

Een groot Quantummysterie

In dit artikel wordt in huis-tuin-en-keukentaal één van de grootste quantummysterieën uit de doeken gedaan. We beschrijven een simpel apparaat, gebaseerd op een versie van de Bell-ongelijkheid, waarvan de werking zeer verassend blijkt. In feite werkt de natuur precies zo. — Stefan Kowalczyk

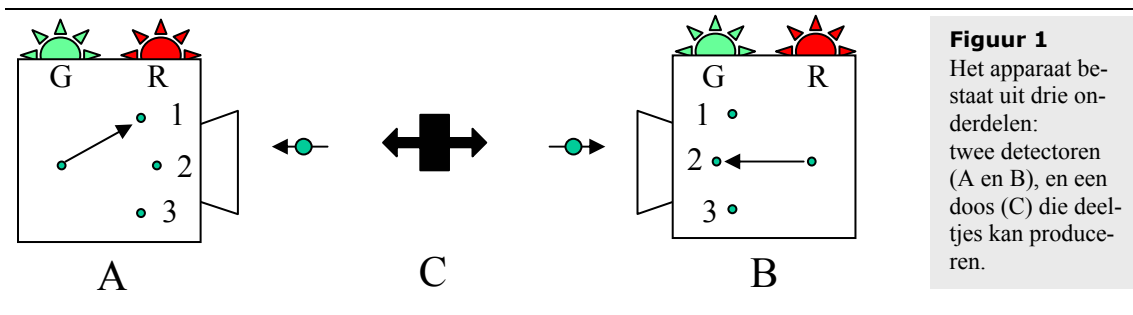
In dezelfde categorie als de bekende uitspraak “Anybody who is not shocked by quantum theory has not understood it”, is er ook de wat minder bekende “Anybody who is not bothered by Bell’s theorem must have rocks in his head.” Mooi hè... Het verhaal van de beroemde Bell-ongelijkheid gaat terug naar Einstein, Podolsky en Rosen. In een artikel uit 1935 (vaak wordt dit de EPR-paradox genoemd, zie kader) claimen zij dat ófwel quantummechanica incompleet is, ófwel wij in een niet-lokale wereld leven met “spooky-actions-at-a-distance”, zoals Einstein dat zo mooi noemde. Lange tijd bleef de discussie over de vraag welke van de twee opties werkelijkheid is van filosofische aard; zonder experimenteel bewijsmateriaal. Pas in de jaren zestig kwam John Bell met een idee voor een experiment waarmee de waarheid boven water zou komen drijven. Het duurde nog eens twintig jaar voordat men in staat was een dergelijk experiment uit te voeren. Het was Alain Aspect die er in 1982 in slaagde een experimenteel bewijs te leveren voor het feit dat quantummechanica een complete theorie is. De overgebleven optie is er eentje die absoluut onredelijk lijkt: die van mysterieuze instantane connecties tussen verafgelegen systemen. In de loop van dit artikel zal dit allemaal duidelijker worden. Eigenlijk komt het erop neer dat we zien dat er vreemde dingen gebeuren, maar dat er geen verklaring voor is. Maar of dat nou een probleem is? Wie zal het zeggen? Richard Feynman zei hierover het volgende (Int. J. Th. Phys. **21**, 467, 1982): “It has not yet become obvious to me that there is no real problem. I cannot define the

real problem, therefore I suspect there’s no real problem, but I am not sure there is no real problem. So that’s why I like to investigate things.” Op de vraag of snaartheorie dan misschien een verklaring kan geven voor de mysterieuze connecties, antwoordde Brian Greene (die hier laatst op uitnodiging was van de Koningin - die blijkbaar ook op de hoogte wil blijven van de nieuwste snaarontwikkelingen!) het volgende: “Stringtheory has no explanation for it either it can make us only *feel* better about it.” Een uitleg van *waarom* dingen gebeuren zoals ze gebeuren kunnen we niet geven; dat kan vooralsnog niemand.

Wat we wél kunnen doen is beschrijven wat er gebeurt. Dat zullen we nu ook doen. We beginnen met het beschrijven van een vreemd apparaat. Het apparaat is behalve vreemd ook ‘heel echt’, het kan namelijk in principe gebouwd worden. En in feite was het apparaat waarmee Alain Aspect twintig jaar geleden zijn doorslaggevende experimenten deed in essentie gelijk aan dit apparaat.

Het apparaat

Het apparaat (figuur 1) bestaat uit drie losse onderdelen. (En hier is los ook *echt* los; dwz, geen mechanische connecties, geen elektromagnetische connecties, etc.) Twee van de drie onderdelen (A en B) zijn detectoren. Op beide detectoren zit een schakelaar die op drie verschillende manieren kan worden ingesteld, ook zitten er op de detectoren een rode en een groene lamp (fig. 1). Het derde onderdeel van het apparaat is een doos (C) die tussen de detectoren is geplaatst. Deze doos kan op



Figuur 1
Het apparaat bestaat uit drie onderdelen: twee detectoren (A en B), en een doos (C) die deeltjes kan produceren.

commando twee deeltjes produceren (bijvoorbeeld elektronen) die van elkaar wegvliegen; elk in de richting van één van de detectoren. Laten we deze deeltjes voor de grap “spin-1/2 deeltjes in de singlet state” noemen. (Het is maar wat je een grap noemt.) Als een detector zo’n deeltje detecteert gaat of de rode of de groene lamp branden.

Experimenteren

We gaan nu wat experimenten doen met dit apparaat. In elk van de detectoren zullen we de schakelaars willekeurig variëren. Dit geeft ons negen settings voor de twee detectoren (namelijk 11, 12, 13, 21 enz.). De volgorde waarin de detectoren de deeltjes detecteren maakt niks uit, net zo min als het moment waarop we ze instellen (als een detector maar is ingesteld voordat een deeltje arriveert). We houden de resultaten op de volgende manier bij: 21 *RG* geeft aan dat detector *A* in stand 2 stond en rood licht ten tonele spreidde, terwijl *B* in stand 1 stond en groen scheen. Een typische pagina uit ons “NiceDay resultaten-kladblok” zou er zo uitzien:

12 <i>RG</i>	31 <i>RG</i>	22 <i>GG</i>	31 <i>GR</i>	23 <i>RG</i>
22 <i>RR</i>	12 <i>RR</i>	32 <i>RG</i>	11 <i>GG</i>	13 <i>GR</i>

(fig. 2). Er vallen ons twee dingen op als we een grote hoeveelheid data bekijken. (Bedenk dat deze resultaten niet hypothetisch zijn, maar werkelijk zijn wat we meten. Dus niet: stel we meten dit, dan...blablabla; Maar: dit is wat we meten -- hoe kunnen we het verklaren?!)

(a) In de runs waarin de knoppen in dezelfde stand staan (11, 22, of 33) schijnen de detectoren altijd met dezelfde kleur (*RR* en *GG* komen met dezelfde frequentie voor; *RG* en *GR* komen niet voor).

(b) In de runs waarin de standen verschillend zijn (12, 13, 21, 23, 31, of 32) schijnen de detectoren maar in een kwart van de gevallen met dezelfde kleur (*RR* en *GG*, beide met gelijke frequenties); in de ander drie kwart van de gevallen zien we twee verschillende kleuren. (*RG* en *GR*, beide met gelijke frequenties)

Het raadselachtige aan dit apparaat

Laten we eerst kijken de betekenis van (a). Waarom schijnen de detectoren altijd dezelfde kleur als de knoppen in dezelfde stand staan? Bedenk dat de twee detectoren niet met elkaar verbonden zijn. Er is daarom geen manier waarop de ene detector ‘weet’ dat de instelling van de andere detector de-

zelfde is als van de zijne. Er is echter een heel makkelijke manier om resultaten van geval (a) te verklaren. Het enige dat we hoeven aan te nemen, is dat een of andere eigenschap van elk deeltje de kleur bepaalt voor elk der instellingen van de detector. Wat deze eigenschap is maakt in wezen niks uit. Van belang is dat de verschillende toestanden van elk deeltje in acht typen kunnen worden verdeeld: *GGG*, *GGR*, *GRG*, *GRR*, *RGG*, *RGR*, *RRG* en *RRR*. Deze notatie betekent het volgende. Een deeltje in, laten we zeggen, toestand *GRR* zal ervoor zorgen dat bij detectie in stand 1 de groene lamp aangaat, in stand 2 de rode, en in stand 3 ook de rode. Elk deeltje draagt zijn eigen instructieset mee. De afwezigheid van de uitkomsten *GR* en *RG* in het geval van twee gelijke detectorstanden kan nu worden verklaard door aan te nemen dat de twee deeltjes die in een gegeven run zijn geproduceerd, *dezelfde* instructieset hebben. Dit verklaart geval (a). Een bewijs geven dat dit de enige mogelijke verklaring is, is niet te geven. We dagen de lezer uit om een andere verklaring te bedenken. Merkwaardig is dat deze hypothese – dus die van dezelfde instructiesets voor deeltjes uit dezelfde runs – incompatibel is met wat er gebeurt in geval (b)!

Als onze hypothese correct zou zijn, dan zouden beide deeltjes in een gegeven run dezelfde instructieset dragen *onafhankelijk van of de standen van de detectoren gelijk stonden of niet*. Voor de doos waar de deeltjes uit komen is er geen manier om te ‘weten’ hoe de knoppen staan, of beter gezegd, zullen staan. We mogen namelijk net zo lang en wanneer we maar willen aan de knoppen draaien, ook na het vertrek van de deeltjes uit de doos.

Beschouw nu een run van type (b). Zelfs nadat een run is afgelopen, kunnen we de volledige instructieset nooit weten. Dit komt omdat we uit de data alleen wat kunnen opmaken over welke kleur werd toegekend aan twee van de drie standen. Maar toch kunnen we wel iets concluderen uit onze data. Stel dat beide deeltjes een instructieset *GGR* hadden. Dan zullen van de zes mogelijke settings van type (b) alleen 21 en 12 erin resulteren dat de detectors dezelfde kleur zullen uitzenden (namelijk allebei groen). De andere vier (13, 31, 23 en 32) zullen allemaal één keer rood en één keer groen schijnen. Dus zullen in een derde van de gevallen (b) waarin de deeltjes instructiesets *GGR* hebben, dezelfde kleuren schijnen. Hetzelfde is waar voor *GRG*, *RGG*, *RRG*, *RGR*, *GRR*. De conclusie berust im-

mers op het feit dat één van de kleuren één keer voorkomt, terwijl de andere kleur twee keer voorkomt. De overgebleven instructiesets zijn *GGG* en *RRR*, waarbij beide detectoren altijd dezelfde kleur zullen schijnen.

Hieruit blijkt dat, onafhankelijk van hoe de instructiesets zijn verdeeld over de verschillende runs – in de type (b) runs, beide detectoren in **minstens een derde** van de gevallen dezelfde kleur zullen schijnen. Echter, zoals we zeiden bij de uitleg van het apparaat, schijnt dezelfde kleur maar **in een kwart** van de gevallen als de detectors op verschillende standen staan, type (b) dus. Voor de duidelijkheid: die 1/4 is dus wat we experimenteel meten en de wat onze verwachting is op grond van onze theorie. We concluderen dat de geobserveerde feiten in geval (b) incompatibel zijn met onze verklaring van de geobserveerde feiten in geval (a).

De verklaring

De “dezelfde-instructieset-verklaring” zoals we die hier hebben bekeken is van niemand minder van Albert Einstein himself afkomstig. Overigens staat “dezelfde-instructieset-verklaring” in de volksmond ook wel bekend als ‘hidden variable theory’. Wat we in dit artikel hebben bekeken is een ‘*local* hidden variable theory’. En, zoals we gezien hebben, kunnen we de natuur er niet mee beschrijven (1/3 is ongelijk aan 1/4). De doorbraak die ons het inzicht in dit vraagstuk verschafte kwam van John Bell die als eerste inzag dat het interessant was om de twee detectoren op *verschillende* standen in te stellen. Het lijkt zo simpel, maar kom er maar op... Meer precies schreef Bell een ongelijkheid op. In het geval van local hidden variables moet hieraan voldaan worden. In sommige goed gekozen experimentele settings wordt deze ongelijkheid geschonden. Wat overblijft zijn dus ‘*non-local* hidden variable theories’, waarin verschillende (verafgelegen) systemen op een geheimzinnige manier met elkaar in connectie staan en elkaar *instantaan* kunnen beïnvloeden. Aangezien dit beïnvloeden op een *stochastische* manier gaat (zoals de meeste dingen in de quantummechanica – een theorie van waarschijnlijkheidswolken en onzekerheden), kan op deze manier geen informatie worden verzonden! Gelukkig maar, anders had de relativiteitstheorie wel de vuilnisbak in gekund.

Referenties

N.D. Mermin, *Bringing home the atomic world: Quantum mysteries for anybody*, Am. J. Phys. **49**(10), Oct. 1981. – Dit artikel beschrijft hetzelfde apparaat als wij hebben beschreven. David Mermin heeft nog veel meer leuke stukjes geschreven zoals “Is the moon there when nobody looks?”

J. Hoogeveen, S.Kowalczyk, M. van de Meent, *An Historical and Modern View on Bell's Inequality*, 2004. - Dit is het verslag van ons derdejaars project onder begeleiding van Klaas Landsman. Zie www.science.uva.nl/student/scoop

EPR-paradox

Midden op de Atlantische oceaan vervalt een pion in een elektron en een positron. Het elektron beweegt richting Amsterdam, het positron richting Boston. Omdat een pion spin nul heeft moet òf het elektron spin-op hebben en het positron spin-neer, òf precies andersom. Als Alice in Amsterdam meet dat het elektron spin-op heeft weet zij dus onmiddellijk dat het positron spin-neer heeft, onafhankelijk of Bob wel of niet de spin van het positron gemeten heeft. Als je ervan uit gaat dat de spin van het elektron en positron van de te voren vast lagen is dit niet erg schokkend. Maar de quantummechanica kan van te voren niet voorspellen of het elektron spin-op of spin-neer heeft. Kort door de bocht kun je dus concluderen dat de quantummechanica een incomplete theorie is. (Ook als je de bocht wat ruimer neemt kun je hetzelfde concluderen).

Je kunt de situatie ook anders bekijken door te zeggen dat toen de deeltjes nog onderweg waren de spin onbepaald was. Pas op het moment dat je de spin van één van beide deeltjes meet stort de golf functie ineen tot spin-op of spin-neer. Dit zou betekenen dat de informatie die Alice meet ook instantaan bekend is bij Bob. En hier komt de paradox te voorschijn. Het deeltje van Bob is zo'n 10.000 km verderop maar weet Alice direct de toestand van het deeltje. Maar volgens Einsteins relativiteitstheorie kan niets sneller dan het licht gaan. Dit geldt dus ook geen informatie!

Het artikel van Einstein, Podolsky en Rosen is veel theoretischer van opzet dan dit voorbeeld maar is desondanks goed te lezen: <http://www.drchinese.com/David/EPR.pdf>.