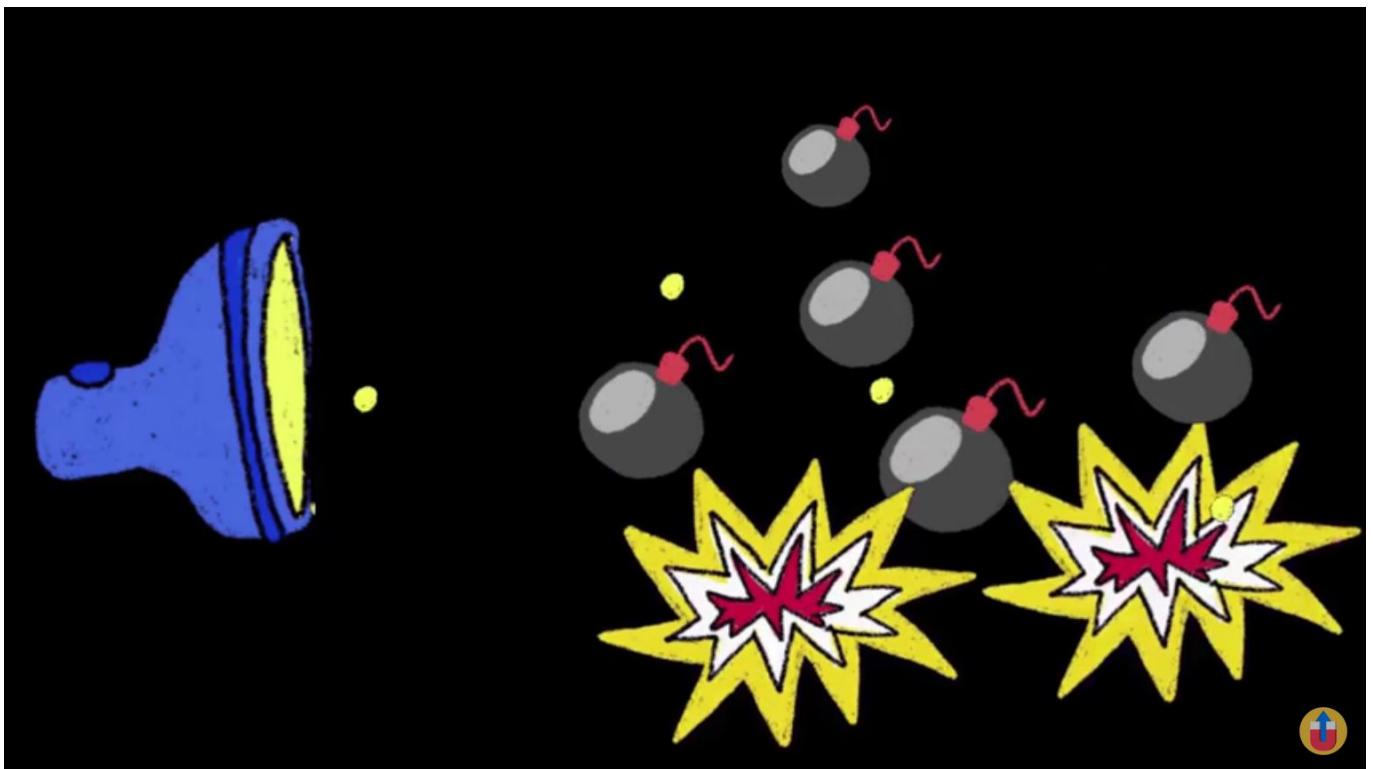


Een quantum-bomtester

Een van de bijzondere eigenschappen van de quantummechanica is het idee van *superpositie*. Volgens de klassieke natuurkunde kan een systeem maar in één toestand tegelijkertijd zijn, maar volgens de quantummechanica hoeft dat helemaal niet. Dat misschien wat vaag en abstract klinkende idee heeft allerlei verrassend concrete toepassingen. Zo kun je er zelfs bommen mee testen!



Afbeelding 1. Quantumbommen. Als een bom zó gevoelig is dat die na contact met één enkel foton al afgaat, kun je de bom dan veilig testen? Het antwoord blijkt 'ja, met behulp van de quantummechanica' te zijn. Screenshot uit het hieronder gelinkte filmpje van [Up and Atom](#).

Superposities

Hoe kan een natuurkundig systeem tegelijkertijd in verschillende toestanden zijn? Of concreter: hoe kan een deeltje bijvoorbeeld op twee plaatsen tegelijk zijn? Als je in

gedachten een elementair deeltje voor je ziet als een klein pingpongballetje, kun je je zoiets nauwelijks voorstellen. Het punt is: dat beeld is niet de beste manier om over quantumdeeltjes na te denken. Op de allerkleinste schaal moet je je een deeltje voorstellen als een golf, vergelijkbaar met een golf op het water. Is zo'n quantumgolf op een bepaalde plek hoog, dan heb je een grote kans dat een deeltjesdetector bij een meting uitslaat: je hebt dan het 'deeltje' waargenomen. Is de golf laag, dan is de kans dat je het deeltje op die plek zult waarnemen heel klein.

Een golf kan zonder enig probleem op meerdere plaatsen tegelijk zijn. Gooi maar een steen in het water: de golf die ontstaat op de plek waar de steen het water raakt, zal in alle richtingen van die plek af bewegen. Na een korte tijd is die golf niet meer op één plaats, maar kun je de golf op allerlei plekken, in een steeds groter wordende cirkel, waarnemen.

Quantumgolven doen iets soortgelijks, maar er is één groot verschil: als een quantumgolf één deeltje beschrijft, kun je dat deeltje ook maar één keer waarnemen. De quantumgolf kan weliswaar in verschillende richtingen bewegen, maar zodra je in een van die richtingen een meting hebt gedaan én je deeltjesdetector heeft 'ping!' gezegd om aan te geven dat je een deeltje hebt waargenomen, dan zul je daarna in de andere richtingen geen deeltje meer aantreffen. Eén deeltje blijft in die zin één deeltje: zodra je het ergens meet, zul je niet ergens anders een tweede deeltje vinden.

Die gekke combinatie van eigenschappen houdt natuurkundigen en filosofen al een ruime eeuw lang bezig. Een deeltje lijkt op een golf – het kan op verschillende plaatsen tegelijk zijn – maar zodra je die golf waarneemt lijkt die weer sprekend op een deeltje – uiteindelijk *vind* je het wel maar op één plek. Vind je dat moeilijk om je voor te stellen, dan ben je niet de enige – zelfs Albert Einstein had er moeite mee om deze vreemde 'duale' eigenschappen van quantumdeeltjes te accepteren.

Interferentie

Je zou natuurlijk kunnen zeggen – en dat deed Einstein oorspronkelijk ook – dat de beschrijving in termen van golven helemaal niet nodig is. Misschien kan een deeltje, als je maar goed genoeg kijkt, helemaal niet op meerdere plaatsen tegelijk zijn. Misschien *weten* we alleen op een bepaald moment niet precies waar het is, en beschrijft de quantummechanica die onwetendheid in termen van een 'kansgolf'. Een makkelijke weg uit

dit probleem, zo lijkt het, maar uiteindelijk blijkt dat die oplossing nooit het hele verhaal kan zijn! Je kunt namelijk experimenten doen waarbij de uitkomst bepaald wordt door het feit dat een deeltje vóórdat je het waarneemt daadwerkelijk op verschillende plaatsen tegelijk is.



Afbeelding 2. Interferentie. Ook watergolven vertonen interferentie: als je bij elkaar komen, zie je op sommige plekken extra hoge pieken ontstaan, en op andere plekken blijft het water vrijwel vlak. Het gevolg: het ruitjespatroon dat je ziet waar de golven bij elkaar komen. Foto: Paul Doherty.

Zulke experimenten maken meestal gebruik van *interferentie*. Denk weer aan watergolven: als je twee golven in het water bij elkaar laat komen, kunnen ze elkaar versterken en een extra hoge golf vormen. Dat gebeurt als de top van de ene golf precies op dezelfde plek aankomt als de top van de andere golf. Maar komt de top van de ene golf op een plek waar de andere golf juist een dal zou hebben, dan doven de golven elkaar uit.

Quantumgolven doen precies hetzelfde: ze kunnen elkaar versterken of uitdoven. Preciezer: één quantumgolf kan ook *zichzelf* versterken of uitdoven: als je één piek of dal van de golf langs de ene weg stuurt, en een andere piek of ander dal langs een andere weg, kunnen de

golf-delen elkaar bij aankomst versterken of uitdoven. En het verrassende is: dan kan zelfs als de golf waar we het over hebben een quantumgolf is die één enkel deeltje beschrijft! Het deeltje kan dan als het ware op bepaalde plekken zichzelf 'uitdoven' (dan is de kans dat je het op die plek aantreft nul) of zichzelf versterken – dan is de kans dat je op die plek het deeltje met de deeltjesdetector zult vinden dus heel groot.

Slimme constructies met fotonen

De deeltjes waarmee je dergelijke experimenten het makkelijkst kunt uitvoeren zijn *fotonen*, lichtdeeltjes, dus. Je kunt één enkel foton door een systeem van spiegels, lenzen en halfdoorlatende spiegels sturen, op zo'n manier dat het op bepaalde plekken een heel grote kans heeft om aan te komen, en op andere plekken een kans die vrijwel nul is. De halfdoorlatende spiegels spelen in zulke opstellingen de belangrijkste rol: dat zijn spiegels die – als je er veel licht op laat vallen – grofweg de helft van het licht doorlaten en de andere helft weerkaatsen; precies zoals een glazen ruit een deel van het licht weerkaatst (daarom kun je je eigen spiegelbeeld in zo'n ruit zien) en een deel doorlaat (daarom kun je iemand aan de andere kant van de ruit óók zien). Zelfs de quantumgolf voor één enkel foton wordt door zo'n halfdoorlatende spiegel in twee piekjes opgesplitst, en zodra je dat voor elkaar hebt gekregen kun je die piekjes weer met elkaar laten interfereren.

Een van de verrassendste toepassingen van dit idee is de Elitzur-Vaidman-bomtester. Met behulp van een slimme constructie, bedacht door de natuurkundigen Avshalom Elitzur en Lev Vaidman, kun je een enkel foton langs twee banen naar een tweetal deeltjesdetectoren versturen. Onderweg, in een van de twee banen, plaats je een object waarvan je vermoedt dat het een bom is – een bom die zo gevoelig is, dat zelfs de invloed van een enkel passerend foton – een enkele *deeltjesdetectie*, dus – hem al zal doen ontploffen.

Elitzur en Vaidman wisten hun constructie zo te maken dat je ermee kunt testen of de vermoedde bom ook daadwerkelijk een bom is. Dat wil zeggen: juist vanwege de quantumsuperposities zullen de detectoren als het echt gaat om een bom, een andere uitslag geven dan als het gaat om een nepbom die géén interactie met het foton heeft. En het mooie is: dat resultaat kun je zelfs behalen als de bom *wel* echt is, maar door het kansproces toch *niet* afgaat. In het filmpje hieronder kun je zien hoe de opstelling van Elitzur en Vaidman in elkaar zit, en waarom die tot dit verrassende resultaat leidt.

Video. The Quantum Bomb-Tester. In deze video van [Up and Atom](#) wordt uitgelegd hoe de bomtester van Elitzur en Vaidman werkt.

Betere tests

Het experiment van Elitzur en Vaidman is ook in het echt gedaan – niet met bommen, natuurlijk, maar met vredelievendere detectiemechanismen die de rol van de bom (een echte bom óf een nepbom) vervullen. Wat blijkt: de resultaten die je in het filmpje ziet zijn juist, en je kunt daadwerkelijk in 25% van de gevallen bepalen dat er een echte ‘bom’ in de opstelling zit, zónder dat je die bom hebt laten afgaan. Een resultaat dat alleen door de superposities en interferentie van quantumgolven verklaard kan worden, en niet door een beeld van deeltjes als pingpongballen! Hoezeer het ook tegen onze intuïtie indruist, het quantumbeeld van deeltjes als golven blijkt echt het juiste te zijn.

Voor echte bommen is de tester van Elitzur en Vaidman natuurlijk nog niet ideaal – de bom zal nog altijd in de helft van de gevallen ontploffen. Gelukkig kun je de opstelling verder verfijnen, met nog meer halfdoorlatende spiegels, en die zo maken dat de bom vrijwel nooit zal afgaan, maar je toch vrijwel zeker weet of die echt is of niet. De Explosieven Opruimingsdienst zal er nog altijd niet snel gebruik van maken – al was het alleen maar omdat bommen die door één foton afgaan in de praktijk zelden voorkomen – maar in het laboratorium kan het allemaal!

Wil je meer weten over de Elitzur-Vaidman bomtester? Dan nog even wat reclame: in mijn boek [“De race tegen de schildpad”](#) geef ik een nog veel uitgebreidere beschrijving van het experiment – en, trouwens, ook van nog elf andere interessante gedachtenexperimenten.