

De scriptie van Hanneke Janssen

KLAAS LANDSMAN

Zoals de meeste lezers van de IMPULS zullen weten, kwam op 11 november 2008 een tragisch einde aan het leven van Hanneke Janssen, die vroeg in de ochtend werd overreden door een naar rechts afslaande vrachtwagen. Hanneke was pas 26 en was kort daarvoor, op 3 oktober, cum laude afgestudeerd in de theoretische fysica. Omdat zowel in de vox als in De Gelderlander al is stilgestaan bij haar voorbeeldige persoonlijkheid, zou ik hier iets willen zeggen over haar afstudeerwerk.

Terugkijkend is de presentatie van deze film een van de leukste dingen die ik tot nu toe op de RU gedaan heb, en ik ben Hanneke daar ook nog steeds dankbaar voor.

Ons eerste contact dateert uit 2005, toen Hanneke als 'expositieaanjager' en filmprogrammeur bij de programmeringscommissie van Cultuur op de Campus werkte. Het idee was dat iedere maand een medewerker van de universiteit zijn of haar favoriete film zou inleiden. Ik hoorde van een collega van Hanneke uit die commissie dat ze iedere keer weer een zekere schroom moest overwinnen om mensen daartoe te benaderen, ook bij mij dus, maar daar was niets van te merken. Ze kwam langs op mijn kamer in de oudbouw en ik herinner me dat het meteen erg gezellig was. Iedere hoogleraar is overbelast, maar hier kon ik geen nee op zeggen. Mijn (ware en oprechte) protest dat ik nooit naar de film ga of televisie kijk

en dus niets te bieden zou hebben, wist Hanneke op een handige manier te pareren, waardoor we er uiteindelijk op uit kwamen dat ik de verfilming van het toneelstuk *Kopenhagen*¹ zou inleiden. Dit onderwerp raakte ook aan de kern van haar eigen belangstelling: het stuk gaat over Bohr en Heisenberg, die een soort vader-zoon relatie hadden en beiden ook veel nadachten over de filosofie van de natuurkunde. Sterker nog, bijna iedere discussie over de filosofische grondslagen van de kwantummechanica gaat wel terug op een gedachte van een van deze twee. Mede door de grote intensiteit van hun beide persoonlijkheden, mede door hetgeen op het spel stond² was hun verstandhouding gespannen, een situatie die verscherpt werd door de Tweede Wereldoorlog. Daarin was de half-joodse Bohr inwoner van het bezette Denemarken, en Heisenberg een loyaal burger van Nazi-Duitsland, die ook nog eens onderzoek deed naar een mogelijke atoombom. Over deze spanningen gaat de film. Terugkijkend is de presentatie van deze film een van de leukste dingen die ik tot nu toe op de RU gedaan heb, en ik ben Hanneke daar ook nog steeds dankbaar voor.

Een jaar later kwam ik haar weer tegen, maar nu als afstudeerster. Ze had een deel van haar Master in Utrecht gevolgd, en wel rond de filosofische grondslagen van de kwantummechanica. Deze specialisatie wordt in Nederland slechts in Utrecht aangeboden en was Hanneke op het lijf geschreven: filosofisch maar geen gezwets, abstract maar niet heel wiskundig, natuurkundig maar niet alleen formules. Mede omdat ze toch in Nijmegen wilde afstuderen, mede omdat ik zelf de grondslagen van de na-

¹Toevallig komt het begin 2009 op de Nederlandse Bühne.

²Niets minder dan de 'Compositie van de Wereld'.

tuurkunde als hobby heb en daar soms ook professioneel iets mee doe, werd ze uiteindelijk gezamenlijk door Jos Uffink in Utrecht en door mij in Nijmegen begeleid.

Ze begreep veel meer dan ze zelf dacht of wilde toegeven, haar werk was iedere keer niet alleen beter dan de vorige keer, maar werd ook naar absolute, professionele maatstaf langzamerhand van topniveau.

Een aantal eigenschappen van Hanneke werden in de loop van de tijd duidelijk. Allereerst de zeer hoge kwaliteit van zowel het ingeleverde werk als haar mondelinge commentaren daarop. Haar schriftelijke Engels, bij de meeste studenten een zwak punt, was vanaf het begin vrijwel perfect. Haar begrip van de kwantummechanica was groot, maar niet perfect: niemand begrijpt deze theorie echt. Zij niet, ik niet, Bohr niet. Het goede aan Hanneke was echter dat haar eigen onbegrip niet verdoezeld werd, zoals bij mensen als Bohr en misschien in mindere mate ook bij mijzelf, maar bijna uitgangspunt van iedere discussie was. Daarin schoot ze naar mijn inschatting echter door: ze begreep veel meer dan ze zelf dacht of wilde toegeven, haar werk was iedere keer niet alleen beter dan de vorige keer, maar werd ook naar absolute, professionele maatstaf langzamerhand van topniveau.

Haar scriptie *Reconstructing Reality* gaat over *decoherentie*. Dit is een poging om in één klap alle problemen van de kwantummechanica op te lossen, met name het zogenaamde meetprobleem en het algemenere probleem

om de klassieke wereld die wij³ waarnemen uit de kwantumtheorie af te leiden. De eerste suggesties in deze richting gaan terug tot Heisenberg, later leverden ook de minder bekende fysici Joos en Zeh bijdragen, maar de grote voorvechter van deze aanpak is Wojciech Zurek, een in Los Alamos werkzaam fysicus van Poolse afkomst. Vooral zijn artikel *Decoherence and the transition from quantum to classical*⁴ was zeer invloedrijk. De scriptie gaat dan ook voornamelijk over diens ideeën en kan worden gezien als een vernietigende kritiek daarop. Dit is opmerkelijk, omdat de meeste fysici die zich überhaupt met grondslagenproblemen bezighouden denken dat Zurek deze problemen heeft opgelost, of tenminste hard op weg is om dat te doen. Hanneke laat van dergelijke pretenties niets heelen.

Het meetprobleem is als volgt. Stel je hebt de observabele

$$s = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

van een 2-level systeem S , met eigentoestanden

$$|1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{en} \quad |-1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Een meting van s houdt in dat het systeem S wordt gekoppeld aan een macroscopisch apparaat A , zodanig dat de wisselwerking van S en A de toestand $|1\rangle$ van S overvoert in een toestand $|1\rangle \otimes |1\rangle$ van $S + A$, terwijl $|-1\rangle$ tot een toestand $|1\rangle \otimes |-1\rangle$ leidt. Hierbij drukt de toestand $|\pm 1\rangle$ van A uit dat een flinke wijzer een flink groot getal ± 1 aanwijst. De lineariteit van

³Buiten het laboratorium!

⁴*Physics Today* **44** (no. 10), 36-44; zie ook een update van dit artikel op arXiv.org/quant-ph/0306072

de Schrödingervergelijking, die dit meetproces wordt geacht te beheersen, dwingt dan de conclusie af dat de begintoestand

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle + |-1\rangle)$$

van S wordt overgebracht in

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle \otimes |1\rangle + |-1\rangle \otimes |-1\rangle).$$

In werkelijkheid zien we een dergelijke “uitkomst” van een meting echter nooit: we zien ofwel $|1\rangle \otimes |1\rangle$, ofwel $|1\rangle \otimes |-1\rangle$. Een dramatische illustratie van dit “meetprobleem” is Schrödinger’s kat, waarbij $|1\rangle$ een levende en $|-1\rangle$ een dode kat is. Wat zou het dan moeten betekenen dat de kat in een superpositie van een levende en een dode toestand is? De algemene vraag is: hoe komt het dat er ten eerste een welbepaalde verzameling mogelijke uitkomsten van een meting is,⁵ en ten tweede dat een concrete meting ook één element van deze verzameling als uitkomst oplevert?

Het basisidee van decoherentie, dat deze vraag beweert te beantwoorden, is eenvoudig. Er wordt een derde systeem in beschouwing genomen, genaamd de “omgeving” E . Zurek en de zijnen beweren dan dat bij een realistische meting ook de omgeving wordt gecorreleerd aan het meetapparaat, en wel zo dat $|1\rangle$ evolueert in een toestand $|1\rangle \otimes |E_1\rangle$ van $A + E$, en $|-1\rangle$ in $|-1\rangle \otimes |E_{-1}\rangle$. Hierbij zijn $|E_1\rangle$ en $|E_{-1}\rangle$ orthogonaal. Het geheel $S + A + E$ komt dan door de meting van de begintoestand $|\Psi\rangle \otimes |E\rangle$, waar $|E\rangle$ een generieke begintoestand van de omgeving is, in een eindtoestand

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle \otimes |1\rangle \otimes |E_1\rangle + |-1\rangle \otimes |-1\rangle \otimes |E_{-1}\rangle).$$

⁵In dit geval de wijzerposities $\{1, -1\}$.

Als je deze toestand nu weer beperkt tot $S + A$, wiskundig door het nemen van het partiële spoor over E , dan is het netto effect van de omgeving dat de zuivere toestand

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle \otimes |1\rangle + |-1\rangle \otimes |-1\rangle)$$

wordt omgetoverd in de gemengde toestand $\rho = \frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_{-1})$, waarin $\rho_{\pm 1}$ de projectie op $|\pm 1\rangle \otimes |\pm 1\rangle$ is. In woorden: de zuivere toestanden $|\pm 1\rangle \otimes |\pm 1\rangle$ komen ieder met kans $1/2$ in ρ voor en in tegenstelling tot de zuivere toestand $\frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle \otimes |1\rangle + |-1\rangle \otimes |-1\rangle)$ is er in ρ geen interferentie tussen de termen $|1\rangle \otimes |1\rangle$ en $|-1\rangle \otimes |-1\rangle$.

Als je er goed over nadenkt, lost dit scenario het meetprobleem echter allerminst op: het maakt het zelfs erger! Vroeger kon men nog de illusie koesteren dat het probleem van Schrödinger’s kat beperkt was tot het laboratorium, waar men zijn uiterste best moest doen om dergelijke superposities überhaupt te maken. Nu blijkt⁶ dat het heeal één groot Monster van Schrödinger is, waarin voortdurend nieuwe superposities ontstaan. Pas als we ons tot een klein deelsysteem beperken door het nemen van allerlei partiële sporen, verdwijnen de problematische superposities weliswaar in onze ogen, maar in werkelijkheid, ontologisch zeggend, zijn ze er wel degelijk. Het doet denken aan een pyramidefonds: de inzet wordt voortdurend verhoogd, de superposities worden alsmaar groter, en uiteindelijk stort het hele scenario in en verdwijnt de bedenker met pek en veren in de gevangenis.

Het kan natuurlijk zo zijn dat de klassieke wereld⁷ uitsluitend in onze ogen bestaat,

⁶Als tenminste het begin van het decoherentiescenario klopt.

⁷In de bovenstaande discussie gemanifesteerd door het verschijnsel dat een meting één enkele uitkomst heeft.

en ontologisch dus een illusie is. Sterker nog, ik denk op grond van uitvoerige studies van de klassieke limiet van de kwantummechanica dat dit het geval is. Ook Zurek en zijn volgelingen zijn deze mening toegedaan, zij het op grond van hun eigen decoherentietheorie. Maar ook als je deze diepzinnige kentheoretische mening deelt, helpt decoherentie je niet om de illusie van de klassieke wereld te verklaren. Zoals Hanneke in detail laat zien, leidt het nemen van het partiële spoor niet tot het gewenste resultaat en geeft dit in het bijzonder geen verklaring voor het optreden van individuele meetuitkomsten. Sterker nog, zelfs de conclusie dat er dan tenminste een verzameling van "klassieke" meetuitkomsten moet zijn is volgens haar twijfelachtig. In feite blijken vrijwel alle resultaten waardoor decoherentie in eerste instantie echt een doorbraak leek te zijn, gebaseerd te zijn op impliciete aannamen, die net zo goed buiten dit scenario om kunnen worden gedaan. Dergelijke aannamen vormen niets anders dan een interpretatie van de kwantummechanica in de gebruikelijk zin, zoals de Kopenhaagse Interpretatie, de Many Worlds Interpretatie, de Many Minds Interpretatie, enzovoort. Dergelijke interpretaties worden in de literatuur dan ook vrolijk met decoherentie gecombineerd, zonder dat men beseft dat het laatste dan overbodig is. Overigens maakt Hanneke in haar scriptie en passant ook nog gehakt van de Many Worlds Interpretatie, en dan met name van het werk van de meest prominente voorvechter daarvan in de persoon van David Wallace. Mijn eigen mening is dat we gewoon terug moeten naar de Kopenhaagse Interpretatie, maar daar heb ik Hanneke helaas nooit van kunnen overtuigen.

De conclusie is dat decoherentie geen enkel probleem uit de grondslagen van de kwan-

tumtheorie oplost. Deze theorie is en blijft een prachtig receptenboek, waarmee je *onder de aanname dat metingen uitkomsten hebben* al het mogelijke uit kunt rekenen. Maar dat kon ook al zonder decoherentie! Het is natuurlijk wel zo dat de interactie tussen systeem of meetapparaat en omgeving niet zo makkelijk verwaarloosd mag worden als dat in het verleden gebeurde, en dat decoherentie op dat vlak interessante modellen biedt. Met de grondslagen van de kwantummechanica heeft dat echter weinig te maken.

Tot slot wat literatuur. Een kritiekloze omarming van decoherentie, die niettemin interessant is vanwege de getrouwe weergave van het werk van Zurek en in het bijzonder dankzij de vele modellen die er in staan, is het recente boek *Decoherence and the Quantum-To-Classical Transition* van Maximilian Schlosshauer⁸. Veel beter op grondslagengebied is *The role of decoherence in quantum theory* door Guido Bacciagaluppi in de fantastische online *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, zie <http://plato.stanford.edu/archives/win2004/entries/qm-decoherence/>.

Maar het beste is uiteraard Hanneke's scriptie *Reconstructing Reality*, die op het internet te vinden is onder de volgende adressen:

- <http://www.math.ru.nl/~landsman/scriptieHanneke.pdf>
- <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00004224/>

⁸Springer, Berlin, 2007.