



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Spatial Coherence and Entanglement of Light

Di Lorenzo Pires, H.

Citation

Di Lorenzo Pires, H. (2011, September 13). *Spatial Coherence and Entanglement of Light. Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/17830>

Version: Not Applicable (or Unknown)
License: [Leiden University Non-exclusive license](#)
Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/17830>

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

Samenvatting

Licht kan klassiek beschreven worden als een elektromagnetische golf. Op het meest fundamentele niveau beschrijven natuurkundigen licht echter als fotonen; de fundamentele deeltjes of quanta van licht. In dit proefschrift onderzoeken wij een aantal ruimtelijke eigenschappen van fotonen. We gebruiken hiervoor een lichtveld dat bestaat uit fotonparen die gecorreleerd zijn op een manier die niet op een klassieke wijze beschreven kan worden. Enkele vragen die wij behandelen zijn: Hoe zijn deze fotonparen ruimtelijk verdeeld? Hoe planten zij zich voort? Kunnen we verifiëren dat de correlaties inderdaad quantumcorrelaties zijn?

Het meeste werk in dit proefschrift is experimenteel. Om de essentie van de bestudeerde fenomenen volledig te kunnen doorgronden hebben we ook nieuwe theoretische methoden ontwikkeld. Onze belangrijkste motivatie is het verkrijgen van nieuwe inzichten in de aard van quantumgecorrleerde fotonen, die zouden kunnen worden toegepast in het snel ontwikkelende veld van de quantuminformatie.

In deze samenvatting beschrijven wij onze belangrijkste resultaten en de natuurkunde die aan deze experimenten ten grondslag ligt. Dit is gestructureerd rond de vier hoofdthema's van dit proefschrift.

Ruimtelijke coherentie (Hoofdstuk 1)

Veel belangrijke experimenten in de optica gaan over de interferentie van licht. Wanneer bijvoorbeeld een laserstraal door nauwe spleetjes gaat, kan een interferentiepatroon waargenomen worden op een scherm achter de spleetjes. Interferentie treedt alleen op wanneer de oscillaties van de lichtgolven bij de spleten perfect gesynchroniseerd zijn. Een lichtstraal met deze eigenschap heet compleet coherent.

In het dagelijks leven kun je interferentie-effecten van licht echter zelden waarnemen. Wanneer je een object belicht met een laser, kun je scherpe maxima en minima in de intensiteit zien van de doorgaande of de gereflecteerde bundel. Wanneer je ditzelfde experiment herhaalt met een (monochromatische) 'normale' lichtbron, zoals een LED-lamp, dan zal de intensiteit van de doorgaande of gereflecteerde bundel over het algemeen uniform zijn of slechts geleidelijk variërend. De reden hiervoor is dat normale lichtbronnen, in tegenstelling

tot laserstralen, incoherent zijn. Het veld op verschillende punten in de ruimte oscilleert willekeurig zodat interferentie-effecten snel worden uitgemiddeld en niet geobserveerd kunnen worden.

Volledig coherent licht kan interferentiepatronen produceren met zeer hoog contrast, terwijl compleet incoherent licht helemaal geen interferentie geeft. Dit zijn de twee extreme gevallen, maar de meeste velden zijn in de praktijk gedeeltelijk coherent, wat betekent dat ze wat interferentie kunnen produceren; de mate waarin ze dit doen hangt af van hun coherentie.

Hoofdstuk 1 introduceert formeel het concept van ruimtelijke coherentie en beschrijft enkele wiskundige middelen die nodig zijn voor de volgende hoofdstukken. Het concept van ruimtelijke coherentie wordt daarna uitgebreid naar het quantumdomein en hogere-orde-correlatiefuncties worden geïntroduceerd. Op quantumniveau kan licht beschreven worden in termen van fotonen. Hoofdstuk 1 leidt ook de volgende hoofdstukken in die vooral gaan over de quantumeigenschappen van fotonen.

Quantumverstrengeling (Hoofdstukken 2-5)

Eén van de meest bizarre vooronderstellingen van de quantumtheorie, iets wat filosofen en natuurkundigen al lang fascineert, is het bestaan van toestanden waarbij de geobserveerde realiteit beïnvloed wordt door het waarnemen ervan. Een voorbeeld hiervan is de beroemde Schrödinger paradox over een kat in een gesloten doos. In dit gedachte-experiment bevindt de kat zich in een superpositie toestand, waarin hij tegelijkertijd dood en levend is, totdat we de doos openen en erin kijken. Op dit moment moet de realiteit ineensorten tot één mogelijk resultaat en wordt het lot van de arme kat bepaald.

Beschouw nu een systeem met twee quantumdeeltjes. Onder sommige omstandigheden kan het gebeuren dat, door de realiteit van het eerste deeltje waar te nemen, de realiteit van het andere deeltje ogenblikkelijk kan worden bepaald; onafhankelijk van waar het is. Deze eigenschap, die verstrengeling heet, is de voornaamste reden dat Einstein en anderen een afkeer hadden voor de quantummechanica. Het is namelijk in tegenspraak met filosofische principes van realisme en plaats. Gelukkig kan deze bijna magische verbinding tussen twee objecten nu relatief gemakkelijk worden gerealiseerd in laboratoria.

In de meeste van onze experimenten wekken we fotonparen op die quantum verstrengeld zijn in hun ruimtelijke vrijheidsgraden. Dit gebeurt door de interactie van een laserstraal met een optisch niet-lineair kristal, in een proces dat bekend staat als “spontaneous parametric down conversion (SPDC)”.

Hoofdstukken 2 en 3 gaan over de ruimtelijke eigenschappen van verstrengelde fotonparen. We verkennen een gebied dat bekend staat als het nabije veld. Dit vlak correspondeert met de afbeelding van het kristal en kan gemakkelijk worden bereikt met een enkele lens. Wij meten de gecombineerde posities van foton 1 en foton 2 met twee fototellers. Het ruimtelijk profiel van deze zogenaamde “coincidence count” staat ons toe om de golf functie van de fotonparen te recon-

strueren. De resultaten laten vele interessante en tot dusver onbekende ruimtelijke correlaties zien. Hierbij zien we ruimtelijke “antibunching” van licht, een extreme lokalisering van fotonparen en ruimtelijke correlaties die lijken op Bessel stralen in voortplanting. Wij vergelijken onze waarnemingen met bekende fenomenen in de klassieke optica, zoals tweede harmonische generatie en fase-singulariteiten.

Hoofdstuk 4 verkent de grens tussen de klassieke- en quantumbeschrijving van het twee-fotonveld. De meeste experimenten met “spontaneous parametric down conversion” hebben zich gericht op de quantumcorrelaties tussen de twee opgewekte fotonen. Dit hoofdstuk beschrijft echter de klassieke eigenschappen van het veld. We gebruiken een sterk gefocusseerde laserstraal om fotonparen op te wekken en we nemen de intensiteitspatronen op met een gewone CCD camera. Wanneer de laserstraal sterk gefocusseerd is, zijn de gemeten correlaties bijna klassiek.

Er zijn veel theorieën die wiskundige formules geven om de hoeveelheid verstrengeling te kwantificeren die geassocieerd is met de positie van fotonparen. De formules worden meestal op een vrij abstracte manier afgeleid en daadwerkelijke berekeningen zijn moeilijk en tijdrovend. **Hoofdstuk 5** presenteert een gebruiksformule van één van de belangrijkste verstrengelingsuitdrukkingen, het Schmidt getal. In tegenstelling tot wat meestal wordt aangenomen, laten we zien dat dit getal experimenteel redelijk eenvoudig kan worden geschat. Om dit te doen verkennen we de overeenkomst tussen de wiskunde van verstrengeling en de wiskunde van klassieke optica.

Baan draaiimpuls (Hoofdstukken 6-8)

Natuurkundigen weten al lang dat licht een aantal eigenschappen heeft die normaal gesproken worden geassocieerd met deeltjes. Een lichtstraal kan bijvoorbeeld een lineair impuls en een draaiimpuls hebben. De draaiimpuls kan geassocieerd worden met “rotaties”. Zoals een planeet die in een baan rond een ster loopt en daarnaast ook rond zijn eigen as draait, zo kan de draaiimpuls van licht onderverdeeld worden in baan- en spincomponenten. De spin van licht wordt geassocieerd met circulaire polarisatie, terwijl de baancomponent gerelateerd is aan een vortex fase structuur van het elektromagnetische veld.

Tegenwoordig is bekend dat deze draaiimpuls een eigenschap is van de fotonen. De draaiimpuls kan niet alle waarden aannemen, maar is een veelvoud van een geheel getal ℓ maal de constante van Planck $\hbar$. Fotonische toestanden met een draaiimpuls zijn belangrijk omdat quantuminformatie gecodeerd kan worden in de index ℓ van de fotonen.

De fotonen die wij opwekken via SPDC zijn ook verstrengeld in de baan draaiimpuls (ofwel “orbital angular momentum” OAM). Als we één foton meten met een OAM gelijk aan $\ell\hbar$, dan heeft het andere foton een OAM van $-\ell\hbar$. De waarschijnlijkheid P_ℓ om $(\ell, -\ell)$ paren te vinden hangt echter af van het getal ℓ .

In **Hoofdstuk 6** laten we zien hoe deze correlaties experimenteel kunnen worden gemeten. We ontwikkelen en demonstreren een interferometrische techniek om de verdeling van P_ℓ te meten; deze verdeling geeft een volledig beeld van de ruimtelijke verstrengeling. Bovendien laten we zien hoe we op een efficiënte manier het aantal gegenereerde toestanden kunnen aanpassen en vergroten.

Hoofdstuk 7 gaat over de verdeling van de draaiimpuls van losse fotonen in plaats van fotonparen. Klassieke lichtbronnen, zoals een LED-lamp, kunnen ook fotonen opwekken met een draaiimpuls. Over het algemeen is het deel fotonen met negatieve en positieve OAM praktisch hetzelfde, zodat de totale OAM-inhoud van de lichtbron nul is. In dit hoofdstuk onderzoeken wij experimenteel hoe groot precies het deel fotonen is met OAM gelijk aan $\ell\hbar$. We laten ook zien hoe deze verdeling veranderd kan worden.

De totale baan draaiimpuls inhoud van een lichtbundel kan veranderd worden met zogeheten spiraalfaseplaten. Deze platen veranderen de fasestructuur van het veld en kunnen daardoor de OAM vergroten of verkleinen. In de meeste experimenten met spiraalfaseplaten worden volledig coherente (laser)bundels gebruikt. In **Hoofdstuk 8** presenteren we echter een diepgaand experimenteel onderzoek naar het effect van een spiraalfaseplaat op gedeeltelijk coherente bundels. Wanneer we gedeeltelijk coherent licht door een spiralen faseplaat schijnen, dan zal het veld correlatiesingulariteiten vertonen, die alleen waargenomen kunnen worden door het veld met zichzelf te laten interfereren. We laten metingen zien van de coherentiefunctie voor velden met coherentiesingulariteiten.

Verstrooiing (Hoofdstuk 9)

Wanneer compleet coherent licht, zoals laserlicht, wordt geschenen door of gereflecteerd door een ongeordend medium (zoals melk, witte verf, of diffusor), ontstaat er een gespikkeld intensiteitspatroon van lichte en donkere vlekjes. In dit patroon zit informatie over de coherentie-eigenschappen van de straling en over de microscopische details van het verstrooiende object. Voor veel soorten wanorde kunnen statistische argumenten worden gebruikt om nuttige informatie uit te halen.

Wanneer verstrengelde fotonen door een ongeordend medium worden verstrooid, ontstaat er een gespikkeld patroon in de posities van beide fotonen gecombineerd. **Hoofdstuk 9** beschrijft het experimentele onderzoek naar de statistiek van deze twee-foton patronen, die gemeten worden met twee detectoren. In dit laatste hoofdstuk worden de meeste fenomenen uit de eerdere hoofdstukken in eenzelfde context samengevoegd. We tonen aan hoe de ruimtelijke verstrengeling de twee-fotonvlekjes een rijkere structuur geeft en we bespreken de opmerkelijke verschillen tussen de patronen van een sterk verstrengelde toestand en een niet-verstrengelde toestand. Een interessant verband tussen ruimtelijke coherentie, ruimtelijke verstrengeling en spikkelstatistiek biedt een nieuwe manier om het aantal verstrengelde toestanden te meten (het Schmidt getal).