Een quantum-latrelatie

Een van de belangrijkste natuurkundige nieuwsberichten uit 2015 kwam uit ons eigen land. In Delft toonden onderzoekers aan dat de mysterieuze quantumverstrengeling daadwerkelijk bestaat. Dat was op zichzelf geen grote verrassing – vele eerdere experimenten waren het Delftse experiment al voorgegaan – maar in Delft lukte het voor het eerst om ook daadwerkelijk alle 'loopholes' tegelijk te dichten en met grote zekerheid te zeggen dat niets anders dan verstrengeling de meetwaarden kon verklaren.

In december 2015 publiceerden we op deze site al een artikel over de Delftse meetresultaten, onder de titel 'Einsteins ongelijk bewezen?'. Voor wie zijn geheugen wil opfrissen: in onderstaande korte video leggen de onderzoekers nog eens precies uit wat ze nu hebben waargenomen.

De basis van het Delftse experiment bestaat uit een paar van verstrengelde elektronen, opgesloten in twee diamanten, die zich op een ruime kilometer afstand van elkaar bevinden. Metingen aan zo'n paar tonen aan dat de zogeheten *Bell-ongelijkheid* geldt – wat in eenvoudiger termen betekent dat quantumverstrengeling inderdaad bestaat.

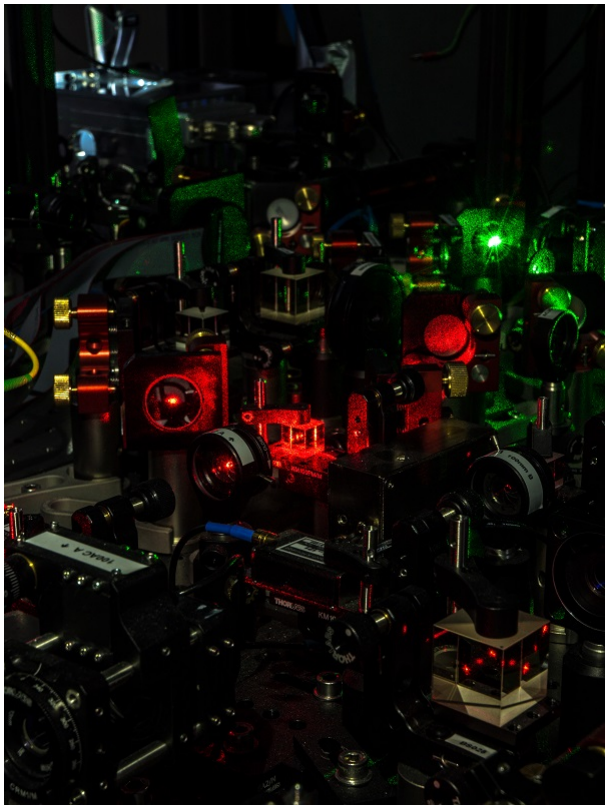
Een vraag die diverse lezers ons stelden, was: hoe krijgen de onderzoekers het voor elkaar om twee elektronen op zo'n grote afstand van elkaar met elkaar te verstrengelen? Ter herinnering: 'verstrengeling' houdt in dat de *spin* van de twee elektronen, een maat voor het 'rondtollen' van de elektronen, aan elkaar gekoppeld is. Als het ene elektron 'rechtsom' draait (ten opzichte van een vooraf gekozen referentiekader), draait het andere 'linksom'. Het mooie van deze quantum-latrelatie is echter dat daarmee ook alles gezegd is: het is vóór de meting nog niet bepaald *welke* van de twee elektronen rechtsom draait, en welke linksom. We zouden de toestand van het elektronenpaar dus grofweg als volgt weer kunnen geven:

$$\mathbf{e1_{+1}\, e2_{-1} + e1_{-1}\, e2_{+1}}$$

Hierin staan e1 en e2 voor het eerste en tweede elektron, +1 voor rechtsom draaien, en -1 voor linksom draaien. We zeggen dat het systeem in een *superpositie* van twee mogelijke toestanden is.

De grote vraag is: hoe maak je zo'n superpositie van toestanden? Als twee deeltjes *samen* ontstaan in een botsing waarbij veel energie vrijkomt (iets wat bijvoorbeeld in de deeltjesversnellers op het CERN in Zwitserland gebeurt) is dit eenvoudig: de natuurkundige wet van 'behoud van impulsmoment' zegt dan dat er geen draaiing in het totale systeem mag zijn, waardoor het ene deeltje altijd rechtsom zal draaien als het andere linksom draait, en omgekeerd.

Maar hoe maak je twee verstrengelde deeltjes met een onderlinge afstand van ruim een kilometer? Een eerste optie is natuurlijk om de deeltjes op één plek te maken, en vervolgens te vervoeren naar twee posities die een kilometer van elkaar af liggen. In de praktijk is dit echter onbegonnen werk: zulk vervoer kost tijd, en het is vrijwel onmogelijk om de superpositie van toestanden lang genoeg in stand te houden. Bij de experimenten in Delft wordt daarom een andere slimme truc gebruikt, die bekend staat onder de naam *entanglement swapping*, oftewel 'uitwisselen van verstrengeling'.



Afbeelding 1. Het experiment.Een deel van de Delftse opstelling waarin elektronen met elkaar verstrengeld worden, om vervolgens metingen aan de spin van deze elektronen te doen. Foto: Frank Auperle.

Aan het begin van het experiment zijn beide elektronen, die zich al op de ver verwijderde locaties bevinden, elk *afzonderlijk* in een superposite van ‘rechtsom draaien’ en ‘linksom draaien’. De elektronen weten echter nog niets van elkaar, dus elke combinatie van spins is mogelijk. In onze bovenstaande notatie: het totale systeem bevindt zich in de toestand

$$\mathbf{e1_{+1}\,e2_{+1} + e1_{+1}\,e2_{-1} + e1_{-1}\,e2_{+1} + e1_{-1}\,e2_{-1}}$$

Beide elektronen zenden echter licht uit – in de vorm van lichtdeeltjes: fotonen – en dit licht bevat informatie over de draairichting van het elektron. Met andere woorden: nadat beide elektronen een foton hebben uitgezonden, is het totale systeem in de toestand

$$\mathbf{e1_{+1}\,f1_{+1}\,e2_{+1}\,f2_{+1} + e1_{+1}\,f1_{+1}\,e2_{-1}\,f2_{-1}}$$
$$\mathbf{+ e1_{-1}\,f1_{-1}\,e2_{+1}\,f2_{+1} + e1_{-1}\,f1_{-1}\,e2_{-1}\,f2_{-1}}$$

Hierin staan *f1* en *f2* voor de twee fotonen, en heeft elk foton een subscript dat de informatie over het bijbehorende elektron bevat.

Het zijn vervolgens de *fotonen* die, via ondergrondse glasvezelkabels, bij elkaar worden gebracht in het Delftse experiment. Daarna wordt aan deze fotonen een heel slimme meting gedaan: de onderzoekers meten niet de afzonderlijke informatie van één foton (en daarmee dus de spin van één elektron), maar ze meten met een aantal slimme technische trucs het *product* van de twee spinwaarden. Als dit product bijvoorbeeld -1 blijkt te zijn, weten we dat dus ofwel foton 1 de informatie '+1' met zich meedraagt en foton 2 de informatie '-1' (want +1 maal -1 is gelijk aan -1), of dat precies het omgekeerde het geval is. We weten echter ook dat het *niet* zo kan zijn dat beide fotonen de informatie '+1' met zich meedragen, want +1 maal +1 is gelijk aan +1. Ook de toestand waarin beide fotonen de informatie '-1' met zich meedragen is niet meer mogelijk. Met andere woorden: er wordt een meting gedaan die het totale systeem terugbrengt tot de toestand

$$\mathbf{e1}_{+1}\,\mathbf{f1}_{+1}\,\mathbf{e2}_{-1}\,\mathbf{f2}_{-1} + \mathbf{e1}_{-1}\,\mathbf{f1}_{-1}\,\mathbf{e2}_{+1}\,\mathbf{f2}_{+1}$$

aangezien dit de enige 'deeltoestanden' zijn die met de meting overeenkomen. (Omgekeerd: als het product '+1' blijkt te zijn, blijven natuurlijk precies de andere twee toestanden over, en kan daarmee een soortgelijk experiment gedaan worden.) Vervolgens houden de onderzoekers zich niet meer bezig met de fotonen, maar worden alleen nog metingen gedaan aan de ver verwijderde elektronen. Dat wil zeggen: na de meting aan de fotonen kunnen we die uit onze beschrijving verwijderen, en is wat we overhouden de toestand

$$\mathbf{e1}_{+1}\,\mathbf{e2}_{-1} + \mathbf{e1}_{-1}\,\mathbf{e2}_{+1}$$

Op deze slimme, gecompliceerde manier wordt de quantum-latrelatie tussen de twee elektronen tot stand gebracht, waarna het echte experiment om aan te tonen dat verstrengeling bestaat, kan beginnen. Beslist niet eenvoudig… maar ja, welke latrelatie is dat wel?

Foto blokkenschema voorpagina: Slagboom en Peeters Luchtfotografie BV. Bewerking: TU Delft.