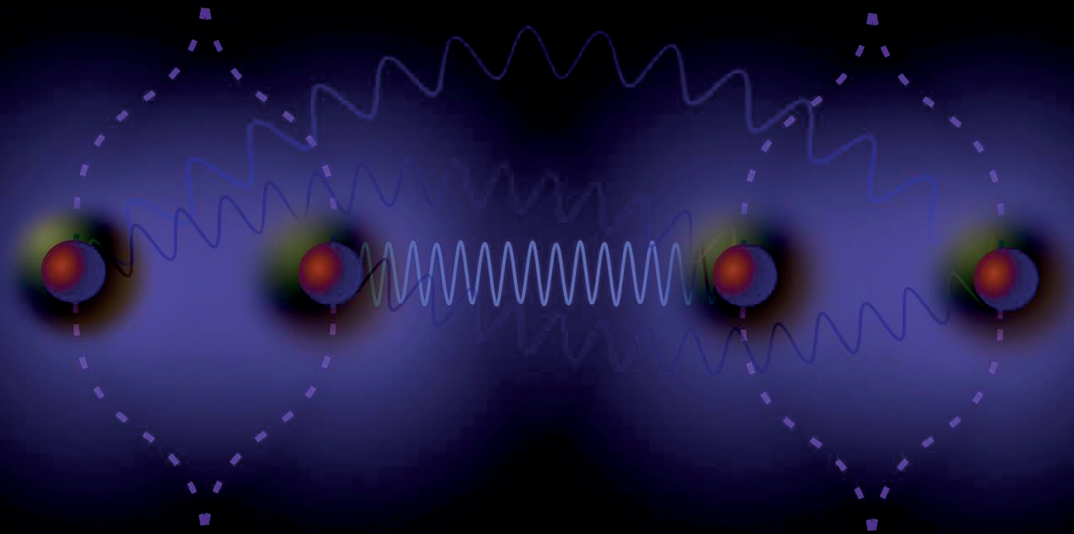
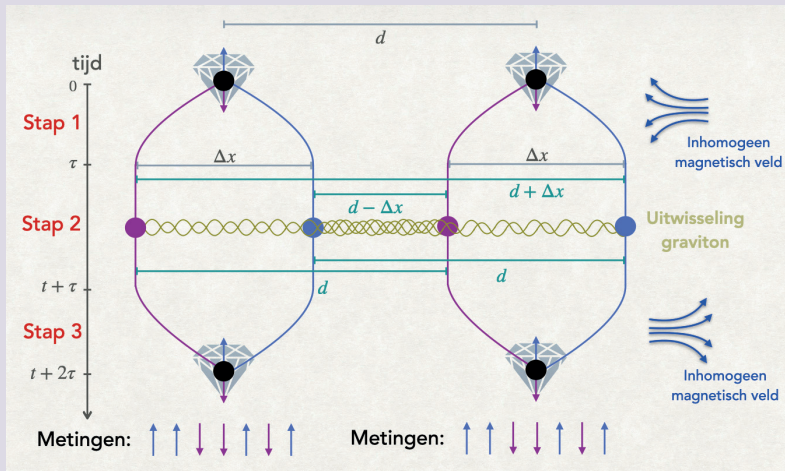


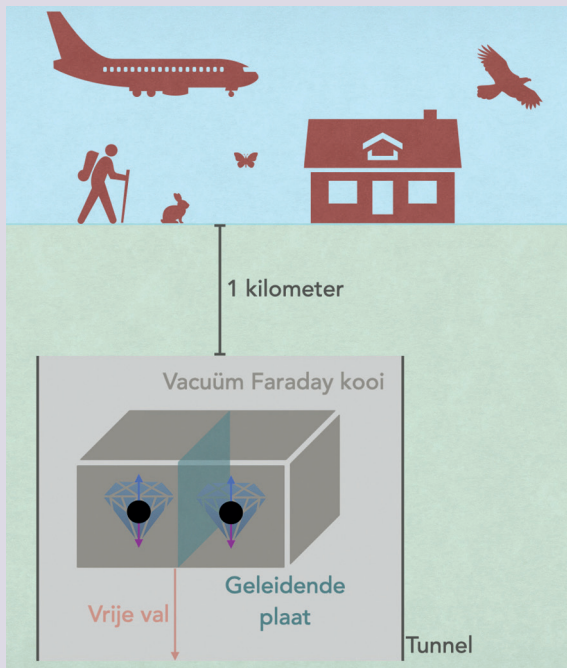
Op weg naar de eerste observatie van het graviton



In het standaardmodel van de deeltjesfysica worden drie van de vier fundamentele krachten toegeschreven aan het uitwisselen van bijbehorende krachtvoerende quantumdeeltjes. Voor de laatste fundamentele kracht, de zwaartekracht, is ook een bijbehorend quantumdeeltje gepostuleerd: het graviton. Maar in tegenstelling tot de andere drie krachten is het bestaan hiervan niet experimenteel bewezen. De lezer wordt meegenomen naar een mogelijke eerste observatie van het graviton: door middel van het waarnemen van correlaties tussen testdeeltjes komt experimenteel bewijs van een quantumzwaartekrachttheorie in zicht.



Figuur 1. Schematische weergave van het QGEM-protocol. Beginnend met twee kristallen op een afstand d van elkaar, met een ingebedde spinsuperpositie van de toestanden omhoog (\uparrow) en omlaag (\downarrow), wordt er een inhomogeen magnetisch veld aangezet (stap 1). Deze creëert een ruimtelijke superpositie met grootte Δx . Voor een bepaalde tijd t is er zwaartekrachtinteractie (uitwisseling van een graviton) tussen de toestanden (stap 2). Deze is invers afhankelijk van de afstanden tussen de toestanden die gegeven worden door d , $d + \Delta x$ en $d - \Delta x$. Vervolgens wordt een omgekeerd inhomogeen magnetisch veld aangezet en worden de ruimtelijke superposities gecombineerd tot spinsuperposities (stap 3). Herhaalde spinmetingen kunnen een correlatie aantonen.



Figuur 2. Voorbeelden van verschillende maatregelen om de testsystemen te isoleren van andere krachten dan de zwaartekracht en het experiment te beschermen tegen invloeden van buitenaf. Door een geleidende plaat tussen de testdeeltjes te plaatsen wordt de Casimirkracht onderdrukt. Het experiment ondergronds uitvoeren zorgt ervoor dat er geen beïnvloeding is door zwaartekrafteffecten van andere objecten. Daarnaast kunnen we de deeltjes in een vacuüm Faraday-kooi onderbrengen waardoor ze minder last hebben van straling en er zo min mogelijk luchtdeeltjes zijn die tegen de testdeeltjes botsen.

Moet alles quantum?

Om te begrijpen hoe belangrijk de observatie van het graviton zou zijn, is eerst enige achtergrondinformatie nodig. Einstein ontwikkelde honderd jaar geleden de algemene relativiteitstheorie, die sindsdien grondig getest is en goed functioneert als een geometrische beschrijving van de zwaartekracht. Dus waarom zijn we überhaupt geïnteresseerd in een quantumzwaartekrachttheorie? In eerste instantie kwam dit idee naar boven omdat de andere drie fundamentele krachten werken door middel van experimenteel geobserveerde krachtvoerende deeltjes. Dat zou dus ook voor de zwaartekracht kunnen gelden. Daarnaast werkt Einsteins zwaartekrachttheorie niet perfect op de quantschaal. Dit is bijvoorbeeld te zien wanneer we kijken naar zwarte gaten of naar de periode kort na het begin van de oerknal. Voornamelijk binnen deze vakgebieden is het kwantiseren van zwaartekracht een veelgebruikte methode. Echter, het bestaan van een redelijke theorie voor quantumzwaartekracht is nog geen feit en gemodificeerde klassieke zwaartekrachttheorieën kunnen eerder genoemde problemen ook oplossen (met klassiek bedoel ik een theorie die geen krachtvoerend quantumdeeltje heeft). Het is dus nog een open vraag of zwaartekracht quantummechanisch of klassiek is. Een observatie van het graviton zou doorslaggevend zijn in dit debat. Maar hoe observeren we een graviton?

Gravitondetectie

Het waarnemen van een graviton is niet zo eenvoudig als het waarnemen van de andere krachtvoerende deeltjes. Vergeleken met de andere fundamentele krachten is de zwaartekracht namelijk enorm zwak. Dat betekent dat de productie van gravitonen in deeltjesversnellers of het meten van gravitonen vanuit de ruimte, zoals voor de ontdekking van andere quantumdeeltjes nuttig was, (nog) niet mogelijk is [1]. Er zijn initiatieven om via zwaartekrachtgolven te zoeken naar kenmerken

van het graviton, maar daarvoor zou de gevoeligheid van de huidige detectoren eerst vele malen vergroot moeten worden [1]. In 2017 werd een experimenteel protocol gepubliceerd dat quantumzwaartekracht op een nieuwe manier test [2,3]. Dit protocol is gebaseerd op een oud idee van Richard Feynman (1957), namelijk dat het graviton bepaalde effecten heeft op quantumdeeltjes. Dankzij die effecten, gerelateerd aan quantumverstreming, komt het meten van het graviton een stuk dichterbij in zicht.

Verstreming

Verstreming (*entanglement* in het Engels) is een fenomeen dat alleen op het quantumniveau voorkomt, waarbij deeltjes niet onafhankelijk van elkaar beschreven kunnen worden. Quantumdeeltjes kunnen zich in meerdere toestanden tegelijk bevinden (het superpositieprincipe). Een meting van de toestand geeft één van de mogelijke uitkomsten. Bij verstremde deeltjes is er een correlatie tussen de toestanden van twee deeltjes. Dit geldt ook voor deeltjes op grote afstand van elkaar; verstreming is daarom een niet-lokaal fenomeen. Een voorbeeld van verstremde deeltjes is de spintoestand van elektronen. Een elektron kan geprepareerd worden in een superpositie van twee tegenovergestelde spintoestanden die we omhoog en omlaag noemen. Als twee verstremde elektronen in deze superpositie gemeten worden, is er een correlatie tussen metingen van spin omhoog/omlaag bij het ene elektron, en spin omhoog/omlaag van het tweede elektron. Herhaalde metingen kunnen zo'n correlatie tussen de spintoestanden aantonen. Maar hoe raken deeltjes verstremd? Verstreming is iets wat expliciet niet kan worden bereikt door lokale operaties op de deeltjes of door klassieke communicatie tussen de deeltjes, dit is het LOCC principe (LOCC staat voor *local operations and classical communication*) [4]. Dit betekent dat twee deeltjes die in eerste instantie niet verstremd zijn, alleen verstremd kunnen raken als gevolg van quantumcommunicatie tussen de deeltjes (in tegenstelling tot klassieke communicatie). Een voorbeeld van quantumcom-

“Dankzij aan quantumverstreming gerelateerde effecten komt het meten van het graviton een stuk dichterbij in zicht.”

municatie is het uitwisselen van het gepostuleerde graviton. Het meten van verstreming tussen twee deeltjes die alleen via zwaartekracht op elkaar inwerken, zou dus indirect bewijs zijn van het bestaan van het graviton. Dit idee, verstreming-gebaseerde detectie van quantumzwaartekracht, werd omschreven in het QGEM (*quantum-gravity-generated entanglement of masses*) protocol [2] dat is geïllustreerd in figuur 1. Het bestaat uit drie stappen.

Stap 1: preparatie

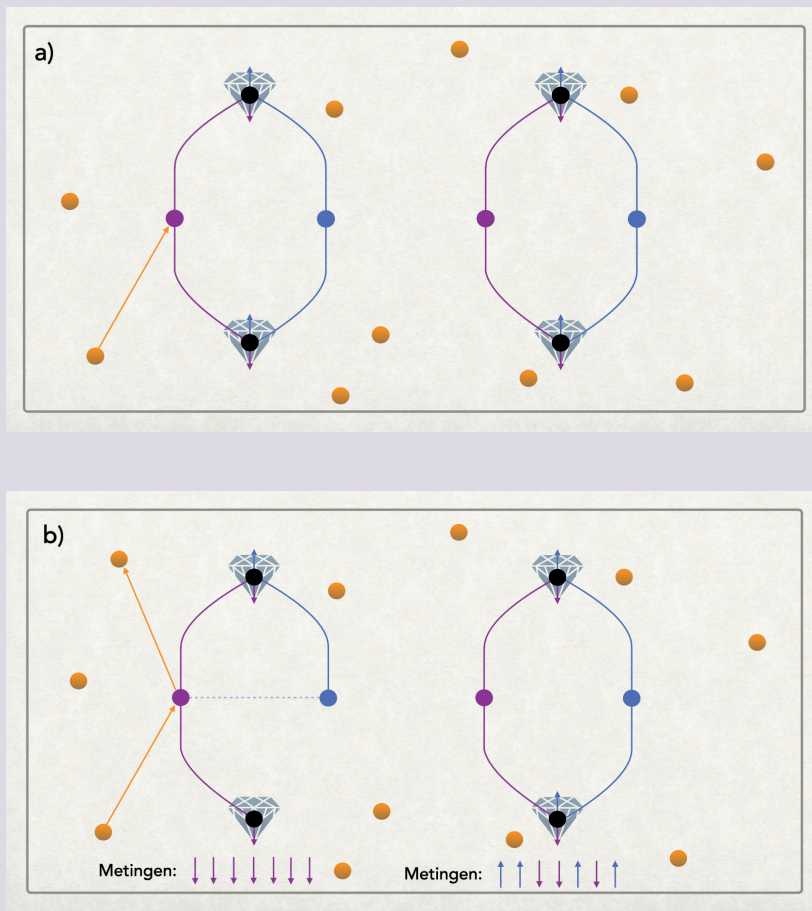
We nemen twee testdeeltjes in een superpositie van de omhoog en omlaag spintoestanden. Dit is bijvoorbeeld mogelijk in het stikstof-geïnduceerde gat (NV-center) in diamant, waar een superpositie met vrij zware deeltjes kan worden gecreëerd. Het is belangrijk om superposities van zware deeltjes te creëren omdat de zwaartekracht evenredig is met de massa's van de deeltjes. Vervolgens zetten we tijdelijk een inhomogeen magnetisch veld aan. Hoe een deeltje zich beweegt in dit magnetisch veld is afhankelijk van de spintoestand: de twee toestanden bewegen op een tegenovergestelde manier (het Stern-Gerlach-effect). Hierdoor creëren we een ruimtelijke superpositie, wat betekent dat de testdeeltjes in een superpositie van twee posities zijn die afhankelijk is van de spintoestand.

Stap 2: laat de zwaartekracht zijn werk doen

Aangenomen dat de testdeeltjes alleen via hun massa's wisselwerken, werkt alleen zwaartekracht tussen de testdeeltjes. In het geval van quantumzwaartekracht zou deze interactie moeten



Martine Schut studeerde natuurkunde aan de RUG, waarvan een half jaar aan de Universiteit van Calgary in Canada. In 2020 begon ze aan een multidisciplinair promotieonderzoek in natuurkunde en wiskunde aan de RUG. Haar promotieonderzoek gaat over het meten van quantumzwaartekracht via verstreming, specifiek over het in kaart brengen van omgevingseffecten. Daarnaast is ze geïnteresseerd in de connectie tussen knopentheorie en verstreming en zet ze zich graag in voor het populariseren van wetenschap. martine.schut@rug.nl



Figuur 3. Voorstelling van hoe een systeem coherentie verliest door botsingen met luchtmoleculen. a) Een omgevingsdeeltje botst op de superpositie. b) De staat van het gebotste deeltje hangt af van de superpositietoestand waarop het botste. Door veel van dit soort botsingen vervalt de superpositie voor de waarnemer tot een deeltje met een vaste spin en positie, dit is het volledige verlies van coherentie. Hierdoor is verstrengeling niet meer meetbaar door de waarnemer.

plaatsvinden door de uitwisseling van een graviton. In de niet-relativistische limiet van de quantumtheorie schaalt deze interactie omgekeerd evenredig met de afstand tussen de toestanden. In de ruimtelijke superpositie die we hebben gecreëerd is hierdoor het effect van zwaartekrachtinteractie verschillend voor de twee positietoestanden, en is deze ook afhankelijk van de positietoestand van het andere testdeeltje. Als gevolg hiervan kunnen de deeltjes niet meer onafhankelijk worden beschreven: ze zijn verstrengeld geraakt door de quantumzwaartekrachtinteractie. Dit is onafhankelijk van het model waarmee de interactie wordt beschreven; zolang zwaartekracht quantummechanisch is zal er verstrengeling plaatsvinden. Een klassieke zwaartekrachttheorie is ook omgekeerd evenredig met de afstand

maar kan geen verstrengeling veroorzaken volgens het eerdergenoemde LOCC-principe.

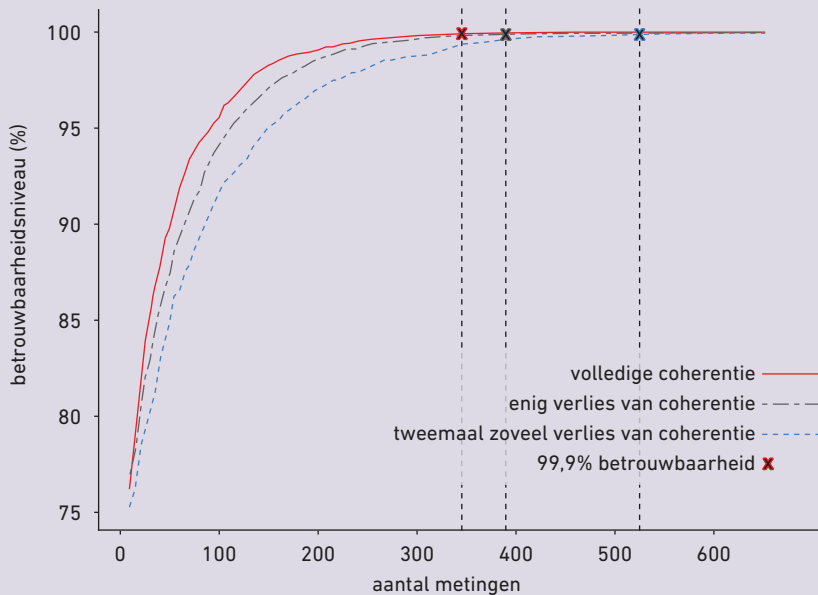
Stap 3: meten, meten en nog eens meten

De laatste stap is het aanzetten van het inhomogene magnetisch veld in tegengestelde richting. Hierdoor wordt de ruimtelijke superpositie als het ware ongedaan gemaakt en hebben we weer twee spinsuperposities. Vervolgens meten we de spintoestanden van de twee testdeeltjes. Om een correlatie tussen de spintoestanden van de deeltjes vast te stellen, moeten de bovenstaande drie stappen meerdere keren herhaald worden. In een volledig geïsoleerd systeem zou een gemeten correlatie tussen de spintoestanden van de testdeeltjes definitief bewijs zijn voor het bestaan van het graviton, omdat alleen quan-

tumcommunicatie verstrengeling kan veroorzaken.

Hoe lang is de weg nog?

De belangrijkste aanname in de voorgaande beschrijving is dat we uitgaan van een volledig geïsoleerd systeem. Maar zo'n experiment is niet realistisch, en verschillende omgevingseffecten kunnen het experiment verstoren. Er zijn meerdere manieren om te zorgen dat alleen zwaartekracht tussen de deeltjes werkt (zie figuur 2). Door bijvoorbeeld ongeladen deeltjes te nemen, sluit je de elektromagnetische kracht die op geladen deeltjes werkt uit. Daarnaast kunnen we de deeltjes in een vacuüm plaatsen waardoor er zo min mogelijk luchtdeeltjes zijn die tegen de testdeeltjes botsen. Botsingen en andere interacties met deeltjes uit de omgeving zorgen ervoor dat de testdeeltjes hun



Figuur 4. Een numerieke simulatie van het betrouwbaarheidsniveau (in percentages) waarmee verstrengeling van twee testdeeltjes kan worden vastgesteld, als functie van het aantal keer dat er metingen op de twee deeltjes zijn uitgevoerd. Zonder omgevingseffecten behouden de deeltjes volledig hun coherentie (rode lijn), met omgevingseffecten verliezen de deeltjes hun coherentie (in toenemende mate de grijze en blauwe lijn, corresponderend met toenemende omgevingseffecten) en neemt het aantal metingen toe dat nodig is om met 99,9% betrouwbaarheid te kunnen stellen dat de deeltjes verstrengeld zijn. Wanneer de deeltjes volledig hun coherentie verliezen gaat dit aantal naar oneindig en wordt het dus onmogelijk om verstrengeling te meten. Deze grafiek gaat uit van de experimentele opstelling in [2].

coherentie verliezen. Dat wil zeggen dat de testdeeltjes zich uiteindelijk in een definitieve toestand bevinden in plaats van in een superpositie van twee toestanden (zie figuur 3). Hoe meer de deeltjes hun coherentie verliezen, hoe moeilijker het meten van verstrengeling wordt (zie figuur 4). Er wordt wereldwijd hard gewerkt aan het in kaart brengen van alle bronnen van dit verlies van coherentie en aan methoden om dit tegen te gaan. Daarnaast wordt er onderzocht wat er nodig is om de benodigde experimentele omgeving te creëren. Om de verstrengeling meetbaar te maken, moeten de massa's namelijk zwaar zijn en de ruimtelijke superposities zo groot mogelijk. Het creëren van grote ruimtelijke superposities met zware quantumdeeltjes is vrij lastig. Een recente haalbaarheidsstudie toont echter aan dat het creëren van de be-

WELKE QUANTUMZWAARTEKRACHT?

Er zijn vele verschillende quantumzwaartekrachttheorieën. Dat komt doordat we nog niet goed weten hoe zo'n theorie werkt in het hoge-energieregime. Voor lage energieën weten we dat echter wel. Wanneer we het in dit artikel hebben over quantumzwaartekracht bedoelen we dan ook simpelweg een theorie die voor lage energieën een massaloos graviton heeft, en waarvan de interactie de algemene relativiteitstheorie kan reproduceren.

nodige superposities mogelijk is [5]. Een andere experimentele uitdaging is het op de juiste manier terugbrengen van de ruimtelijke superpositie naar de spinsuperpositie. We hopen de komende jaren het protocol verder te kunnen verbeteren en misschien binnen afzienbare tijd een experiment op te zetten dat eindelijk antwoord geeft op de vraag: is zwaartekracht quantummechanisch?

REFERENTIES

1. F. Dyson, *Is a graviton detectable?*, *Int. J. Mod. Phys. A* **28**: 1330041 (2013).
2. S. Bose et al., *Spin entanglement witness for quantum gravity*, *Physical review letters* **119**, 24: 240401 (2017).
3. C. Marletto en V. Vedral, *Gravitationally induced entanglement between two massive particles is sufficient evidence of quantum effects in gravity*, *Physical review letters* **119**, 24: 240402 (2017).
4. R. Horodecki et al., *Quantum entanglement*, *Reviews of modern physics* **81**, 2: 865 (2009).
5. Y. Margalit et al., *Realization of a complete Stern-Gerlach interferometer: Toward a test of quantum gravity*, *Science advances* **7**, 22: eabg2879 (2021).