor de situatie waarin licht door een extreem dunne glasplaat gereflecteerd wordt. We bekijken de eerste *mogelijke weg*. Hierbij verlaat een foton de lichtbron (de wijzer van de stopwatch begint te lopen), weerkaatst tegen de voorkant en raakt detector A (de wijzer van de stopwatch stopt). We tekenen een pijltje met een lengte van 0,2 in een richting tegengesteld aan die van de wijzer van de stopwatch (regel 3).

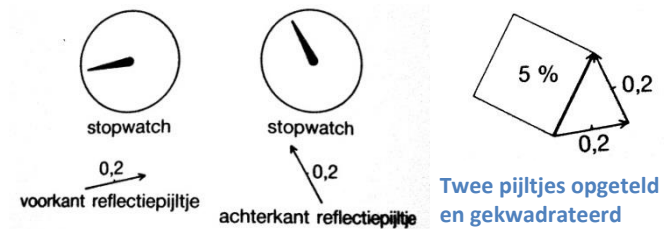
Vervolgens bekijken we de tweede *mogelijke weg*. Weer verlaat een foton de lichtbron (de wijzer begint te lopen), weerkaatst tegen de achterkant en raakt detector A (de wijzer stopt). De wijzer van de stopwatch staat bijna in dezelfde richting als bij de vorige *mogelijke weg*, want het foton doet er net iets langer over om bij A te komen. We tekenen een pijltje met een lengte van 0,2 in dezelfde richting als de wijzer van de stopwatch.



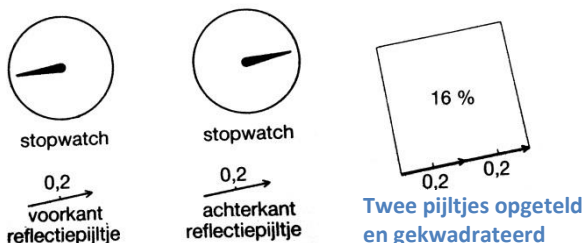
Twee pijltjes opgeteld en gekwadeerd

We tellen nu de twee pijltjes van *mogelijk wegen* op. Doordat ze even groot zijn en vrijwel in tegengestelde richting staan, is de lengte van de resultante heel klein. Het kwadraat is zelfs nog kleiner. Hieruit volgt dat de kans waarmee licht aan een uiterst dun laagje glas reflecteert bijna nul is. In dit voorbeeld is dat 0,25%.

We vervangen de dunne glasplaat door een iets dikkere. Dan is het foton dat tegen de achterkant weerkaatst een beetje langer onderweg dan in het eerste voorbeeld. De wijzer van de stopwatch draait daarom iets langer door voordat hij stopt. Hierdoor verandert de richting van het pijltje, de resultante wordt wat langer en de kans dat het foton reflecteert wordt groter, in dit voorbeeld 5%.



Twee pijltjes opgeteld en gekwadeerd



Twee pijltjes opgeteld en gekwadeerd

We bekijken nu het geval waarin het glas net dik genoeg is om de wijzer van de stopwatch een halve slag te draaien. De pijltjes wijzen dan dezelfde kant uit. Als ze worden opgeteld krijgen we een resultante met een (maximale) lengte van 0,4. Het kwadraat hiervan is 0,16 zodat de kans dat het foton reflecteert 16% is.

Als we twee keer zo dik glas nemen, dan draait de wijzer van de stopwatch een hele slag. Beide pijltjes van *mogelijke wegen* staan precies tegengesteld en de lengte van de resultante is nul. Dit gebeurt iedere keer wanneer het glas exact dik genoeg is om de wijzer van de stopwatch een hele slag te laten draaien.



Twee pijltjes opgeteld en gekwadeerd

De fraaie kleuren van een dunne oliefilm op water, of die van een zeepbel, worden op een soortgelijke manier gemaakt. Je moet echter beseffen dat de stopwatch van de *mogelijke weg* voor blauw licht sneller loopt dan die voor rood licht. Daarom, en vanwege de voortdurend variërende dikte van de olie- of zeepfilm, zie je die gedeeltelijke reflectie van licht als een schittering van kleuren.

Het vreemde gedrag van gedeeltelijke reflectie kan dus goed worden verklaard met die malle pijltjes. De juiste term voor zulke pijltjes is 'waarschijnlijkheidsamplitude'. Wij praten echter gewoon over pijltjes. We zullen deze pijltjes methode in de volgende colleges verder onderzoeken.

Noot 1: Ik spreek hier niet over een foton die van lichtbron naar detector gaat. Ik heb het hier consequent over een mogelijke weg. Ik neem af en toe wel het foton in gedachten als voorbeeld, om de weg die het foton kan afleggen duidelijk te krijgen. Maar ik spreek nog steeds over een mogelijke weg, en de kans dat het foton een bepaalde weg volgt. Meer is ook niet mogelijk met de quantum theorie.

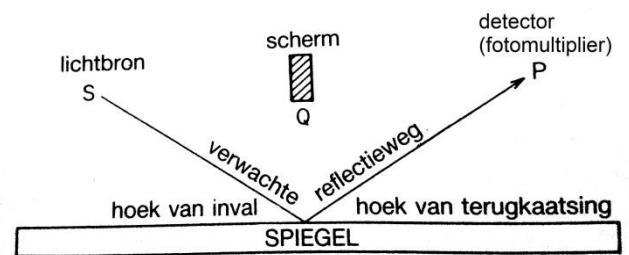
Noot 2: Een resultante is eigenlijk ook gewoon een pijltje met een lengte en een richting. Maar om onderscheid te maken tussen de getekende pijltjes en het samengestelde pijltje, gebruik ik heel vaak het woord resultante.

4. Spiegel

De belangrijkste conclusie uit het eerste college is dat licht uit deeltjes bestaat. Als licht de detector raakt geeft deze tikken van gelijke sterkte, en het aantal neemt af als het licht zwakker wordt. In het tweede college werd 4% van de fotonen teruggekaatst bij enkelzijdige reflectie. Het is echter onmogelijk om precies te voorspellen welke fotonen teruggekaatst worden en welke niet. Nog vreemder wordt het wanneer een glasplaat aanwezig is met twee reflecterende oppervlakken, waarbij het percentage reflectie schommelt met de glasdikte.

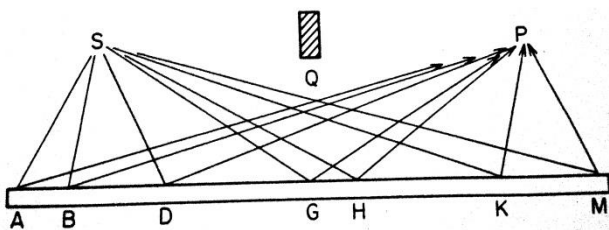
We kunnen alleen de *kans* berekenen waarmee een foton de detector raakt. De kans dat dit zich voordoet is gelijk aan het kwadraat van de *resultante*. Deze resultante wordt verkregen door het optellen van de pijltjes van alle *mogelijke wegen*. De richting van de pijltjes wordt bepaald door de wijzer van een héél erg snel rond draaiende *stopwatch*, die aan iedere *mogelijke weg* is gekoppeld. Ik wil nu laten zien dat met deze wonderlijke regels alle bekende eigenschappen van licht verklaard kunnen worden.

In het volgende experiment gaan we kijken hoe een spiegel licht weerkaatst. Bij S staat een lichtbron die uiterst zwak licht uitzendt. Op gelijke hoogte met de lichtbron plaatsen we een detector (fotomultiplier) bij P. We willen de kans bepalen dat de detector tikt nadat een foton uitgezonden is. Om te verhinderen dat een foton direct naar de detector gaat plaatsen we bij Q een scherm. Het lijkt vanzelfsprekend dat het licht alleen in het midden van de spiegel weerkaatst en dat de uiteinden geen enkele rol spelen.



Constructie van een spiegel die licht weerkaatst

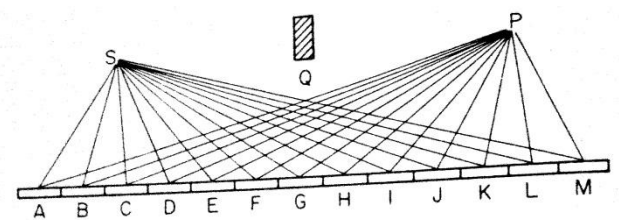
Niets is echter minder waar. Immers, de kans dat een foton de detector raakt, wordt gevonden door de pijltjes te tekenen voor alle *mogelijke wegen*, en deze op te tellen. Bij het experiment met de glasplaat waren er slechts twee



De mogelijke wegen van lichtbron naar detector

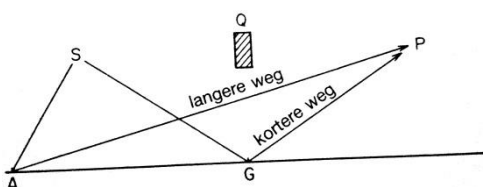
mogelijke wegen. Bij het huidige experiment met de spiegel zijn er echter onnoemelijk veel manieren waarop een foton de detector kan bereiken. Het foton kan aan de linkerkant van de spiegel reflecteren bij A of B, het kan in het midden bij G reflecteren, of aan de rechterkant van de spiegel bij K of M. Dit zijn allemaal *mogelijke wegen*, die het licht kan volgen.

Om het probleem wat overzichtelijker te maken delen we de spiegel op in een lange strook van kleine spiegelvlakjes, A tot en met M. Ieder spiegelvlakje staat voor een *mogelijke weg* van lichtbron naar detector. We gaan nu voor elke *mogelijke weg*, en dus voor ieder spiegelvlakje, een pijltje tekenen. Ieder pijltje heeft een bepaalde lengte en wijst in een bepaalde richting. We bekijken als eerste de lengte.



De spiegel is verdeeld in een strook van spiegelvlakjes, die ieder voor een *mogelijke weg* staan

Omdat iedere *mogelijke weg* afzonderlijk een vrijwel even grote kans heeft om plaats te vinden zijn de pijltjes allemaal (nagenoeg) even lang. Hoewel de pijltjes gelijk van lengte zijn, verschilt hun richting wel degelijk. In het derde college hebben we gezien dat de richting van een pijltje bepaald wordt door de eindstand van de wijzer van de stopwatch van de bijbehorende *mogelijke weg*.

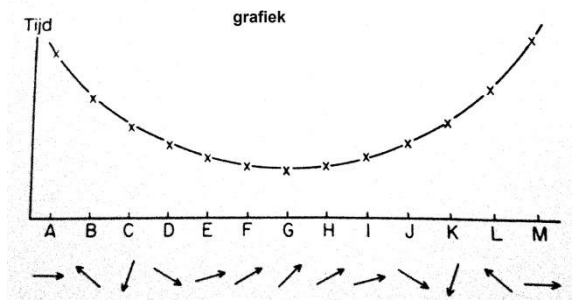


Wanneer een foton de *mogelijke weg* via spiegelvlakje A naar de detector neemt heeft het beduidend meer tijd nodig, en loopt de stopwatch veel langer door, dan wanneer het de *mogelijke weg* neemt via het middelste spiegelvlakje G. Het zal duidelijk zijn dat de snelste *mogelijke weg* die via het midden van de spiegel is.

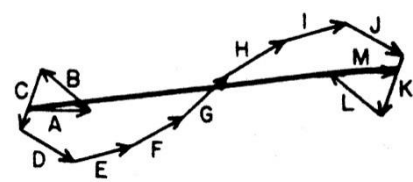
De onderstaande tijdgrafiek is een hulpmiddel bij het bepalen van de richting van de pijltjes. Bij ieder spiegelvlakje noteren we de hoeveel tijd die het licht nodig heeft om via dat spiegelvlakje naar de detector te gaan.

Het kost een foton veel tijd om via spiegelvlakje A de detector te bereiken. Naarmate we het midden van de tijdgrafiek naderen, heeft een foton minder tijd nodig en staan de punten lager in de tijdgrafiek. Voorbij het midden neemt de tijd weer toe.

We tekenen nu de pijltjes. De *mogelijke weg* via spiegelvlakje A duurt het langst en het pijltje staat in willekeurige richting. De *mogelijke weg* via spiegelvlakje B duurt wat korter, maar het pijltje draait nog steeds willekeurig rond. In het midden van de spiegel wijzen de pijltjes voor de spiegelvlakjes F, G en H bijna in dezelfde richting, want voor die *mogelijke wegen* is er amper tijdsverschil.



De tijd die het kost om via spiegelvlakje A of M van lichtbron naar detector te gaan, is beduidend meer dan via spiegelvlakje G



De grootste bijdrage komt van spiegelvlakjes in het midden van de spiegel: F, G en H

We tellen nu pijltjes A tot en met M op en zien dat de resultante een flinke lengte heeft. Echter, de eerste en laatste pijltjes dragen maar weinig tot niets bij aan de totale lengte van de resultante. Als we de randen van de spiegel zouden afsnijden zou dat nauwelijks invloed hebben op de uiteindelijke lengte. Veruit het meeste wordt bijgedragen door de pijltjes in het midden van de spiegel. Dat is tevens de plaats waar de fotonen het kortst onderweg zijn.

Het verschil in tijd tussen nabijgelegen spiegelvlakjes is het kleinst voor de spiegelvlakjes in het midden van de spiegel. Dit is de meest directe weg van de lichtbron naar de detector. De pijltjes wijzen ongeveer dezelfde kant uit en leveren een grote bijdrage aan de lengte van de resultante. Daarom is de kans dat het licht de *mogelijke weg* via het midden van de spiegel kiest, veruit het grootst. Hieruit volgt dat licht doorgaans de kortst en snelst *mogelijke weg* neemt, én dat de hoek van inval gelijk is aan de hoek van terugkaatsing.

De quantum elektrodynamica geeft dus het goede antwoord. Het midden van de spiegel draagt aan de reflectie het meeste bij. Om tot dit antwoord te komen moesten we wel veronderstellen dat het licht via elk punt van de spiegel de detector kon bereiken. Daarvoor moesten we een groot aantal pijltjes tekenen, waarvan de meeste weer snel tegen elkaar weg bleken te vallen. De invloed van de randen van de spiegel was te verwaarlozen.

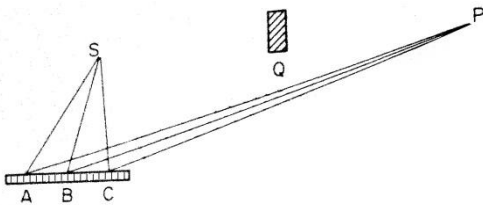
De uiteinden van de spiegel spelen echter wel degelijk een rol bij de reflectie, hoewel dat misschien niet direct helder is. Het idee dat reflectie over de hele spiegel plaatsvindt moeten we nodig eens nader onderzoeken. Welke functie hebben de randen bij de reflectie? We zullen het zien in het volgende college.

5. Tralie

In de natuurkunde probeert men fysische verschijnselen te beschrijven met zo min mogelijk theorieën. Dit is in de loop van de tijd aardig gelukt. Voorheen werden beweging, geluid en warmte opgevat als verschijnselen die niets met elkaar te maken hadden. Daar kwam verandering in toen Sir Isaac Newton de bewegingswetten ontrafelde. Al snel bleken beweging, geluid en warmte nauw met elkaar samen te hangen.

Naderhand werden elektriciteit en magnetisme ontdekt, en in 1873 lukte het James Clerk Maxwell om beide verschijnselen te beschrijven in één theorie. Zijn theorie toonde tevens de samenhang van elektriciteit en magnetisme met licht.

Van het idee dat reflectie over de hele spiegel plaatsvindt maken we ons volgende experiment. Daartoe laten we de hele opstelling uit college vier intact, behalve de spiegel. Hiervan halen we driekwart weg zodat alleen aan de



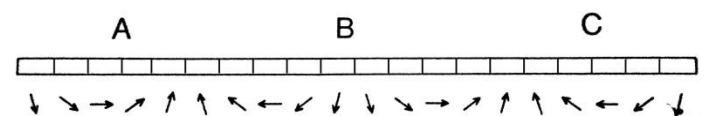
We houden een kwart van de spiegel over

linkerkant een stukje spiegel overblijft, met spiegelvlakjes A, B en C. Daarnaast voeren we voor dit experiment de nauwkeurigheid op door de spiegelvlakjes veel kleiner te maken. Er blijft nog een behoorlijke stuk spiegel over, maar dat bevindt zich duidelijk op de verkeerde plaats. Dit stukje spiegel kan onmogelijk nog spiegelen, toch?

Uiterst zwak licht van één kleur, bijvoorbeeld rood, wordt uitgezonden door lichtbron S. We willen de kans bepalen dat de detector tikt nadat een foton uitgezonden is. Je zou in eerste instantie zeggen dat dit onmogelijk is, omdat de hoek nu helemaal verkeerd is.

De kans dat een foton de detector raakt, wordt gevonden door pijltjes te tekenen voor alle *mogelijke wegen*, en deze op te tellen. In dit geval gebruiken we voor alle *mogelijke wegen* alléén het stukje spiegel dat over is.

Als je goed kijkt zie je dat de pijltjes van de *mogelijke wegen*, en de wijzers van de stopwatches, voor de achtereenvolgende spiegelvlakjes geleidelijk rond gaan. In dit voorbeeld gaan de pijltjes over de afstand A-B-C precies twee keer helemaal rond.



De pijltjes van de *mogelijke wegen* gaan geleidelijk rond

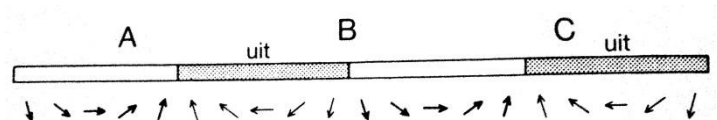


Resultante ≈ 0

Als we alle pijltjes van alle spiegelvlakjes optellen krijgen we een cirkelbeweging. Netto leveren de pijltjes niets op. Dit was al bekend uit het vorige college, waarin duidelijk werd dat de uiteinden weinig bijdroegen aan de resultante. De resultante is nagenoeg gelijk aan nul, omdat een pijltje naar links wordt opgeheven door een pijltje naar rechts, en er zijn ongeveer evenveel pijltjes. In dit voorbeeld heb ik er 20 getekend, maar in werkelijkheid zijn het er onnoemelijk veel. Het stuk spiegel spiegelt dus nog steeds niet.

Maar nu gaan we de situatie veranderen. We schrapen heel voorzichtig het spiegellend laagje weg bij alle spiegelvlakjes waarvan de pijltjes naar *links* wijzen. Dan blijven alleen nog spiegelvlakjes over waarvan de pijltjes naar *rechts* wijzen.

Het totaal van alle *mogelijke wegen* is nu gehalveerd, omdat de helft van de spiegel niet meer spiegelt. Er blijft alleen nog het deel van de spiegel over met de pijltjes die naar rechts wijzen. De pijltjes naar links zijn niet langer een *mogelijke weg*.



Het spiegellend laagje is op regelmatige afstand weg geschraapt



Resultante $\gg 0$

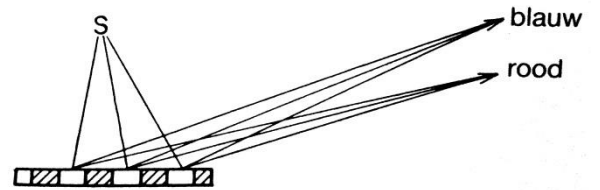
Als we deze naar rechts wijzende pijltjes optellen ontstaat een reeks halve cirkels die samen een aanzienlijke resultante opleveren. Volgens de theorie zouden we dus een sterke weerkaatsing moeten krijgen. En dat klopt!

Dat we de pijltjes naar rechts kozen voor het weg schrapen van het spiegelend laagje was willekeurig. We hadden net zo goed de pijltjes naar links, naar boven of naar rechtsonder kunnen nemen.

Een spiegel waarvan op regelmatige afstand een deel is weg geschraapt, of een dun oppervlak waarin een reeks groeven is aangebracht, heet een *tralie* of een *diffractierooster*. Het lijkt tovenarij. Je schraapt een stuk van de spiegel weg waar je geen spiegeling verwacht, en hij spiegelt!

Onze tralie werkt uitstekend bij monochromatisch licht, licht van één kleur. Maar bij blauw licht lopen de stopwatches van de *mogelijke wegen* sneller dan bij rood licht. De detector kan dan wel een blauwe reflectie waarnemen, maar onder een andere hoek. Blijkbaar is de geometrie van de opstelling van belang.

Het is toch mogelijk om een blauwe reflectie waar te nemen op de plaats waar je eerst een rode reflectie had. Dan moet je wel de groeven in de spiegel dichter bij elkaar leggen, of je houdt de spiegel een beetje scheef.



Blauw licht wordt door de groefjes onder een andere hoek gereflecteerd dan rood licht

Als je wit licht op een tralie richt heeft iedere kleur licht zijn eigen reflectie richting. Dit is mooi te zien bij een CD of een DVD. In een CD of DVD zitten vele duizenden groeven, waarbij het zonlicht wordt weerkaatst als heldere kleuren, variërend van rood via geel en groen naar blauw. Dit is vooral goed te zien wanneer je de CD of DVD wat op en neer beweegt.

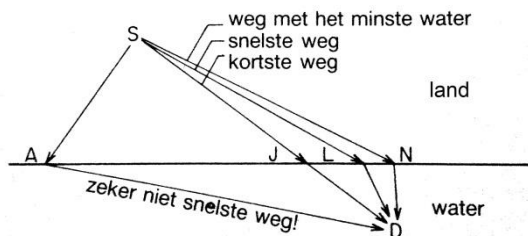
Dit experiment laat zien dat de plaatsen op de spiegel die niet lijken bij te dragen aan de reflectie toch niet zomaar verwaarloosd kunnen worden. Het blijkt dat bij reflectie het hele spiegeloppervlak betrokken is. Wil je de kans dat licht de detector raakt goed berekenen, dan moeten de pijltjes voor elke manier waarop een *mogelijke weg* kan plaatsvinden worden opgeteld. Niet alleen voor de manieren die het meest waarschijnlijk lijken. Hiermee kunnen frappante optische effecten tevoorschijn getoverd worden.

In het volgende college gaan we bekijken of licht wel echt de snelste weg volgt, en waarom. En we zullen bekijken wat er eigenlijk gebeurt bij een luchtspiegeling.

6. Badmeester

Ongetwijfeld weet jij al dat lichtbreking plaatsvindt bij de overgang van lucht naar water. We gaan nu onderzoeken waarom licht eigenlijk breekt, en hoeveel. We gebruiken hiervoor de analogie van de badmeester.

Stel dat in het water bij D een meisje aan het verdrinken is. Langs de kant bevindt zich een badmeester bij S. Op land kan de badmeester veel harder rennen dan dat hij in het water kan zwemmen. De vraag is nu: waar moet de badmeester het water induiken om zo snel mogelijk bij de drenkelinge te komen?

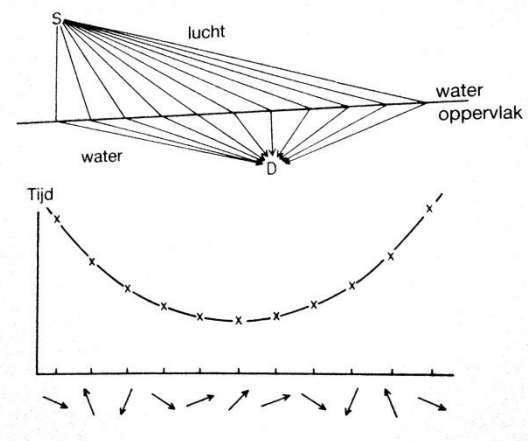


Duikt de badmeester bij A het water in, om dan als een bezetene gaan zwemmen? Nee, natuurlijk. Maar in rechte lijn naar de drenkelinge toe sprinten en bij J het water induiken lijkt ook niet echt de snelste route. Misschien wanneer de badmeester zoveel mogelijk over land rent en vervolgens bij N het water in duikt? Zou dat de snelste weg zijn?

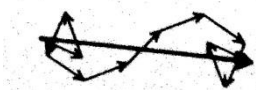
Voor een badmeester zou het dwaasheid zijn om onder deze omstandigheden te gaan analyseren en rekenen. Hoewel de badmeester waarschijnlijk intuïtief de snelste weg vindt, kun je ook de positie berekenen. Het is een compromis tussen de directe weg via J en de route met het minste water langs N.

Om te onderzoeken of het met licht net zo gaat, voeren we het volgende experiment uit. Een lichtbron bevindt zich bij S in de lucht (op het land zou een beetje dwaas zijn). We plaatsen bij D een detector *onder* water. We gaan de *kans* bepalen dat een foton van de lichtbron bij detector D komt.

We bekijken weer alle *mogelijke wegen* voor een enkel foton. Net als in college 4 zijn alle pijltjes nagenoeg even lang, maar de richting van de pijltjes is weer verschillend. We maken een tijdgrafiek waarin we de tijd noteren die een foton nodig zou hebben om iedere *mogelijke weg* te volgen.



De tijdgrafiek lijkt erg veel op die voor het licht dat aan een spiegel reflecteert. De curve begint heel hoog, hij daalt, bereikt zijn laagste punt en hij stijgt weer. De belangrijkste bijdragen voor de resultante komen van plaatsen in de tijdgrafiek waar de pijltjes ongeveer in dezelfde richting wijzen. De nabijgelegen *mogelijke wegen* duren dan ongeveer even lang, en dat is op het laagste punt in de tijdgrafiek. Het foton heeft voor die *mogelijke wegen* het minste tijd nodig, en daarom is de kans het groots om het foton hier terug te vinden. Dit is bij benadering dezelfde weg als die de badmeester moet volgen, bij L.



Resultante van de pijltjes

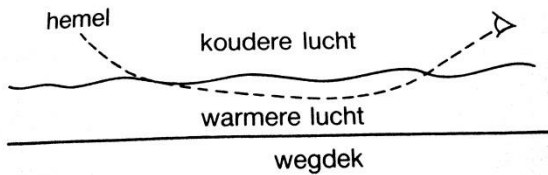
Door metingen is gebleken dat licht zich in water langzamer voortbeweegt dan in lucht. Dan is het niet zo moeilijk meer om te begrijpen en te berekenen wat de snelste weg is. En welke weg de grootste kans heeft om te worden gekozen door het foton.

Aangezien licht in ieder medium (lucht, water, glas) weer een andere snelheid heeft, treedt er altijd lichtbreking op bij de overgang van het ene medium naar het andere. Zelfs in hetzelfde medium kan lichtbreking plaatsvinden, door bijvoorbeeld warmere en koudere lagen. Dat zullen we zien in het volgende experiment waarin we een luchtspiegeling gaan volgen.

Luchtspiegeling

Als het erg warm is zie je weleens het wegdek schitteren alsof er een plas water op staat. Wat je in feite ziet is de weerkaatsing van de blauwe lucht. Het is niet vreemd dat dit aan water doet denken, want zo'n voortdurende dansende weerspiegeling kennen we bijna alleen van een plas water.

Hoe komt het dat de lucht op het wegdek weerspiegelt zonder dat er water op staat? We hebben hier te maken met gedeeltelijke reflectie aan een enkel oppervlak. Je moet hiervoor weten dat licht zich door koudere lucht langzamer voortbeweegt dan door warmere lucht. Om de luchtspiegeling te kunnen zien moet de waarnemer zich in de koudere luchtlaag bevinden, direct boven de warmere lucht pal boven het wegdek.



Een luchtspiegeling ontstaat door temperatuur-inversie

Het zal duidelijk zijn dat ook in dit geval een tijdgrafiek ontstaat zoals bij de spiegel. En ook wordt al snel zichtbaar dat de pijltjes ongeveer dezelfde kant op wijzen op het laagste punt in de grafiek. Omdat de kans dat het foton deze *mogelijke weg* volgt het grootst is, zien we een luchtspiegeling.

Bij een luchtspiegeling treedt temperatuur-inversie op, een verschijnsel waarbij grote temperatuur verschillen ontstaan tussen verschillende luchtlagen. Als er meerdere inversielagen zijn kan dit verschijnsel zich gaan gedragen als een lens. Objecten die zich ver voorbij de horizon bevinden kunnen vergroot en zichtbaar gemaakt worden. Dit is vergelijkbaar met het licht in een glasvezel. Hierbij worden over zeer grote afstand gegevens verzonden, door licht te laten reflecteren binnen een haar-dunne vezel van zeer helder glas.

Snelweg

Tot nu toe heb ik bij onze experimenten steeds een benadering gemaakt. Eenvoudigheidshalve tekende ik de *mogelijke wegen* die het licht zou volgen door een medium, zoals lucht of glas, als een rechte lijn. Het is echter niet gezegd dat licht inderdaad een rechte weg volgt. Integendeel, het basisprincipe van de quantum theorie luidt: de *kans* dat een gebeurtenis plaats vindt wordt gevonden door de pijltjes van alle *mogelijke wegen* bij elkaar op te tellen. Daarom mogen kromme wegen ook niet worden uitgesloten.

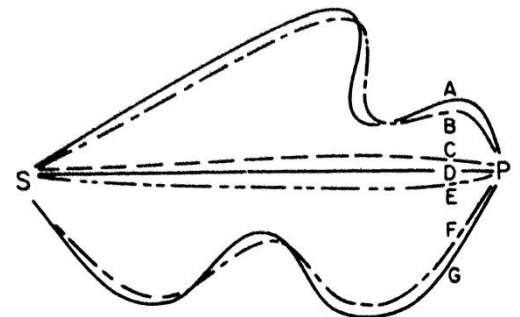
In dit experiment gaan we kijken of licht inderdaad een rechte weg volgt. We plaatsen bij S een lichtbron en bij P een detector. We bekijken elke denkbare kronkelige *mogelijke weg* die het licht zou kunnen volgen om van de lichtbron S bij detector P te komen. Vervolgens tekenen we voor elke *mogelijke weg* een pijltje. Al doende krijgen we daar flink wat ervaring in.

Elke bochtige *mogelijke weg*, zoals A, heeft een naburige *mogelijke weg* die minder bochtig en daardoor sneller is, en deze pijltjes vallen tegen elkaar weg. Als echter de *mogelijke weg* bijna recht is, zoals C, dan is een naburige *mogelijke weg* nauwelijks sneller. Daar versterken de pijltjes elkaar in plaats van tegen elkaar weg te vallen. De kans is het grootst dat de fotonen die *mogelijke weg* kiezen.

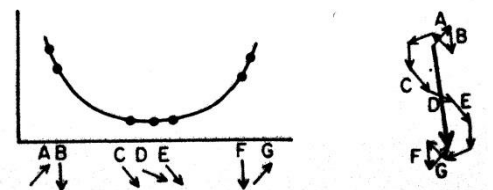
Je moet je hierbij wel realiseren dat het enkele pijltje dat de rechte *mogelijke weg* D voorstelt, in zijn eentje niet voldoende is om de *kans* aan te geven dat het foton van lichtbron S naar detector P gaat. Nabijgelegen *mogelijke wegen* zoals C en E leveren eveneens een belangrijke bijdrage.

De *kans* dat het foton een rechte *mogelijke weg* volgt is veruit het grootst. Maar de *mogelijke wegen* 'snuffelen' ook aan nabijgelegen *mogelijke wegen*, en gebruiken een kleine kern van omliggende ruimte. Een spiegel moet daarom voldoende groot zijn om normaal te kunnen reflecteren. Als de spiegel te klein is voor de kern van naburige *mogelijke wegen*, zal het licht in alle richtingen worden verstrooid, ongeacht de positie van de spiegel.

Je mag nu zelf bepalen wat de snelste *mogelijke weg* is die een foton kan volgen, terwijl je naar beneden kijkt. Plaats indien nodig aan de linkerkant een lichtbron en aan de rechterkant een detector. Vervolgens moet je van alle *mogelijke wegen* de pijltjes bepalen en de resultante berekenen. Je kunt een hierbij gebruik maken van een tijdgrafiek.



Een aantal *mogelijke wegen* van S naar P

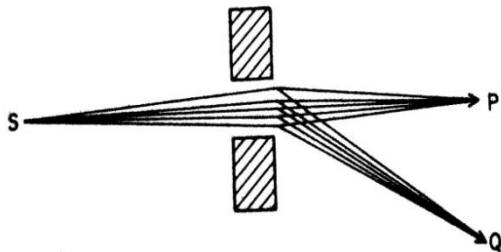


Alle bochtige *mogelijke wegen* moeten bekeken worden om de resultante te berekenen

Lichtbundel

We gebruiken allemaal weleens een zaklamp. Deze straalt een felle lichtbundel uit. Maar wat gebeurt er nu precies wanneer we het licht steeds meer gaan bundelen? Krijgen we dan een héél precies gerichte lichtstraal? Of gebeurt er weer iets vreemds?

We zetten een experiment op om de lichtbundel beter te kunnen onderzoeken. Bij S plaatsen we een lichtbron, bij P een detector en halverwege stellen we twee verplaatsbare blokken op. Deze zorgen ervoor dat het licht geconcentreerd is tot een bundel. Een tweede detector plaatsen we bij Q, direct onder P. Waarom we dit doen zal je zo meteen zien.

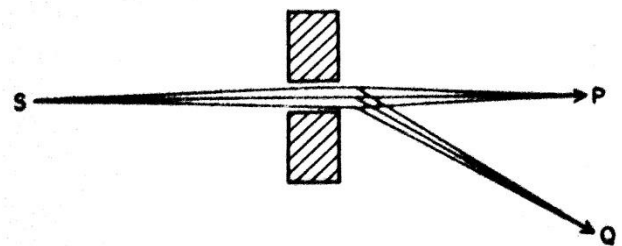


Een brede lichtbundel laat alleen detector P tikken

Eerst zetten we de blokken wat verder uit elkaar en maken we een mooie brede lichtbundel. De pijltjes van *mogelijke wegen* naar detector P tellen behoorlijk op, want alle *mogelijke wegen* naar P duren bijna even lang. Daarom begint detector P als een bezetene te tikken. De pijltjes van *mogelijke wegen* naar detector Q vallen echter tegen elkaar weg, omdat de *mogelijk wegen* duidelijk in tijd verschillen. Daarom tikt detector Q helemaal niet, zoals we zouden verwachten.

Nu gaan we een hele smalle lichtbundel te maken. We zetten de blokken steeds dichterbij elkaar, en detector P tikt steeds langzamer omdat er steeds minder fotonen op vallen. Het gaat allemaal goed, tot op een gegeven moment ook detector Q begint te tikken.

Als de kier namelijk te nauw wordt, blijven voor Q maar een paar naburige *mogelijke wegen* over. De pijltjes van *mogelijke wegen* naar Q vallen niet langer tegen elkaar weg, maar ze tellen op. Er is vrijwel geen verschil meer in tijd tussen de *mogelijke wegen* naar Q. Hoewel de resultanten in de tweede situatie bij P en Q heel klein zijn, tikt detector Q op een gegeven moment bijna even vaak als detector P.



Een smalle lichtbundel laat beide detectoren tikken

Wanneer je een gedetailleerde tijdgrafiek maakt van de eerste en tweede situatie voor detector Q, zal je zien dat de lengte van de resultante in de tweede situatie beduidend groter is. We probeerden licht samen te persen om te zorgen dat het een rechte weg volgt. Het licht weigert echter om mee te werken en het begint juist uit te waaieren.

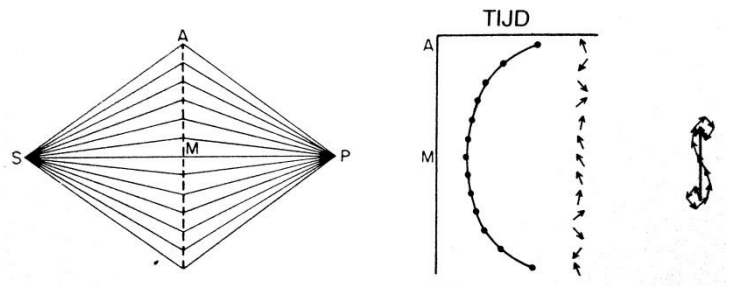
In het volgende college bekijken we hoe een vergrootglas werkt als we hier de pijltjes methode op toepassen. En we voorzien het dubbele-spleet experiment van een nieuwe invalshoek.

7. Vergrootglas

Het idee dat licht zich langs een rechte lijn voortbeweegt is dus een ruwe benadering. Voor de meeste bekende verschijnselen is die aanname echter volledig aanvaardbaar. Het is een soortgelijke benadering als de stelling dat de hoek van inval gelijk is aan de hoek van terugkaatsing.

Door gebruik te maken van een tralie, konden we licht laten reflecteren onder verschillende hoeken. Door gebruik te maken van de lucht/glas overgang kunnen we licht ook laten breken, door gebruik te maken van het verschil in snelheid. Dit gaan we nader onderzoeken met het volgende experiment. We plaatsen bij S een lichtbron en bij P een detector. We willen nu de *kans* bepalen dat een foton van de lichtbron bij de detector komt.

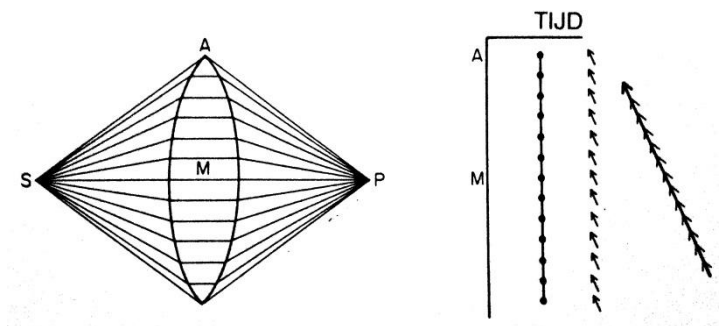
Om de kans te bepalen moeten we alle *mogelijke wegen* nalopen en de bijbehorende pijltjes optellen. Met behulp van de tijdgrafiek zien we dat dit een aanzienlijke resultante oplevert voor de rechtdoor gaande lijn door M. De kans is het grootste dat het foton rechtdoor gaat van S naar P. De pijltjes van de *mogelijke wegen* die ver van M weg liggen heffen elkaar op.



De kans is het grootst dat het foton in een rechte lijn van S naar P gaat

Maar bestaat er misschien toch een manier om de ander *mogelijke wegen* aan de resultante toe te voegen? Als we daarin zouden slagen, krijgen we een véél grotere resultante, een echte kanjer. Wat hebben we nodig om dit voor elkaar te krijgen? We wisten al dat licht door glas een stuk langzamer gaat dan door lucht. Kunnen we van deze eigenschap gebruik maken?

Wanneer we een vlakke glasplaat tussen S en P zetten verandert er maar weinig aan de pijltjes. Ze wiebelen een beetje, maar daar is ook alles mee gezegd. Maar wat gebeurt er als we de vlakke glasplaat heel precies een ronding meegeven? Zodat hij dikker is in het midden en dunner aan de uiteinden? Zou dat misschien helpen?



Alle *mogelijke wegen* worden gebruikt, met een kanjer als resultante

We plaatsen een rond geslepen stuk glas tussen lichtbron S en detector P. Om het glas te slijpen moeten we heel precies te werk gaan, waarbij aan de randen meer wordt weggeslepen. En zie, na wat proberen wijzen plotseling de pijltjes allemaal dezelfde kant op. We hebben nu een resultante die héél véél groter is dan eerst. Van dit glas hebben we een *vergrootglas* gemaakt.

Dit vergrootglas werkt uitstekend bij monochromatisch licht, licht van één kleur. Met wit licht krijgen we aan de randen echter kleurschifting. Rood, groen en blauw worden aan de randen netjes van elkaar gescheiden. Om deze kleurschifting zoveel mogelijk te beperken wordt bij veel optische systemen een heel scala aan lenzen gebruikt.

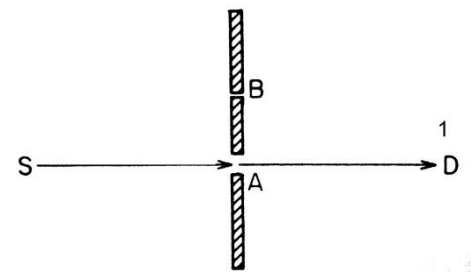
Dubbele-spleet

We gaan nu beginnen aan een heel frappant en illustratief experiment van het vreemde gedrag van licht. Dit is een veelbesproken experiment dat heel wat stof heeft doen opwaaien. Maar nu we echter de quantum theorie hebben is het een fluitje van een cent wat hier gebeurt. Daarvoor hoeven alleen maar een paar pijltjes te tekenen van de *mogelijke wegen*, de resultante te bepalen en deze te kwadrateren.

We hebben deze merkwaardige regels en buitenissige redeneringen nou eenmaal nodig om het gedrag van licht te beschrijven. Hier is geen plaats voor simpele analogieën met tandwielen of raderwerken.

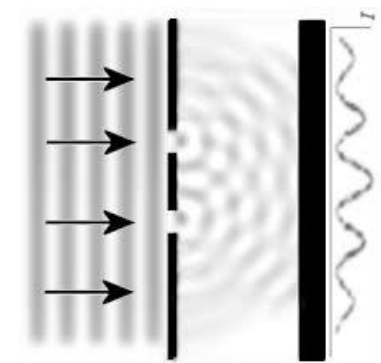
We hebben voor dit dubbele-spleet experiment een lichtbron S nodig die uiterst zwak licht van dezelfde kleur uitzendt. Bij D stellen we een detector op en we plaatsen in het midden van dit geheel drie beweegbare blokken met kiertjes ertussen. We zorgen er voor dat de onderste kier A op één lijn zit met S en D.

In de beginsituatie is kier B afgesloten. Terwijl de lichtbron fotonen gaat uitzenden begint detector D rustig tikken. Omdat de kier zo klein is, tikt detector D voor iedere 1000 fotonen bijvoorbeeld 10 keer. De *kans* dat de fotonen bij D aankomen is in dit geval dus 1%.



De kans dat het foton via A bij D komt is 1%

De situatie is vergelijkbaar met die uit het vorige college, waarin een smalle lichtbundel op een enkele kier werd gericht. Als we A afsluiten en B open zetten, verandert er daarom weinig aan het aantal tikken van de detector. De bekende regel 'licht volgt een rechte weg' verliest hierbij zijn geldigheid, en de kans dat D tikt is wederom ongeveer 1%.



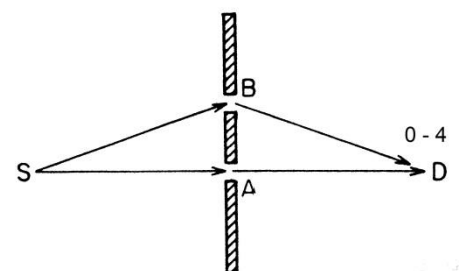
Aan de rechterkant ontstaat het interferentie-patroon

Maar wat gebeurt er wanneer we beide kieren open zetten? Je zou zeggen dat de kans dat detector D tikt, nu gelijk zou moeten zijn aan de som van de kansen per kier. In dit geval is dat 2%. Of is er iets anders aan de hand?

De kans dat de detector tikt hangt af van de afstand tussen de kieren!

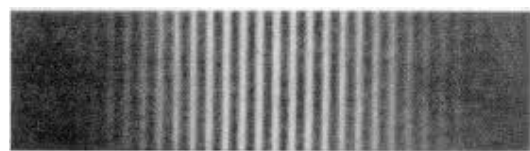
Als beide kieren openstaan ontstaat er namelijk een interferentie-patroon. Dit is een patroon met donkere gebieden, waar weinig fotonen terechtkomen, afgewisseld door lichtere gebieden, waar veel fotonen belanden. Het interferentie-patroon ontstaat echter alleen onder de voorwaarde dat de kieren klein genoeg zijn, en niet te ver uit elkaar liggen.

Bij een bepaalde afstand tussen de kieren is de kans dat detector D tikt 0%, bij een volgende afstand is de kans 4%. Bij weer andere afstanden valt de kans daar ergens tussenin. Dit is volledig te verklaren door de kans te bepalen van *mogelijke wegen* voor beide gebeurtenissen, de pijltjes te tekenen en het kwadraat van de resultante te nemen. De hele situatie doet denken aan dubbelzijdige reflectie van college 2, waarbij een vergelijkbaar effect optrad met de glasdikte.



De kans dat het foton bij D komt is 0% tot 4% door interferentie van *mogelijke wegen*

Je zou verwachten dat het openen van een tweede kier altijd een toename zou betekenen van de hoeveelheid licht die de detector bereikt, maar toch is dat niet zo. Daarom kun je niet zeggen dat licht 'een bepaalde weg volgt'. Wat je dan in feite

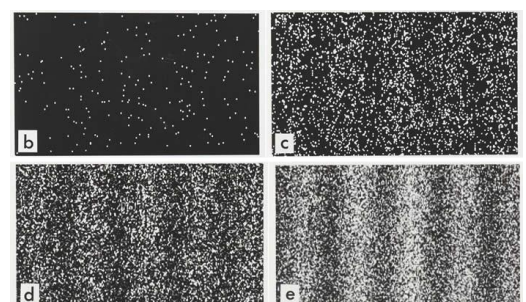


Typisch voorbeeld van een interferentie-patroon

bedoelt is dat een foton een zekere *kans* heeft om die weg te volgen. Meestal zijn er ook resultanten voor het volgen van andere *mogelijke wegen*. Als er twee *mogelijke wegen* zijn waarvan de resultanten precies tegengesteld gericht zijn is de kans zelfs erg groot dat het licht helemaal niet aankomt.

Zoals hiernaast duidelijk is te zien, ontstaat na verloop van tijd zelfs een interferentie-patroon wanneer losse fotonen één voor één op de twee kieren worden afgeschoten.

In het laatste college ga ik de *samengestelde gebeurtenis* aanpakken. Wanneer treedt de samengestelde gebeurtenis op en hoe gaan we daar mee om?



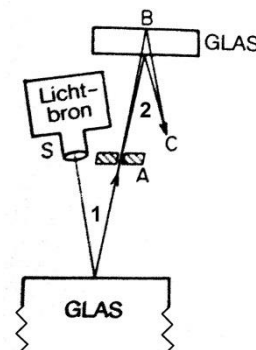
Interferentie-patroon van losse fotonen

8. Samengestelde gebeurtenis

Om je de smaak van de quantum theorie nog wat beter te laten proeven, laat ik nu zien hoe natuurkundigen de kans op een *samengestelde gebeurtenis* bepalen. Het gaat daarbij om gebeurtenissen die het resultaat zijn van een reeks afzonderlijke stappen, óf die uit een aantal deelgebeurtenissen bestaan die geheel onafhankelijk van elkaar plaatsvinden.

Een kleine variatie op ons eerste experiment dient als voorbeeld voor een *samengestelde gebeurtenis*. Voor dit experiment werden fotonen gedeeltelijk gereflecteerd door een glasoppervlak. In dit experiment zetten we bij A in plaats van een detector, een scherm met een gat waar de fotonen doorheen gaan. Vervolgens plaatsen we bij B een glasplaat en bij C de detector. Hoe groot is nu de kans dat een foton detector C raakt? Een dergelijke gebeurtenis bestaat uit twee stappen.

1. Een foton gaat van de lichtbron naar A, met reflectie aan het glasoppervlak
2. Een foton gaat van A naar detector C, met reflectie aan glasplaat B

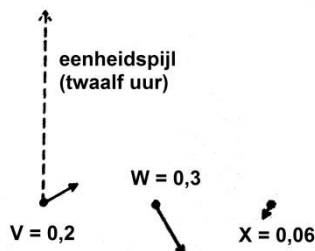


Twee gebeurtenissen voor gedeeltelijke reflectie aan een glasoppervlak

Beide stappen hebben een pijltje. Het pijltje van de eerste stap heeft de bekende lengte 0,2 en is gedraaid over een bepaalde hoek. Bijvoorbeeld als twee uur volgens de wijzers van een twaalf-uurs klok. Om het pijltje voor de tweede stap te bepalen, zetten we de lichtbron bij A en richten de fotonen op de glasplaat erboven. Het pijltje heeft bijvoorbeeld de lengte 0,3 en is naar vijf uur gedraaid. Regel vier van QED: bij een samengestelde gebeurtenis moeten de pijltjes met elkaar worden *vermenigvuldigd*, om de resultante te bepalen.

Pijltjes vermenigvuldigen

Hoe vermenigvuldigen we twee pijltjes met elkaar? Stel, we hebben een pijltje V met een lengte 0,2 en een richting van twee uur, volgens de twaalf-uurs klok. Een tweede pijltje W heeft een lengte 0,3 en een richting van 5 uur.



Om het product van V en W te bepalen moeten we de lengtes met elkaar vermenigvuldigen, en de richtingen bij elkaar optellen. Dus 0,2 maal 0,3 levert voor de lengte 0,06 op. Twee uur plus vijf uur geeft voor de richting een totaal van zeven uur. In welke volgorde we vermenigvuldigen maakt niets uit, ook niet als er meerdere pijltjes zijn.

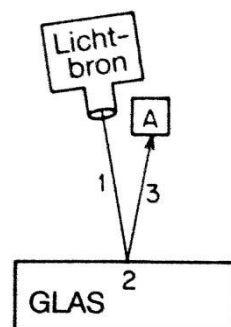
De vermenigvuldiging is eigenlijk een reductie van de eenheidspijl gevolgd door een draaiing. De eenheidspijl heeft de lengte 1 en wijst recht omhoog.

Wanneer we V en W met elkaar vermenigvuldigen krijgen we een resultante met de lengte 0,06 en een richting van zeven uur. Kwadrateren van de lengte levert 0,0036 op. Dan is dus de *kans* dat deze *samengestelde gebeurtenis* plaats vindt gelijk aan 0,36%.

Met dit nieuwe concept van opeenvolgende stappen duidelijk in beeld, bekijken we nogmaals gedeeltelijke reflectie aan *twee* oppervlakken. Hoe groot is eigenlijk de *kans* dat een foton van de lichtbron naar detector A gaat? Blijft die gelijk of niet? Daartoe ontleden we eerst de reflectie aan de *voorkant* van de glasplaat.

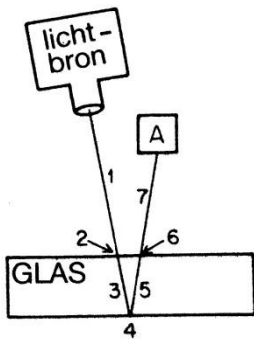
De *samengestelde gebeurtenis* bestaat nu uit drie opeenvolgende stappen:

1. Geen reductie, maar wel een draaiing van de stopwatch, bijvoorbeeld naar vijf uur
2. Reductie van 0,2 en een draaiing naar zes uur, volgens regel drie van QED
3. Geen reductie, en een draaiing naar bijvoorbeeld vier uur



Drie gebeurtenissen voor gedeeltelijke reflectie aan de voorkant

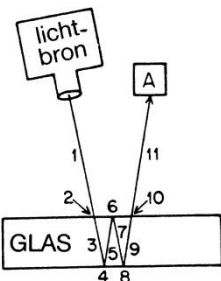
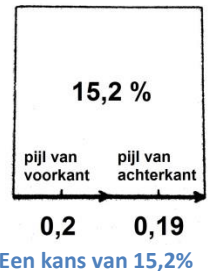
Vermenigvuldiging van de pijltjes levert een resultante op voor deze *samengestelde gebeurtenis*, met een lengte van 0,2 en een richting van drie uur.



Zeven gebeurtenissen voor gedeeltelijke reflectie aan de achterkant

* Want $0,98 \times 0,98 = 0,96$ en $0,2 \times 0,2 = 0,04$; tel je dit op dan krijg je $0,96 + 0,04 = 1,00$, oftewel 100%

Vermenigvuldiging levert een resultante op voor deze *samengestelde gebeurtenis*, met een lengte van ongeveer 0,19 en een richting van drie uur. We willen echter de *kans* bepalen dat een foton bij detector A aankomt, ongeacht hoe deze reflecteert. Hiervoor tellen we de resultanten voor reflectie aan de voorkant en de achterkant bij elkaar op. Dit geeft een nieuwe resultante met een lengte van 0,39 en na kwadrateren een *kans* van 15,2%.



Driedubbele reflectie

We hebben echter nog niet alle *mogelijke wegen* bekeken. Het foton kan namelijk ook twee keer reflecteren aan de achterkant en één keer aan de voorkant. Of drie keer aan de achterkant en twee keer aan de voorkant. Het zal duidelijk zijn dat we zo heel lang door kunnen gaan. De lengte van de pijltjes wordt echter in rap tempo steeds kleiner, zodat ze nagenoeg niets meer bijdragen aan de resultante.

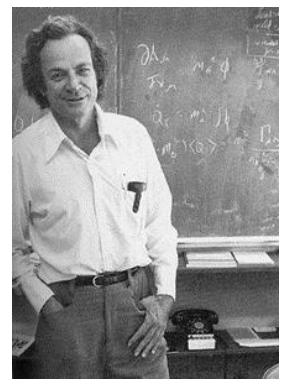
In het tweede college hebben we voor de eenvoud niet elke manier bekeken waarop licht aan glas kan reflecteren. Om te vermijden dat een zeer groot aantal kleine pijltjes opgeteld moest worden deed ik alsof licht een rechte lijn volgde, zonder dat het uitwaaierde. In werkelijkheid verspreid licht zich wel degelijk. Wanneer we echter alleen het punt op het glas beschouwen waar de bron op gericht is, betekend dit uitwaaiëren dat het pijltje net iets korter wordt.

Afsluiting

Ik heb de voorbeelden in deze colleges gekozen om te laten zien, hoe de vreemde theorie van de quantum elektrodynamica, zonder causaliteit, zonder herkenbare mechanismen en zonder analogieën, alle bekende optische verschijnselen correct reproduceert. Licht weerkaatst tegen een spiegel, het wordt gebroken als het van lucht naar water gaat en kan worden gebundeld met een lens. De theorie is succesvol gebleken bij het verklaren van alles wat met licht te maken heeft.

De voorbeelden hebben laten zien hoe de *kans* bepaald kan worden dat een foton van een lichtbron bij een detector komt, door het optellen of vermenigvuldigen van de pijltjes van alle *mogelijke wegen*, en het kwadrateren van de resultante. Ik heb het echter niet gehad over hoe een hologram werkt. Of een laser of de buiging van licht rond een schaduw. Er valt dus nog genoeg te vertellen over licht.

De theorie van quantum elektrodynamica werkt al vele jaren uitstekend, en er zijn veel praktische toepassingen mee ontwikkeld. Tot er iemand met een betere theorie op de proppen komt blijft de theorie van quantum elektrodynamica van kracht.



Richard Feynman