



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Quantum entanglement in polarization and space

Lee, Peter Sing Kin

### Citation

Lee, P. S. K. (2006, October 5). *Quantum entanglement in polarization and space*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4585>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4585>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

---

## Samenvatting

---

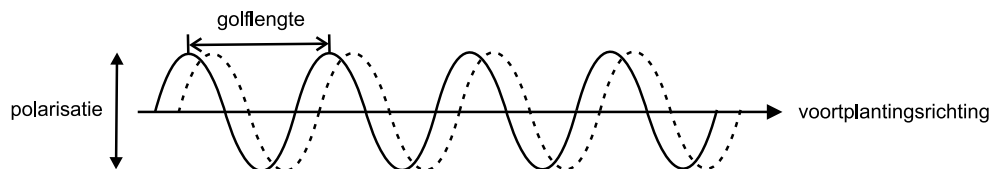
*In deze samenvatting wordt uitgelegd wat lichtgolven en lichtdeeltjes zijn, en welke aspecten van de quantummechanica onder de verstrengeling van licht schuilen. Het specifieke onderzoek naar lichtverstrengeling in polarisatie en de ruimtelijke vrijheidsgraad, dat beschreven staat in dit proefschrift, wordt nader toegelicht.*

## Lichtgolven of lichtdeeltjes?

In het dagelijkse leven kunnen we licht vaak opvatten als een golfverschijnsel. Een lichtgolf bestaat uit een elektrisch en een magnetisch veld, die elk hetzelfde golvende karakter vertonen. Een lichtgolf wordt daarom ook wel een elektromagnetische golf genoemd. Enkele kenmerken van een lichtgolf zijn de voortplantingsrichting, de golflengte en de polarisatie. In figuur 1 is (het elektrische veld van) een lichtgolf op twee tijdstippen weergegeven met de drie genoemde eigenschappen. De natuurkundige beschrijving van licht als een golfverschijnsel is de golfoptica.

De golflengte is de afstand tussen twee opeenvolgende golftoppen. In het geval van 'zichtbaar licht', dat hier voor het gemak 'licht' wordt genoemd, bepaalt de golflengte de kleur van het licht. Blauw licht heeft de kleinste golflengte van ongeveer 400 nm (nm = nanometer = een miljardste van een meter). Rood licht heeft de grootste golflengte van ongeveer 750 nm. Zonlicht is 'wit' omdat het alle kleuren bevat. De welbekende regenboog is hiervan het sprekende bewijs. Het witte zonlicht wordt door de regendruppels ingevangen waarbij elke kleur via een afzonderlijke richting de druppels verlaat. Hierdoor worden alle kleuren gescheiden en ontstaat het regenboog-effect. Andere elektromagnetische golven ('onzichtbaar' licht) hebben een veel kleinere of veel grotere golflengte dan die van licht. De golflengte van bijvoorbeeld röntgenstraling is zo'n 10.000 maal kleiner, terwijl de golflengte van radiosignalen miljoenen malen groter is, variërend van enkele meters tot vele kilometers.

De polarisatie is de richting waarin het elektrische veld van het licht op en neer golft. In figuur 1 is een mogelijke polarisatie aangegeven. Een andere polarisatie is de polarisatie loodrecht hierop, welke in dezelfde figuur correspondeert met een elektrisch veld dat als het ware in en uit het papier golft. Zonlicht bezit alle mogelijke polarisaties en wordt daarom *ongepolariseerd* licht genoemd. Door gebruik te maken van zogenaamde polariserende materialen kan ongepolariseerd licht omgezet worden in *gepolariseerd* licht, dat nog een enkele polarisatie heeft. Dit gebeurt onder andere bij polaroid zonnebrillen.



**Figuur 1:** Het elektrische veld van een lichtgolf op een zeker tijdstip en even later (gestippeld).

Hierboven hebben we licht beschouwd als een golfverschijnsel. Onder bepaalde omstandigheden laat licht zich echter beter beschrijven als afzonderlijke lichtdeeltjes die ook wel *fotonen* worden genoemd. Een foton is als het ware een energiepakketje; de hoeveelheid energie van een foton wordt alleen bepaald door de golflengte van het licht. Hierbij geldt dat hoe kleiner de golflengte van het licht, des te groter de energie van het foton. 'Blauwe' fotonen bezitten dus meer energie dan 'rode' fotonen. De natuurkundige theorie die onder andere het gedrag van fotonen verklaart, is de *quantummechanica*. Verder beschrijft de quantummechanica het gedrag van natuurkundige objecten zoals atomen en moleculen. Dergelijke quantumobjecten zijn de bouwstenen van alle materie om ons heen.

## Quantummechanica

### Quantumsuperpositie

De toestand van een klassiek object op een willekeurig tijdstip kan worden gegeven door zijn positie en snelheid op dat tijdstip. We beschouwen een blokje dat wrijvingsloos van een helling afschuift. Het blokje zal zich in de loop van de tijd steeds lager op de helling bevinden en zodoende voortdurend een andere positie innemen. Daarnaast zal de snelheid van het blokje geleidelijk toenemen als gevolg van de zwaartekrachtsversnelling en elk tijdstip een andere waarde hebben. Echter, de wetten van de klassieke mechanica leggen het blokje *op een willekeurig tijdstip een welbepaalde* toestand op, die gegeven wordt door een positie en een snelheid.

In de quantummechanica is deze toestandsbeschrijving niet meer geldig. Een quantumobject kan zich op een willekeurig tijdstip in meerdere toestanden bevinden. Het object bevindt zich dan in een zogenaamde *superpositie van toestanden*. Als het hiervoor genoemde blokje quantummechanisch zou zijn geweest, kon het zich op één tijdstip zowel bovenaan de helling bevinden met een lage snelheid als onderaan de helling met een grote snelheid. Dit idee van superpositie is in de alledaagse wereld nauwelijks voor te stellen, maar is essentieel om de verstrengeling van fotonen te verklaren.

Voor de analogie met de klassieke toestand hebben we aangenomen dat ook de toestand van een quantumobject, al dan niet in een superpositie, gegeven kan worden door een combinatie van een welbepaalde positie en snelheid van het quantumobject. Echter, volgens de quantummechanica kunnen de positie en de snelheid van een object nooit *tegelijktijd met 100% zekerheid* worden bepaald. Wanneer de positie heel precies wordt gemeten, zal de gemeten snelheid een grote onzekerheid vertonen, en andersom. Voor de toestand van ons quantummechanische blokje is het correcter om voor de combinatie van positie en snelheid een combinatie van *positiespreiding* en *snelheidspreiding* te lezen.

### Waarnemen in de quantummechanica

Wanneer we de toestand van een klassiek object willen weten, kunnen we een waarneming doen door een meting aan het object uit te voeren. In het geval van het blokje kunnen we een meetlint langs de helling plakken en een snelheidsmeter op het blokje plaatsen. Door op een bepaald tijdstip met een camera een foto van het systeem te maken, kunnen we uit de gemaakte foto zowel de positie als de snelheid van het blokje, en daarmee de toestand van het blokje *op dat ene tijdstip* bepalen. Het zal ons niet verbazen dat het blokje op dat ene tijdstip wederom dezelfde positie en snelheid zou hebben gehad als we de foto *niet* hadden gemaakt. Met andere woorden, de waarneming in de vorm van een meting heeft geen enkele invloed op de toestand van een klassiek object.

In de quantummechanica heeft een waarneming juist wel drastische gevolgen voor de toestand van een natuurkundig systeem. Wanneer ons blokje een quantumobject zou zijn geweest en *niet* wordt geobserveerd, door bijvoorbeeld geen fotometing te doen, zou het blokje zich in de eerder genoemde superpositie-toestand kunnen verkeren: het blokje neemt *op één tijdstip* twee of meerdere posities in en heeft twee of meerdere snelheden. Deze toestand verandert echter als we *wel* een fotometing zouden uitvoeren. Het blokje blijkt zich

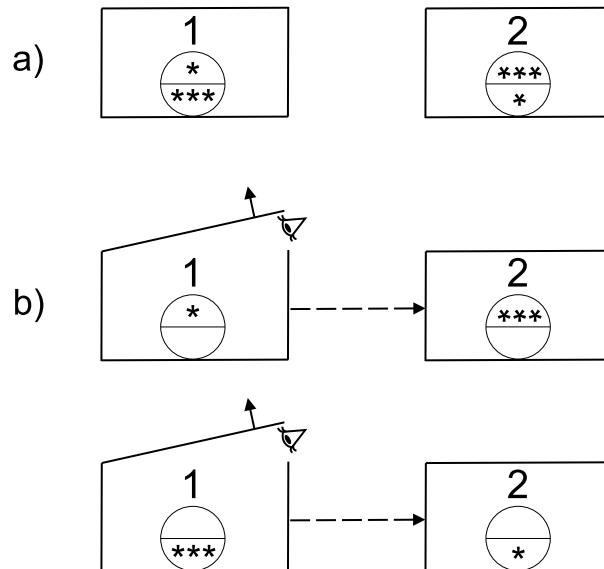
dan bijvoorbeeld ergens onderaan de helling te bevinden en een grote snelheid te bezitten. De fotometing dwingt het blokje dus een bepaalde toestand te kiezen. In het algemeen geldt dat een meting aan een quantummechanisch systeem de superpositie-toestand in een van de mogelijke deeltoestanden wordt 'geprojecteerd'. Dit wordt het *projectiepostulaat* van de quantummechanica genoemd.

## Quantumverstremgeling

We beschouwen nu een systeem bestaande uit *twee* quantumobjecten. Voor het gemak nemen we twee tafeltennisballen die in werkelijkheid klassieke objecten zijn. De tafeltennisballen kunnen elk van lage en hoge kwaliteit zijn die we respectievelijk aanduiden met één ster en drie sterren. We doen de ballen ieder afzonderlijk in een afgedekte doos zodat ze gescheiden en niet waarneembaar zijn. Laten we zeggen dat dit quantummechanische tweeballensysteem zich nu in de volgende superpositie-toestand bevindt [zie figuur 2(a)]: met een kans van 50% heeft bal 1 de 1-sterkwaliteit en bal 2 de 3-sterrenkwaliteit, maar *tegelijktijd* en *met dezelfde kans* geldt ook het omgekeerde (bal 1 van 3-sterrenkwaliteit en bal 2 van 1-sterkwaliteit). Zolang we beide dozen dichthouden en de ballen niet kunnen zien, blijft het systeem in deze superpositie-toestand verkeren en is de individuele kwaliteit van beide ballen volledig onbepaald. Door nu bijvoorbeeld doos 1 te openen en bal 1 waar te nemen, zal het systeem vanwege het projectiepostulaat onmiddellijk zijn superpositie verliezen en in een van de twee mogelijke toestanden vervallen [zie figuur 2(b)]. Zien we de 1-sterkwaliteit voor bal 1, dan weten we *onmiddellijk* en *met 100% zekerheid* dat bal 2 van 3-sterrenkwaliteit is zonder doos 2 te openen! Zien we daarentegen de 3-sterrenkwaliteit voor bal 1, dan was bal 2 automatisch van 1-sterkwaliteit geweest. Het bizarre van dit experiment is dat de kwaliteit van bal 2 bepaald kan worden zonder ook maar enige invloed op deze bal uit te oefenen. Immers, beide ballen zijn strict gescheiden. Dit voorbeeld laat zien dat twee *willekeurig ver van elkaar verwijderde* quantumobjecten de mogelijkheid hebben om zich als één object voor te doen. Deze relatie noemen we de *verstremgeling* van quantumobjecten.

Uiteraard hebben we klassieke tafeltennisballen alleen maar gebruikt om quantumverstremgeling te illustreren, en zullen ze in werkelijkheid niet snel verstremgeld zijn. Fotonen zijn quantumobjecten en kunnen daardoor wel in een verstremgelde toestand verkeren. In het bovenstaande voorbeeld zouden twee verstremgelde fotonen de rol van de twee tafeltennisballen innemen en correspondeert de balkkwaliteit met een bepaalde eigenschap van de fotonen. Door deze eigenschap aan een van de twee fotonen te meten, weten we onmiddellijk wat de uitkomst voor het andere foton is, *zónder* iets te doen met dit laatste foton en ongeacht de afstand tussen beide fotonen.

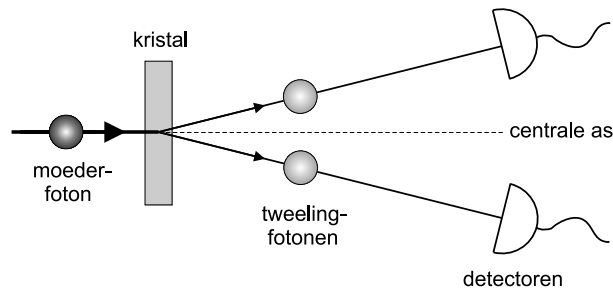
Het onderzoek dat gepresenteerd wordt in dit proefschrift gaat zoals eerder gezegd over lichtverstremgeling. Ook elders op de wereld wordt wetenschappelijk onderzoek verricht om dit natuurkundig verschijnsel beter te begrijpen. Zo is onder andere verstremgeling van fotonen aangetoond die tientallen kilometers van elkaar verwijderd zijn. Het ultieme doel van het onderzoek naar verstremgeling is het ontwikkelen van een *quantumcomputer* die vele malen sneller zou kunnen rekenen dan de huidige computers, en onder andere uitermate geschikt is voor het kraken van codes (cryptografie).



**Figuur 2:** (a) Twee zogenaamd quantummechanische tafeltennisballen bevinden zich ieder in een afgedekte doos en in de volgende superpositie-toestand: bal 1 is van 1-sterkwaliteit en bal 2 van 3-sterrenkwaliteit (bovenste balhelften), maar tegelijkertijd en even waarschijnlijk is bal 1 van 3-sterrenkwaliteit en bal 2 van 1-sterkwaliteit (onderste balhelften). De individuele kwaliteit van beide ballen is dus volledig onbepaald. (b) Door nu in doos 1 te kijken verdwijnt de superpositie en is bal 1 onmiddellijk van 1-ster- of van 3-sterrenkwaliteit. Zónder doos 2 te openen zal bal 2 dan respectievelijk van 3-sterren- of van 1-sterkwaliteit zijn, alsof het in directe verbinding (gestippelde pijl) staat met bal 1. Deze relatie wordt verstrengeling genoemd.

## Het maken van verstrengelde fotonen

Verstrengelde fotonen worden doorgaans in een speciaal kristal (een glazig plaatje) gemaakt, waar een ‘moederfoton’ wordt gesplitst in twee identieke ‘dochterfotonen’. De dochterfotonen vormen als het ware een tweelingpaar: het waarnemen van een van de twee fotonen geeft direct uitsluitsel over het karakter van het andere foton, ook al zijn beide fotonen gescheiden. Verstrengelde fotonen worden daarom ook wel *tweelingfotonen* genoemd. Het genoemde splitsingsproces, dat *spontaneous parametric down-conversion* wordt genoemd, is in figuur 3 weergegeven en wordt in hoofdstuk 2 beschreven. Aangezien er geen energie verloren mag gaan in dit proces is de energie van elk tweelingfoton precies de helft van die van het moederfoton. In de praktijk wordt vaak een blauwe bundel van moederfotonen gesplitst in twee rode bundels die elk een van de bijbehorende tweelingfotonen bevat. We kunnen in beide bundels een fotondetector plaatsen die ‘klikt’ zodra er een tweelingfoton op valt. Wanneer beide detectoren *tegelijk* klikken, weten we dat we een fotonpaar ‘gezien’ hebben en lichtverstrengeling kunnen meten. De geproduceerde tweelingfotonen zijn tegelijkertijd in drie opzichten met elkaar verstrengeld. We bespreken hieronder deze drie mogelijke vormen van lichtverstrengeling in polarisatie, tijd en ruimte.



**Figuur 3:** Twee verstrengelde fotonen worden als een tweelingpaar uit een moederfoton gemaakt. Beide fotonen bevinden zich even ver van het kristal en hun locaties zijn elkaars spiegelbeeld ten opzichte van de centrale as. Hoewel de tweelingfotonen gescheiden zijn, legt een waarneming van één foton onmiddellijk het karakter van het andere foton vast. Deze verstrengeling kan worden gemeten door in beide paden een detector te plaatsen.

De individuele polarisatie van de geproduceerde tweelingfotonen neemt alle mogelijke richtingen aan en is zodoende volledig onbepaald. Echter, meten we een willekeurige polarisatie voor een van de tweelingfotonen, dan staat onmiddellijk vast dat het andere tweelingfoton de polarisatie *loodrecht* op deze gemeten polarisatie bezit, zonder ook maar iets te doen met dit laatste foton. We spreken dan over *polarisatieverstrengeling* van fotonen. Aangezien de polarisatie van licht eenvoudig te manipuleren is (met onder andere polariserende elementen) geniet deze vorm van lichtverstrengeling de meeste populariteit in het wetenschappelijk onderzoek.

De twee verstrengelde fotonen worden *op hetzelfde moment* in het kristal aangemaakt en zullen op een willekeurig tijdstip na hun geboorte *dezelfde* afstand vanaf het kristal hebben afgelegd (zie figuur 3). Door in een van de twee bundels een foton te detecteren op een zekere afstand van het kristal, weten we zeker dat zijn partner in de andere bundel zich op dezelfde afstand van het kristal bevindt. Aangezien deze afstand gekoppeld is aan de verstreken tijd na de geboorte van het fotonpaar, noemen we deze vorm van verstrengeling ook wel *tijdsverstrengeling* van fotonen.

Tweelingfotonen worden niet alleen op hetzelfde moment maar ook *op dezelfde dwarspositie* in het kristal aangemaakt. Hiermee bedoelen we de positie in de richting loodrecht op de invallende bundel van moederfotonen, ofwel loodrecht op de centrale as (zie figuur 3). Het meten van een zekere dwarspositie van een foton in één van de uittredende bundels legt onmiddellijk de dwarspositie van zijn partner in de andere bundel vast. Deze laatste positie is namelijk het spiegelbeeld van de gemeten positie ten opzichte van de centrale as. We spreken hier over de verstrengeling van fotonen in hun dwarspositie, ofwel *ruimtelijke verstrengeling* van licht.

## Dit proefschrift

Het onderzoek in dit proefschrift omvat zowel de polarisatie- als de ruimtelijke verstrengeling van licht. In hoofdstuk 3 wordt een nieuwe methode gepresenteerd om de dikte en de snijhoek

van het genererende kristal heel nauwkeurig te bepalen. De invloed van de kristaldikte op het aantal geproduceerde polarisatieverstrengelde fotonen wordt in hoofdstuk 4 behandeld. We hebben aangetoond dat onder bepaalde omstandigheden deze productie omgekeerd evenredig is met de kristaldikte: een 0.25 millimeter dik kristal levert gek genoeg vier keer zoveel fotonparen op als een 1 millimeter dik kristal.

In hoofdstuk 5 worden twee experimenten beschreven waarin de gemeten sterktes van polarisatieverstrengeling met elkaar worden vergeleken. In het eerste experiment wordt in een van de bundels een metalen gatenrooster (met gaten kleiner dan de golflengte) geplaatst. In het tweede experiment worden de fotonen vóór het gatenrooster afzonderlijk 'uit elkaar getrokken' door hun polarisatie te ontbinden, en worden ze ná het gatenrooster op omgekeerde wijze weer 'hersteld'. Hoewel deze laatste situatie identiek lijkt aan die van het eerste experiment, meten we verrassend genoeg een aantoonbaar zwakkere polarisatieverstrengeling. Dit kan worden verklaard door de voortplanting van bepaalde golven over het oppervlak van het metalen gatenrooster.

In hoofdstuk 6 wordt het effect van het ruimtelijke karakter van de moederbundel op de ruimtelijke karakter van de twee dochterbundels bestudeerd. Verder wordt onderzocht welke gevolgen dit heeft voor de sterkte van de polarisatieverstrengeling. In hoofdstuk 7 wordt aangetoond dat de gemeten sterkte van de polarisatieverstrengeling sterk afhangt van de wijze waarop de tweelingfotonen gedetecteerd worden.

In het experiment dat in hoofdstuk 8 beschreven is, hebben beide tweelingfotonen de mogelijkheid om twee verschillende paden te volgen. We onderzoeken of we op grond van de gemeten dwarspositie van één foton kunnen beslissen welk pad het andere foton heeft gevolgd. Het antwoord op deze vraag blijkt af te hangen van de symmetrie van de meetopstelling. Hoofdstuk 9 behandelt een soortgelijk experiment waarin één van de bundels om zijn eigen as wordt gedraaid. Ook hier bepaalt de symmetrie van de meetopstelling of de sterkte van de ruimtelijke verstrengeling afneemt met de hoeveelheid verdraaiing. Tevens hebben we met dit experiment de grootte van de ruimtelijke structuur van het verstrengelde licht kunnen vaststellen.



Samenvatting