

NOBELPRIJS VOOR ASPECT, CLAUSER EN ZEILINGER VOOR QUANTUMVERSTRENGELING

De Nobelprijs voor de Natuurkunde is op 10 december 2022 uitgereikt aan Alain Aspect, John Clauser en Anton Zeilinger “voor experimenten met verstrengelde fotonen, het aantonen van de schending van Bell-ongelijkheden en het pionieren van quantuminformatiewetenschap”, aldus de motivatie van het Nobelcomité. In dit artikel leg ik uit waarom Aspect, Clauser en Zeilinger de Nobelprijs verdienen.

Sinds mensenheugenis stelt de mens zichzelf filosofische vragen zoals: zijn gebeurtenissen toevallig of het noodzakelijke gevolg van gebeurtenissen in het verleden? Kan een actie die ik hier uitvoer direct effect hebben op een object ver weg? Heeft een mens vrije wil? Wat bestaat echt en wat is maar schijn? Bestaan fysische objecten onafhankelijk van onze waarnemingen? Dit soort vragen lijkt te groot voor een natuurkundig experiment. Toch hebben de Nobelprijswinnaars vooruitgang geboekt in het beantwoorden van deze eeuwenoude vragen.

Geschiedenis van quantumverstrengeling

De geschiedenis van quantumverstrengeling begint bij Einstein, Podolsky en Rosen (EPR), die in 1935 het volgende gedachtenexperiment voorstelden, later bekend geworden als de EPR-paradox [1]. Een deeltje vervalt in twee deeltjes die vervolgens in tegengestelde richtingen bewegen (figuur 2). De plaats en de impuls van elk van de deeltjes zijn onbekend. Echter, weet men de plaats van een van de deeltjes, dan is de plaats van het

andere deeltje ook bekend. Hetzelfde geldt voor de impuls. Voor deeltjesparen in dit soort toestanden verzond Schrödinger de term *Verschränkung* (verstrengeling). Wanneer Alice dus nauwkeurig de plaats meet van deeltje 1, dan kan ze met zekerheid de meetuitkomst van Bob voorspellen, als hij, op grote afstand van Alice, nauwkeurig de plaats meet van deeltje 2. Daaruit concludeerden EPR dat, al vóórdat Bob zijn meting doet, deeltje 2 precies die plaats moet hebben. Maar Alice kan er ook voor kiezen om niet nauwkeurig de plaats, maar de impuls van deeltje 1 te meten. In dat geval volgt de conclusie dat deeltje 2 een precieze waarde moet hebben voor de impuls. Aangezien de afstand tussen Alice en deeltje 2 groot is, kan de keuze die Alice maakt voor het type meting dat ze gaat doen (haar meetinstelling), niet van invloed zijn op de eigenschappen van deeltje 2. Deeltje 2 heeft dus een precieze waarde voor de plaats en tegelijk een precieze waarde voor de impuls. Maar in de quantummechanica geeft de golf functie van een object nooit tegelijk welbepaalde waarden voor zowel plaats als impuls (de plaats- en de impulsoperator

commuteren niet met elkaar). EPR concludeerden dat de quantummechanica geen volledige beschrijving geeft van de eigenschappen van fysische objecten.

Geïnspireerd door EPR en voortbordurend op ideeën van De Broglie, formuleerde David Bohm een aanvulling op de standaardquantummechanica met voor elk deeltje welbepaalde waarden voor de plaats, de impuls en andere grootheden. Wat de Bohm-mechanica echter minder aantrekkelijk maakte was de niet-lokaliteit: via een ‘quantumpotentiaal’ zouden deeltjes op afstand met elkaar interageren, in tegenspraak met ideeën vanuit Einsteins relativiteitstheorie over causaliteit: een gevolg zou in de toekomstige lichtkegel van een oorzaak moeten liggen.

De vraag bleef of zo’n ‘volledige’ theorie zonder niet-lokale interacties mogelijk is. Om deze vraag te beantwoorden, formuleerde John Bell twee uitgangspunten [2]: lokaliteit (interacties gaan niet sneller dan de lichtsnelheid) en realisme (fysische objecten hebben eigenschappen voorafgaand aan en onafhankelijk van metingen). Passen we deze uitgangspunten



Figuur 1. De Nobelprijswinnaars van 2022, van links naar rechts: Alain Aspect, John Clauser en Anton Zeilinger. Foto's: Mooc optique quantique (CC BY-SA 2.0), Peter Lyons (CC BY-SA 4.0), Jaqueline Godany (CC BY-SA 4.0).

ten toe op de EPR-paradox (figuur 2), dan volgt dat de kansen op de verschillende mogelijke meetuitkomsten van Alice volledig worden bepaald door de meetinstelling van Alice en de eigenschappen van deeltje 1. Voor de meetuitkomst van Alice maakt het niet uit of Bob wel of geen meting verricht aan deeltje 2 en wat voor meetinstelling hij gebruikt. Een soortgelijke stelling geldt voor Bobs meting aan deeltje 2. Op basis van deze stellingen leidde Bell een ongelijkheid af, de Bell-ongelijkheid, die een maximum stelde aan de mate van correlaties tussen de meetuitkomsten van Alice en Bob. Opmerkelijk genoeg voorspelt de quantummechanica een schending van de Bell-ongelijkheid in sommige situaties.

Drie Nobelprijswinnaars, drie experimenten

De nieuwe Nobelprijswinnaar John Clauser was destijds overtuigd van de redelijkheid van de aannames van Bell en hij ging aan de slag met een experimentele test. Zijn verwachting was dat de Bell-ongelijkheid geldig zou blijken en dat er dus situaties zouden bestaan waarvoor de quantummechanica on-

“Tot Clausers verbazing werd de Bell-ongelijkheid geschonden.”

juiste resultaten zou voorspellen. Om praktische redenen deed hij metingen aan de polarisatierichtingen van verstrengelde fotonenparen, in plaats van plaats- en impulsmetingen zoals in de originele EPR-paradox. Zoals plaats en impuls in de quantummechanica niet tegelijk nauwkeurig bepaald zijn, zijn ook de polarisatie in de horizontaal-verticale basis en de polarisatie in de dubbeldiagonale basis niet tegelijk nauwkeurig bepaald. In 1969 publiceerde Clauser, samen met Horne, Shimony en Holt, een variant op de Bell-ongelijkheid die experimenteel beter toetsbaar was. In 1972 volgden de resultaten van het eerste Bell-experiment, uitgevoerd door Clauser en Friedman. Tot Clausers verbazing werd de Bell-ongelijkheid geschonden en bleek de quantummechanica het bij het rechte eind te hebben [3]. Hoe kan men Clausers schending van de Bell-ongelijkheid begrijpen?

Wordt de meting van Alice beïnvloed door Bobs meetresultaat? Of door de meetinstelling die hij kiest? En zo ja, hoe wordt dat meetresultaat of die meetinstelling dan naar Alice gecommuniceerd? Met een signaal dat met de lichtsnelheid reist? Om deze vragen te onderzoeken voerde de tweede Nobelprijswinnaar, Alain Aspect, een serie experimenten uit, eveneens aan verstrengelde fotonenparen, samen met Grangier, Roger en Dalibard (figuur 3). Opnieuw schonden de gemeten correlaties de Bell-ongelijkheid. In een van deze experimenten werd de richting van de polarisatiemeting pas op het allerlaatste moment ingesteld. Hiermee kon een fysische invloed in de vorm van een signaal met maximaal de lichtsnelheid worden uitgesloten [4]. Aspects interpretatie van deze meetresultaten was dat deze een niet-lokaal effect aan het licht brachten, een

superluminale fysische interactie. Een andere logische mogelijkheid is dat Bells uitgangspunt van het realisme onwaar is. Dat zou betekenen dat de fotonen geen eigenschappen hebben vóórdat deze worden gemeten. Echter, de experimenten lieten nog ruimte voor alternatieve verklaringen voor de gemeten schending van de Bell-ongelijkheid, zogenaemde loopholes. Zo is bijvoorbeeld aangetoond dat in meetopstellingen met een totale detectie-efficiëntie van minder dan 66,7% er kunstmatige correlaties kunnen optreden waardoor de Bell-ongelijkheid kan worden geschonden. Deze loophole wordt de detectieloophole genoemd. Verder was er nog de vrije-keuze- of vrije-wil-loophole: men zou zich kunnen voorstellen dat de meetinstellingen van Alice en Bob van invloed zijn op de eigenschappen van de verstrengelde deeltjes die in het experiment worden gecreëerd. Of omgekeerd, dat de verstrengelde deeltjes verstoringen werken op de vrije keuze van Alice en Bob voor hun metrichtingen. Hoewel dit misschien vergezochte verklaringen lijken, kunnen verregaande en tegenintuïtieve conclusies pas overtuigend worden getrokken wanneer alle andere mogelijkheden zijn uitgesloten. In 2015 is het de derde Nobelprijswinnaar, Anton Zeilinger, gelukt om een Bell-experiment uit te voeren waarin alle geloofwaardige loopholes werden uitgesloten [5]. Zelf heb ik, als postdoc in Zeilingers onderzoeksgroep, hieraan bijgedragen. Ons experiment voerden we uit in de diepste kelder van de Hofburg, het voormalig keizerlijk paleis in Wenen. In het midden van een 58 meter lange gang bouwden we de zuiverste en efficiëntste bron van verstrengelde fotonenparen die op dat moment bestond (figuur 4). Die bron werkte op basis van down-conversie, een verstrengelingstechniek bedacht door Zeilinger; één foton met een golflengte van 405 nm splitste in een niet-lineair kristal op in twee fotonen met een golflengte van 810 nm. Dat kristal plaatsten we midden in een interferometer, zodat de geproduceerde fotonenparen in een superpositie kwamen van linksom en rechtsom. Dit resulteerde in de gewenste polari-

“Zijn er nog andere uitwegen uit het mysterie van de quantumverstrengeling?”

satieverstrengeling. De verstrengelde fotonen gingen via glasvezels naar de meetstations aan beide uiteinden van de gang. In de meetstations werd de polarisatie gemeten van de fotonen door middel van polarisatiefilters en supergeleidende enkelfotondetectoren. De polarisatiehoek werd gevarieerd middels het elektro-optisch effect, aangestuurd door een snelle quantumtoevalsgenerator. Door de ruimtetijdconfiguratie van ons experiment, met voldoende afstand tussen de meetstations en snelle en onvoorspelbare meetinstellingen, konden we communicatie met maximaal de lichtsnelheid (ook wel de lokaliteitsloophole genoemd) tussen Alice en Bob uitsluiten. Invloed tussen de bron en de meetinstellingen van Alice en Bob (de vrije-keuze-loophole) konden we met onze ruimtetijdconfiguratie eveneens uitsluiten. Door de hoge efficiëntie van de hele opstelling (78,6% aan de kant van Alice en 76,2% aan de kant van Bob), konden we de detectieloophole sluiten. In ons experiment werd de Bell-ongelijkheid geschonden met een p -waarde van $3,74 \times 10^{-31}$, corresponderend met een statistische significantie van 11,5 standaarddeviaties. In de periode 2015 - 2017 werden eveneens loopholevrije Belltests gerapporteerd door onderzoeksgroepen onder leiding van Ronald Hanson, Sae-Woo Nam en Harald Weinfurter.

Natuur bestaat uit informatie

Wat kunnen we hieruit concluderen? Quantum-niet-lokaliteit is een mogelijkheid. Zeilingers visie echter is, in lijn met de interpretatie van Bohr, dat objecten pas eigenschappen krijgen binnen de context van een meting. Welke eigenschappen bij een meting ontstaan, moet dan ook fundamenteel toevallig zijn. Volgens Zeilinger suggereren de Bell-experimenten dat de

natuur niet in de eerste plaats bestaat uit objecten en hun eigenschappen, maar uit informatie [6]. Deze informatie kan vervat zijn in relaties die niet voortkomen uit eigenschappen van individuele objecten. Hoe het begrip ‘meting’ gedefinieerd moet worden, is nog altijd onderwerp van discussie.

Zijn er nog andere uitwegen uit het mysterie van de quantumverstrengeling? Je kunt je afvragen of de signalen van de toevalsgenerator wel echt toevallig waren. Misschien was er een gemeenschappelijke oorzaak die de fotoneigenschappen en de meetinstellingen van Alice en Bob precies zo op elkaar heeft afgestemd dat de Bell-ongelijkheid werd geschonden, een sterkere versie van de vrije-keuze-loophole. In 2018 heeft de onderzoeksgroep van Zeilinger een Bell-experiment uitgevoerd waarin de keuzes voor de meetinstellingen werden bepaald door licht van verafgelegen quasars. Met deze kosmische Belltest hebben zij aangetoond dat als zo’n gemeenschappelijke oorzaak zou bestaan, deze ouder zou moeten zijn dan 7,8 miljard jaar [7].

Quantumrevolutie

Naast het grote filosofische belang heeft quantumverstrengeling een groot technologisch belang. De vindingen van Clauser, Aspect en Zeilinger hebben de weg geplaveid voor de quantumrevolutie die zich nu voltrekt, met grote vooruitgang op de gebieden van quantumcommunicatie, quantum computing en quantum sensing, wereldwijd en zeker ook in Nederland. Zeilinger heeft in 1997, met zijn toenmalige promovendus Dirk Bouwmeester, voor het eerst quantumteleportatie aangetoond, een essentiële techniek voor het quantuminternet. Hierin wordt quantumverstrengeling



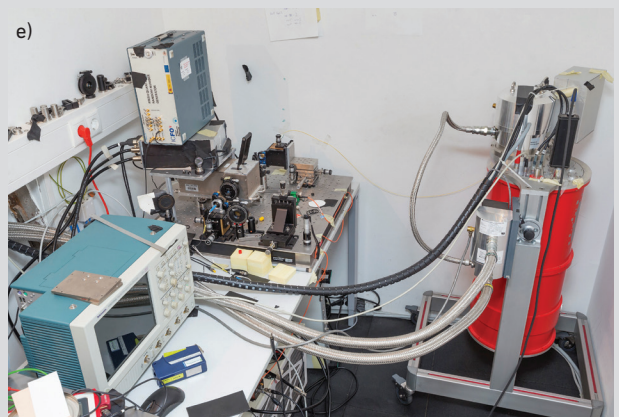
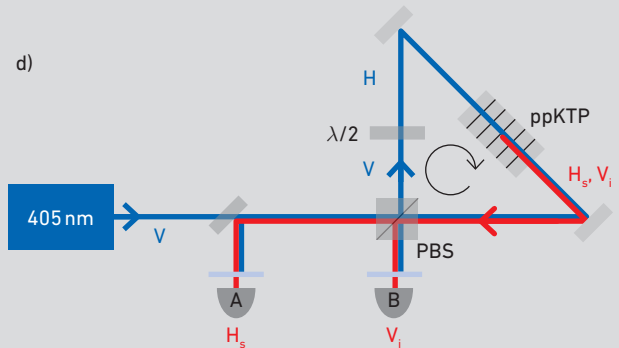
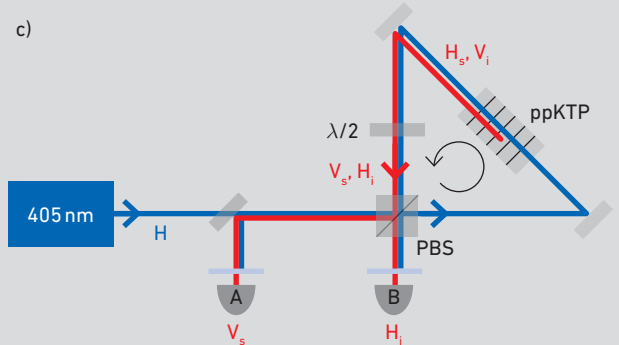
Figuur 2. EPR-Bell-experiment. Een bron zendt twee verstrengelde deeltjes uit in tegengestelde richtingen. Waarnemers Alice en Bob kiezen, ieder afzonderlijk, bij hun metingen aan de deeltjes uit twee verschillende meetinstellingen. In de originele EPR-paradox staan a1 en b1 voor plaatsmetingen, en a2 en b2 voor impulsmetingen. Bij Bell-experimenten met verstrengelde fotonenparen staan a1 en b1, en a2 en b2 voor polarisatiemetingen in verschillende richtingen.



Figuur 3. Meetopstelling van Aspect en medewerkers, waar verstrengelde fotonen werden geproduceerd via overgangen in geëxciteerde calciumatomen. Foto: Institut d'Optique.



Figuur 4. Meetopstelling van Zeilingers onderzoeksgroep in de Hofburg. a) 58 meter lange gang met in het midden de bron en aan beide uiteinden de meetstations. b) Bron van verstrengelde fotonen, waar ik aan zit te werken. c) Horizontaal gepolariseerd violet licht gaat linksom door de interferometer. In het niet-lineaire kristal (ppKTP) ontstaan twee infrarode fotonen: Alice krijgt een foton met verticale en Bob een met horizontale polarisatie. d) Verticaal gepolariseerd violet licht gaat rechtsom door de interferometer. Alice krijgt een foton met horizontale en Bob een met verticale polarisatie. Wanneer diagonaal gepolariseerd licht de interferometer in wordt gestuurd, gebeurt de downconversie in een superpositie van linksom en rechtsom. De fotonen die naar Alice en Bob gaan, zijn dan verstrengeld; hun polarisatie is onbepaald en tegelijk volledig gecorreleerd. e) Bobs meetstation (Alice' meetstation is het spiegelbeeld hiervan).



DE VERREIKENDE INVLOED VAN QUANTUMVERSTRENGELING

De Nobelprijs voor de Natuurkunde van 2022 is onder andere gegeven voor de enorme potentie van verstrengeling, voor technologische toepassingen en als basis voor vervolgonderzoek naar de bouwstenen van onze natuur.

Nederlandse quantumtechnologie

Het Nederlandse quantumonderzoek is al van oudsher vooruitstrevend, mede dankzij de bijdragen van Ehrenfest, Kramers, Uhlenbeck en Goudsmit aan het formuleren van de theorie, ook wel de eerste quantumrevolutie genoemd. Nu bevinden we ons in de tweede quantumrevolutie, waarin quantumtechnologie daadwerkelijk ontwikkeld wordt. En meer dan ooit werken Nederlandse wetenschappers en ontwikkelaars samen om de technologie tot een succes te maken. Het samenwerkingsverband Quantum Delta NL [1] is opgericht om landelijk te werken aan technologie-ontwikkeling, brede samenwerkingen in zowel de wetenschap als het bedrijfsleven, onderwys op het gebied van quantumtechnologie en het vormgeven van maatschappelijke impact.

De maatschappij mag het zeggen

Als quantumcommunicatie in de komende decennia een bruikbare technologie wordt, moeten we nu al nadenken over de maatschappelijke impact hiervan. Wat betekent dat voor de veiligheid van onze communicatie? Welke praktische toepassingen heeft een quantuminternet en wat blijft via het 'gewone' internet gaan? Wie mag het quantuminternet gebruiken en wat kost dat? Dit zijn vragen die raken aan ethiek, rechtspraak en wetenschapscommunicatie. Het is belangrijk hier nu al over na te denken, om de technologie ook daadwerkelijk te kunnen gebruiken en begrenzen. In samenwerking met wetenschappers met diverse achtergronden, bedrijven, beleidsmakers én 'gewone burgers' denken we daarom nu al na over deze toekomst van het quantuminternet [2].

Zwaartekracht en ruimtetijd

Hoewel quantumtheorie en de bijbehorende verstrengeling niet meer weg te denken zijn uit de moderne natuurkunde en we zelfs al bezig zijn met het ontwikkelen van technologie die hierop gebaseerd is, zijn er nog belangrijke fundamentele vragen onbeantwoord. Zo kunnen we de zwaartekracht en de algemene relativiteit nog altijd niet beschrijven binnen een quantumtheorie. Maar het onderzoek hiernaar maakt wel vorderingen. Op theoretisch gebied leidde dit tot het idee dat verstrengeling misschien een hulpmiddel kan zijn om de ruimtetijd zelf te beschrijven [3]. Op experimenteel gebied worden steeds grotere massa's in een quantsuperpositie van toestanden op twee verschillende plekken gebracht. Een massa bepaalt de vorm van de ruimtetijd eromheen. De vraag is dan: is de ruimtetijd in dat geval ook in een superpositie? Dit is moeilijk direct te testen, maar er is wel een indirecte test. Als de ruimtetijd in superpositie is, moet het ook mogelijk zijn de positie van een tweede massa te verstrengelen met de eerste. De tweede massa voelt dan een superpositie van sterkere of zwakkere zwaartekracht van de eerste massa [4], en raakt verstrengeld met de eerste massa. Zo'n test zal nog wel enkele tientallen jaren op zich laten wachten, maar zou de invloed van quantumverstrengeling uitbreiden tot alle domeinen van de ons bekende natuurkunde.

De Nobelprijs van 2022 gaat dus om meer dan het verwerpen van een lokaal realistisch wereldbeeld. De Nobelprijswinnende experimenten zijn ook de grondslag voor belangrijke ontwikkelingen in zowel de theoretische en experimentele natuurkunde als in de maatschappij.

Julia Cramer onderzoekt de maatschappelijke impact van wetenschapscommunicatie over quantumtechnologie (als universitair docent aan de Universiteit Leiden) en **Bas Hensen** heeft een experimentele onderzoeksgroep aan de Universiteit Leiden, die onderzoek doet op het grensvlak tussen zwaartekracht en quantumtheorie.

REFERENTIES

- 1 <http://quantumdelta.nl>.
- 2 www.universiteitleiden.nl/en/research/research-projects/science/ibl-linking-quantum-technology-to-society.
- 3 Zie bijvoorbeeld www.preposterousuniverse.com/blog/2016/07/18/space-emerging-from-quantum-mechanics, of www.newscientist.nl/nieuws/is-waarom-publicatie-erik-verlinde-spannend-is.
- 4 Bijvoorbeeld S. Bose et al. *Phys. Rev. Lett.* **119**, 240401 (2017), www.quantumgravityinlab.com.

gebruikt om quantuminformatie op één plaats te vernietigen om het op een andere plaats te laten verschijnen, in sommige van Zeingers experimenten meer dan honderd kilometer verderop. Een tweede belangrijke techniek, eveneens door Zeilinger voor het eerst aangetoond, in 1998, is *entanglement swapping*. Hiermee kunnen zelfs deeltjes die nooit bij elkaar in de buurt zijn geweest met elkaar worden verstrengeld en zo kunnen quantumcryptografie en andere vormen van quantumcommunicatie over grote afstanden tot stand worden gebracht. Zeilinger heeft nog meer toepassingen van verstrengeling aangetoond, bijvoorbeeld quantumbeeldvorming met fotonen die niet worden gedetecteerd en verstrengeling van meer dan twee deeltjes. Bas Hensen en Julia Cramer schrijven in het kader hiernaast over de toekomst van quantumverstrengeling. Aspect, Clauser en Zeilinger zijn met de Nobelprijs geëerd omdat zij met hun onderzoek aan quantumverstrengeling hebben laten zien dat onze basisnoties van lokaliteit en realisme niet samen houdbaar zijn. Bovendien heeft Zeilinger de weg geopend naar vele fascinerende toepassingen van verstrengeling, zoals in quantumcommunicatie en cryptografie.

Marijn Versteegh is docent technische natuurkunde aan De Haagse Hogeschool. In 2011 promoveerde hij in Utrecht en in 2014-2015 werkte hij als postdoc bij Anton Zeilinger in Wenen. m.a.m.versteegh@hhs.nl

REFERENTIES

- 1 A. Einstein et al., *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
- 2 J. S. Bell, *On the Einstein Podolsky Rosen paradox*, *Physics* **1**, 195 (1964).
- 3 S. J. Freedman en J. F. Clauser, *Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories*, *Phys. Rev. Lett.* **28**, 938 (1972).
- 4 A. Aspect et al., *Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers*, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804 (1982).
- 5 M. Giustina et al., *Significant-Loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons*, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 250401 (2015).
- 6 A. Zeilinger, *Teleportatie en andere mysteries in de kwantummechanica* (vertaling van Einsteins Spuk), Diemen: Veen Magazines (2006).
- 7 D. Rauch et al., *Cosmic Bell Test Using Random Measurement Settings from High-Redshift Quasars*, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 080403 (2018).