



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Smoothly breaking unitarity : studying spontaneous collapse using two entangled, tuneable, coherent amplifiers

Reep, T.H.A. van der

Citation

Reep, T. H. A. van der. (2019, June 13). *Smoothly breaking unitarity : studying spontaneous collapse using two entangled, tuneable, coherent amplifiers*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/73911>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/73911>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/73911> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Reep T.H.A. van der

Title: Smoothly breaking unitarity : studying spontaneous collapse using two entangled, tuneable, coherent amplifiers

Issue Date: 2019-06-13

Samenvatting

In de zogenaamde Kopenhaagse interpretatie van de kwantummechanica wordt een duidelijk onderscheid gemaakt tussen de macroscopische en de microscopische wereld. De eerste is de wereld zoals wij mensen haar kennen en wordt beschreven door de klassieke mechanica. De tweede is de wereld van elementaire deeltjes, atomen en moleculen of kleine verzamelingen daarvan, en wordt beschreven met kwantummechanica.

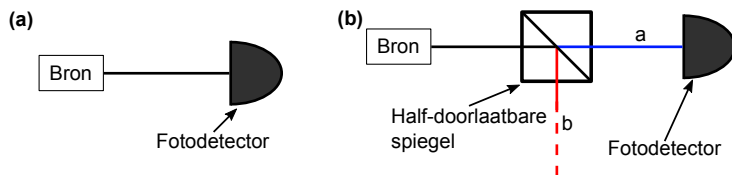
Deze twee beschrijvingen geven een totaal ander beeld van de fysische werkelijkheid. Waar de klassieke mechanica deterministisch is en de evolutie van systemen geheel kan worden beschreven met gebruik van de wetten van Newton, wordt – in ieder geval vanuit menselijk oogpunt – de kwantummechanica geregeerd door kansen. Dat, terwijl de kwantummechanica op zich ook geheel deterministisch is en de evolutie van systemen volledig kan worden beschreven door de (unitaire) Schrödingervergelijking.

Het moge duidelijk zijn dat het wringt op het raakvlak tussen de klassieke mechanica en kwantummechanica: beide theorieën zijn inherent deterministisch, maar toch lijkt het vanuit menselijk perspectief alsof de kwantummechanica probabilistisch is. Het raakvlak tussen beide theorieën is het duidelijkst te illustreren aan de hand van het concept “meting”. Stel, men neme een bron van individuele fotonen (lichtdeeltjes) en laat de uittredende fotonen op een fotodetector vallen, zoals weergegeven in figuur 1a. Dan moge het niet verrassend zijn dat de fotodetector een “klikje” geeft, elke keer als er een foton wordt uitgezonden door de bron en ontvangen door de detector.

Echter, zetten we nu een half-doorlaatbare spiegel in het pad tussen de bron en de detector, zoals in figuur 1b, dan geraakt het foton in een superpositie die als volgt beschreven kan worden,

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_a |0\rangle_b + |0\rangle_a |1\rangle_b). \quad (1)$$

In deze vergelijking zijn a en b de uitgangsarmanen van de half-doorlaatbare spiegel. $|1\rangle_a |0\rangle_b$ geeft weer dat het foton in arm a zit, terwijl arm b geen foton bevat. Het omgekeerde geldt voor de term $|0\rangle_a |1\rangle_b$. Tenslotte geeft de factor



Figuur 1: Schematische weergave van een experiment om het kwantummeetprobleem toe te lichten. (a) Wanneer een bron van individuele fotonen gericht wordt op een fotodetector, produceert de detector een “klikje” voor ieder ontvangen foton. (b) Indien er een half-doorlaatbare spiegel tussen bron en detector wordt geplaatst zou men op basis van de unitariteit van de Schrödingervergelijking voorspellen dat de detector een superpositie aanneemt van een “klikje” en een “geen-klikje”. Dit wordt echter nooit waargenomen.

$1/\sqrt{2}$ in de vergelijking aan dat de kans om het foton te meten in elk van de armen gelijk is aan $1/2$.

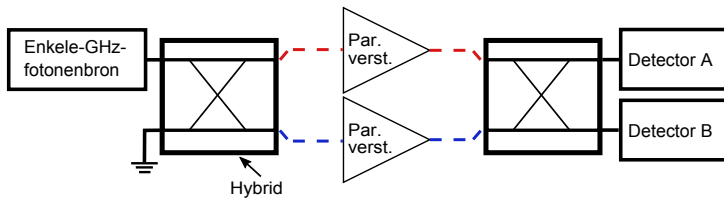
De deterministische Schrödingervergelijking zou nu voorspellen dat de detector – laten we aannemen dat deze 100% efficiënt is, hetgeen betekent dat voor ieder binnenkomend foton precies één klikje geproduceerd wordt – een superpositie zou moeten aannemen van een klikje (het foton is gedetecteerd) en een “geen-klikje” (het foton is niet gedetecteerd). Bij metingen aan kwantumsystemen wordt zo’n superpositie echter nooit waargenomen. In plaats daarvan zal de detector óf klikken óf niet-klikken – met andere woorden: de meting aan het systeem laat de toestand van het systeem instorten naar één van de mogelijke uitkomsten. Het feit dat dit proces niet door de Schrödingervergelijking beschreven wordt, wordt het kwantummeetprobleem genoemd.

Er zijn verschillende interpretaties van het kwantummeetprobleem. Hoewel ze alle totaal verschillend zijn, zijn ze het eens over het volgende: “grote” systemen gedragen zich klassiek, terwijl “kleine” systemen kwantummechanisch gedrag kunnen vertonen. Wat de woorden “groot” (macroscopisch) en “klein” (microscopisch) hier precies betekenen is niet duidelijk, maar men is het erover eens dat een meetinstrument “groot” is (immers, een meetinstrument zoals de fotodetector uit de vorige paragraaf zal altijd een enkele meetuitkomst geven). Echter, hierdoor kan men zich even goed afvragen wat precies een “meting” is.

In dit proefschrift stellen we een experiment voor dat deze vraag misschien kan beantwoorden. Specifieker, we vragen ons af of een elektronische microgolfferversterker een kwantumtoestand zal laten instorten. Immers, in meetinstrumenten zoals fotodetectoren is dikwijls een versterkingsmechanisme ingebouwd. Het heeft verschillende voordelen om een elektronische versterker te gebruiken. Ten eerste, aangezien men vermoedt dat massa sterk bijdraagt aan de “grootte” van een systeem, wordt door middel van een elektronische versterker direct massa toegevoegd aan het experiment. Deze massa komt van de elektronen die zich als stromen door de versterker bewegen. Ten tweede staat het ons vrij om supergeleiding toe te passen, welke een sterke ont koppeling van de omgeving

garanderen in het microgolffregime en bij zeer lage temperaturen – een van de vereisten voor succesvolle kwantumexperimenten. Verder eisen we van de versterker dat deze weinig ruis genereert en een aanpasbare versterkingsfactor heeft.

Aan al deze voorwaarden kan worden voldaan door de zogenaamde microgolf parametrische versterkers. Deze versterkers werken op hetzelfde principe als waarop schommels werken. Op een schommel beweegt men zijn benen om de schommel een grotere schommelamplitude te geven. Wat er hier gebeurt is dat men door het bewegen van zijn benen voortdurend zijn zwaartepunt (de parameter) wat verplaatst. Door deze verplaatsing raken de beweging van de benen (grote amplitude) en schommel (kleine amplitude) gekoppeld, waardoor er bewegingsenergie van de benen naar de schommel gepompt wordt.



Figuur 2: Schematische weergave van het in dit proefschrift voorgestelde experiment. Individuele microgolffotonen worden door middel van een hybrid (microgolf-analoog van een half-doorlaatbare spiegel) in een toestand van superpositie gebracht, zoals beschreven in vergelijking (1). Deze toestand wordt versterkt door twee parametrische versterkers. Vervolgens kan, door gebruik te maken van een tweede hybrid, de interferentie van de uitgangssignalen van beide versterkers bestudeerd worden met behulp van detectoren A en B.

Het idee is nu om twee van deze parametrische versterkers toe te voegen aan elk van beide armen van een interferometer, zie figuur 2. Deze interferometer wordt gevormd door twee half-doorlaatbare spiegels (*hybrids* genoemd binnen de microgolftechnologie), waarvan de ingangskanalen van de laatste spiegel gekoppeld zijn aan de uitgangskanalen van de eerste spiegel. Als we deze interferometer nu voeden met één enkel microgolffoton ontstaat er achter de eerste half-doorlaatbare spiegel een superpositie, zoals weergegeven in vergelijking (1). Deze kwantumtoestand wordt versterkt door beide versterkers en middels de tweede half-doorlaatbare spiegel kunnen we de kwantuminterferentie van de uitgangssignalen van de versterkers in de beide interferometerarmen bestuderen. De hoop is dat deze interferentie ons zal vertellen of de toestand zich in de interferometer volgens de wetten van de kwantummechanica heeft gedragen, of dat er een instorting van de golf functie heeft plaatsgehad, doordat de versterkers fungeren als detectoren.

Dit proefschrift beschrijft de eerste stappen naar het voorgestelde experiment. Na een algemene inleiding, bespreken we in hoofdstuk 2 enkele belangrijke elementen van de microgolftechnologie die van belang zijn voor het verdere prof-

schrift. In dit licht behandelen we transmissielijnen en microgolfresonatoren. Verder ontwikkelen we in dit hoofdstuk een theorie om de eigenschappen van een transmissielijn te bepalen die aangesloten is op een netwerk van transmissielijnen met een verschillende karakteristieke impedantie. Deze theorie stoelt op microgolfreflecties, ontstaan door het verschil in karakteristieke impedantie. Echter, ook microgolfcomponenten die qua specificatie gelijk zijn in impedantie aan het netwerk kunnen nog kleine reflecties veroorzaken. In hoofdstuk 2 illustreren we op basis hiervan hoe de fysieke lengte van deze componenten verkregen kan worden.

In hoofdstuk 3 wordt de theorie die parametrische versterkers beschrijft besproken, in het bijzonder die van lopende-golf parametrische versterkers gebaseerd op Josephson juncties. Deze juncties kunnen beschreven worden als een stroomafhankelijke inductie, waardoor stromen bij verschillende frequenties gekoppeld worden, analoog aan de koppeling die plaatsvindt bij het schommelen. In dit hoofdstuk wordt in eerste instantie de benodigde terminologie geïntroduceerd, waarna de klassieke theorie kort aan bod komt. Dan leiden we een kwantumtheorie af voor de versterkers met speciale aandacht voor de verschillende aannamen die gedaan worden. Dit resulteert in een Hamiltoniaan op basis waarvan we de klassieke theorie nogmaals afleiden en we bespreken de verschillen tussen beide aanpakken. Tenslotte besteden we in dit hoofdstuk aandacht aan de geldigheid van de theorie.

Het proefschrift wordt vervolgd door berekeningen aan het voorgestelde experiment in hoofdstuk 4. Door middel van analytische en numerieke methoden bepalen we de verwachte zichtbaarheid van het interferentiepatroon voor het geval de versterkers zich gedragen volgens de kwantummechanica. We tonen aan dat deze zichtbaarheid niet verdwijnt als functie van de versterking en ook niet wanneer er verliezen aan het model worden toegevoegd. Dan bespreken we twee gevallen waarop het instorten van de kwantumtoestand in de interferometer zich zou kunnen manifesteren. Hieruit volgt dat we, in het geval dat de toestand instort naar een exact aantal fotonen (een aantallentoestand), mogen verwachten dat de interferentiezichtbaarheid verdwijnt. Als we er echter vanuit gaan dat de toestand instort naar een (klassieke) sinusoïde (een coherente toestand), dan verdwijnt de interferentiezichtbaarheid niet, maar zal hij zich toch anders gedragen dan de unitaire kwantummechanica voorspelt. Het hoofdstuk wordt afgesloten met enkele opmerkingen over de uitvoerbaarheid en uitvoering van het experiment.

Tenslotte, in hoofdstuk 5, bespreken we onze experimentele voortgang op het gebied van lopende-golf parametrische versterkers. We gaan in op het ontwerpen van dergelijke versterkers en op de fabricage ervan. In het bijzonder lichten we de fabricage van de Josephson juncties toe, waarvoor we twee eigen ontwerpen introduceren. We tonen aan dat het ene ontwerp geschikter is voor de fabricage van versterkers dan het andere. Ook lichten we de fabricage van “lage” luchtbruggen toe – het andere noodzakelijke element in ons versterkerontwerp. Na deze cruciale onderwerpen bespreken we de meetopstelling en de metingen aan een preparaat. We bepalen de transmissielijnparameters (in het bijzonder

de kritieke stroom van de juncties en de effectieve hoogte van de luchtbruggen) en meten aan het niet-lineaire gedrag van het preparaat in aanwezigheid van microgolflreflecties. Tenslotte bepalen we de versterking die het preparaat verschaft en vinden dat deze kan oplopen tot ongeveer 10 dB.

