



Kat in de zak

DE PARADOX VAN SCHRÖDINGER IS NOG ALTIJD ONOPGELOST

Eindelijk begint de natuurkunde te ontwaken uit de nachtmerrie van de quantummechanica. Katten die dood en levend zijn: het is een vertoning die de zin van de wetenschap aan de orde stelt.

F.A. Muller

IN 1935 ZIT HET natuurkundig genie van deze eeuw, zesenvijftig jaar oud, op een bankje in Princeton, gevlucht uit Duitsland voor het leven. Het lijkt wel of het in zijn hoofd onophoudelijk bliksemt, want zijn grijze manen wijzen naar alle sterren aan het firmament. Dan geeft Albert Einstein een brul, die tot op de dag van vandaag nagalmt. Deze brul inspireert een bevriend natuurkundige in ballingschap te Oxford, Erwin Schrödinger, eveneens gevlucht uit Duitsland, ook een oorverdovende brul te slaken. Beide brullen waren gericht tegen de quantummechanica.

De quantumtheorie was begin deze eeuw begonnen als een atoommodel ter verklaring van het verschijnsel dat ieder chemisch element licht uitzendt van slechts enkele zeer bepaalde kleuren. Sindsdien was de quantumtheorie gestadig de gehele fysische werkelijkheid aan het veroveren. Het wiskundig genie van deze eeuw, Johnny von Neumann (wellicht het meest bekend als de ontwerper van de elektronische computer), had in *Grundlagen der Quantenmechanik* (1932) een axiomatisch paleis

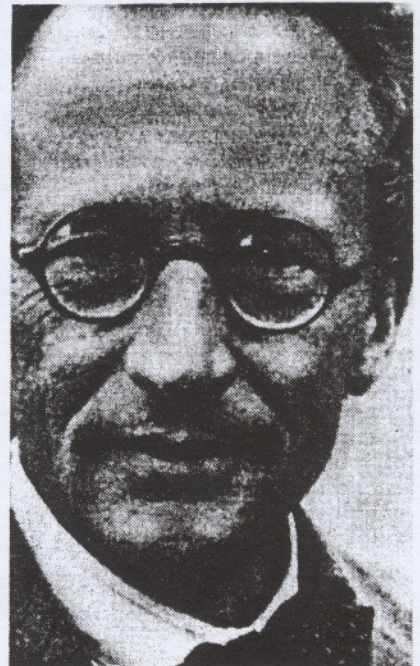
Wetenschap

gebouwd waarin de theorie nog steeds resideert. In dit quantummechanisch paleis neemt Schrödingers vermaarde golfvergelijking een prominente plaats in, waarvoor hij in 1933 de Nobelprijs had ontvangen. Ook Einstein had zijn Nobelprijs gekregen voor een quantumtheoretische hypothese, namelijk dat licht bestaat uit afgepaste energiepakketjes (fotonen). Toch waren beiden ervan overtuigd dat de quantummechanica niet het laatste woord kon zijn over de fysische werkelijkheid, niettegenstaande het succes van het quantummechanische rekenrecept.

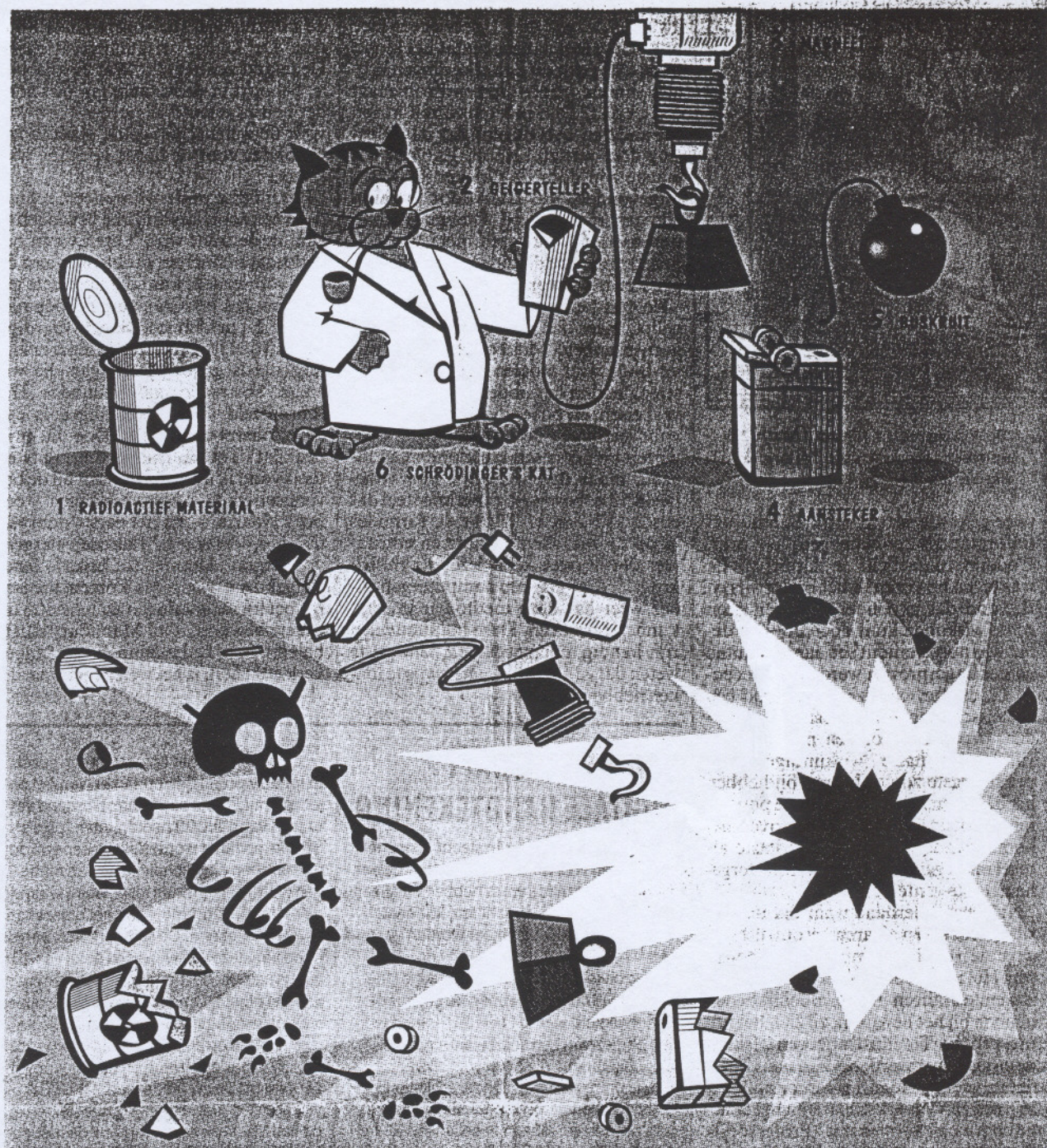
Einstein en Schrödinger waren beiden hoogleraar aan de Universiteit van Berlijn, respectievelijk sinds 1913 en 1927, tot aan de nationaal-socialistische machtsovername in 1933. Zij waren geestverwanten, met een gedeelde belangstelling voor de filosofie en de grondslagen van de natuurkunde. Vaak hadden zij van gedachten gewisseld over de relativiteitstheorie, de quantummechanica, Schopenhauer, Kant, en andere ditjes en datjes. Wanneer commentatoren van Kant ter sprake kwamen, had Einstein gewezen naar de aanglijnde hondjes van de bourgeoisie op de Kurfürstendamm, die hun poot overal tegen optillen.

De brul van Einstein, die verscheen op 15 mei 1935 in het tijdschrift *The Physical Review*, is een magistraal gedachten-experiment dat bekend staat als de *Einstein-Podolsky-Rosen paradox* (in 1982 zou het uitgevoerd worden

Erwin Schrödinger (1887-1961)



in het laboratorium door de Franse experimentator Alain Aspect). Ofschoon het doel van Einstein was de beschamende onvolledigheid van de quantummechanica aan het licht te brengen, kijkt men tegenwoordig tegen de paradox aan als de ontdekking van de quantummechanische *onscheidbaarheid*: de delen van samengestelde fysische systemen kan men niet onafhankelijk van elkaar maken door ze van elkaar te scheiden en slechts naar hun individuele geschiedenis te kijken (in alle andere natuurkundige theorieën kan dat wel).



De kat van Schrödinger en het buskruit van Einstein: volgens de quantummechanica is geen van deze twee gevallen werkelijkheid zolang we niet kijken. Wat er wel werkelijk is, dat weet niemand, ook natuurkundigen niet.

ILLUSTRATIE RIK VANSCHAGEN

Volgens de quantummechanica is het mogelijk dat wat ik hier doe *ogenblikkelijk* repercussies heeft voor wat zich, laten we zeggen, aan de andere kant van het heelal afspeelt. Einstein noemde dit een 'spookachtige werking op afstand'. Het *lokaliteitsprobleem* luidt: verzijn hiervoor een bevredigende verklaring die niet strijdig is met de quantummechanica en ook niet met de relativiteitstheorie (die zegt dat niets sneller kan reizen dan het licht: in vacuüm 300.000 kilometer per seconde). Het ziet er naar uit dat het lokaliteitsprobleem de pensioengerechtigde leeftijd zal bereiken, in het jaar van de eeuwende, want anno 1997 rapporteren we: onopgelost.

QUANTUM SPRONGEN

In de quantummechanica stelt men de toestand van een fysisch systeem (atoomkern, atoom, elektron, etc.) wiskundig voor door *vectoren*. In Schrödingers golfmechanica (een veelgebruikte tak van de quantummechanica) zijn deze vectoren golffuncties die men, in navolging van Schrödinger, aanduidt met de Griekse letter *psi*. Vectoren kan men superponeren ('optellen'), dus kan men een nieuwe quantumtoestand krijgen door verschillende bestaande toestanden te superponeren.

Dit *superpositiebeginsel* heeft vervaagende consequenties. Op 8 augustus 1935 beschreef Einstein aan Schrödinger het volgende gedachten-experiment: "Het systeem is een stof in labiel chemisch evenwicht, zeg een lading buskruit, die door middel van inwendige krachten spontaan kan ontploffen, en heeft een gemiddelde levensduur in de orde van grootte van een jaar. In beginsel laat zich dit gemakkelijk quantummechanisch beschrijven. Aanvan-

kelijk karakteriseert jouw *psi*-functie een voldoende goed gedefinieerde macroscopische toestand. Jouw vergelijking zorgt er echter voor dat dit na verloop van een jaar niet langer het geval is. De *psi*-functie beschrijft dan veel meer een mengsel van het reeds ontplofte en nog niet ontplofte buskruit. Geen interpretatiekunstje kan deze *psi*-functie omtoveren in een toereikende beschrijving van de werkelijke stand der zaken; in werkelijkheid is er niets tussen ontploft en niet-ontploft."

De vlammebriefwisseling met Einstein in de zomer van 1935 en de verwarring die het artikel van Einstein, Podolsky en Rosen overal zaaide, inspireerden Schrödinger tot het schrijven van twee prachtige artikelen. In hetzelfde jaar (1935) verscheen eerst een dubbeldekker in *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, waarin Schrödinger het quantummechanische toestandsbegrip analyseerde en het befaamde begrip *verstrengelde toestand* introduceerde, en daarna, in

Die Naturwissenschaften, een indringend overzichtsartikel over de toenmalige stand van zaken in de grondslagen van de quantummechanica. Daarin verving Schrödinger het buskruit van Einstein door een hoeveelheid radioactief materiaal, stopte dit met een kat in een 'helse machine' zo dat wanneer een Geigerteller het verval van een radio-actieve atoomkern registreert, een hamer een kolpje blauwzuur stukslaat waardoor de kat de gifdood sterft. Schrödinger: "De *psi*-functie van het totale systeem geeft een uitdrukking voor deze toestand waarin, in gelijke mate, de levende en de dode kat zijn *sit venia verbo* vermengd of uitgesmeerd."

Vijftien jaar later was Einstein alweer vergeten dat het zijn idee was. In een brief van 22 december 1950 aan Schrödinger schreef hij over 'hedendaagse natuurkundigen': "Zij geloven dat de quantummechanica een beschrijving geeft van de werkelijkheid, en zelfs een *volledige* beschrijving; deze interpretatie wordt echter elegant weerlegd door jouw systeem van een radio-actieve atoomkern + Geigerteller + versterker + lading buskruit + kat in een doos, waarvan de *psi*-functie zowel de levende kat als de aan stukken geblazen kat bevat."

Men neme voor het radio-actieve materiaal, zeg, Thorium-228; deze atoomkern vervalt in Radium-224 door uitstoting van een Heliumkern (dit vervalproces heeft een halfwaardetijd van bijna 23 maanden). In het allereenvoudigste quantummechanische model van deze situatie kennen we aan ieder deelsysteem slechts twee mogelijke toestanden toe: voor de Thoriumkern de begintoestand (waarin het nog niet is vervallen) en de vervaltoestand, voor de Geigerteller de begintoestand en de toestand waarin het een Heliumkern heeft geregistreerd, voor de lading buskruit ontploft en nog-niet-ontploft, en voor de kat levend en dood. Dit levert $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ mogelijke combinaties. De toestandsvector *psi* van het systeem is in het algemeen in een superpositie van deze zestien elkaar uitsluitende mogelijkheden. Deze superpositie bevat volslagen absurde termen, zoals: Thoriumkern *nog niet* vervallen + Geigerteller heeft *wel* geklikt + buskruit is *niet* ontploft + kat is dood. Dit gedachten-experiment illustreert het *werkelijkheidsprobleem*: hoe dienen we deze wiskundige superpositie fysisch te begrijpen? Hoe is het mogelijk dat de Thoriumkern wel en nog niet een Heliumkern heeft uitgestoten? Hoe kan de buskruitbom wel en niet ontploft zijn? En als klap op de vuurpijl: hoe kan een kat tegelijk levend en dood zijn? Einstein en Schrödinger waren ervan overtuigd dat in werkelijkheid het systeem slechts in één van deze twee toestanden is: de kat leeft, indien de Thoriumkern nog niet is vervallen, *of* de kat is dood, indien de Thoriumkern wel is vervallen. Doordat de quantummechanica niet zegt in welke toestand de kat is, is

zij derhalve een *onvolledige* theorie, aldus Einstein.

Von Neumann forceerde consistentie tussen theorie en waarneming (we zien immers nooit een kat die dood en levend tegelijk is) door zijn *projectiepostulaat*: zodra we kijken — of algemener gezegd, zodra we een meting verrichten — dan, *hopla*, springt de toestandsvector terstond naar één van de twee mogelijke termen! We kunnen het werkelijkheidsprobleem dus niet oplossen door gewoon even te kijken wat er aan de hand is, dat wil zeggen door het experiment echt uit te voeren, want zodra we dat doen, springt de toestand naar één van de twee mogelijkheden. Maar

OM TE WETEN HOE DE

WERELD VAN EEN

ATOOMKERN ERUIT

ZIET, ZOUDEN WE ZELF

EEN ATOOMKERN

MOETEN ZIJN

wat is er nou aan de hand wanneer we *niet* kijken? Soms werd het Schrödinger te kwaad: "Als we blijven doormekken over die verdomde quantumsprongen, dan heb ik er spijt van dat ik me er ooit mee heb ingelaten."

Intussen zitten de experimentatoren niet stil. Vorig jaar werd in Boulder (Colorado) een Beryllium-ion (een klontje van vijf neutronen, vier protonen en drie elektronen) in een superpositie gebracht. In Parijs brachten Franse natuurkundigen enkele microgolf-fotonen, opgesloten in een trilholtje van een centimeter, in een superpositie en zonden er een speciaal geprepareerd atoom langs, als een muis die kijkt in welke toestand de kat zich bevindt (*Physical Review Letters*, 9 december 1996). Het zij opgemerkt dat men een

beetje overdrijft om in dit geval van een 'Schrödinger-kat-toestand' te spreken: enkele atomen maken nog geen kat, die bestaat uit grofweg 10^{26} atomen. In weerwil van wat men nogal eens denkt, lossen zulke experimenten niets op. Integendeel, zij maken het werkelijkheidsprobleem urgenter.

In zo verre leerboeken over de quantummechanica aandacht besteden aan het werkelijkheidsprobleem, presenteren zij de standaardoplossing, waarbij meestal de naam van Niels Bohr valt. Deze oplossing bestaat, grofweg, uit een mijmering over ons kenvermogen en een positivistisch gebod.

Het positivistisch gebod luidt: wat gij niet ziet, daarover zult gij zwijgen. De waarnemingen en niets behalve de waarnemingen. De quantummechani-

ca zwijgt over wat er aan de hand is wanneer we geen metingen verrichten; ze is een theorie die uitsluitend gaat over meetuitkomsten en verspreidt zodoende een positivistische geur. Maar wie een willekeurig leerboek over de quantummechanica openslaat, ziet de bladzijden overlopen van elektronen, quarks, neutrino's, straling, tijd, energie, waterstofatomen, et cetera, kortom allemaal dingen die we niet kunnen zien, in regelrechte overtreding van het positivistische gebod. En in *The Force of Symmetry* (1995) druk de Leidse sterrenkundige Vincent Icke, na 'realisten' die de werkelijkheid achter de waarneembare verschijnselen zoeken te hebben verketterd, ons expliciet op het hart dat wij de ruimte en het vacuum moeten opvatten als gewone fysische objecten met eigenschappen, net als boeken, bielen, bomen en bavianen. Natuurkundigen zijn kentheoretische zedenpredikers die 's nachts vaste klant zijn op de wallen.

Naast het positivistische gebod is de andere component van de standaardoplossing van het werkelijkheidsprobleem een interdisciplinaire mijmering. Eerst vertelt men een verhaal over hoe onze intuïtie is toegespitst op — en evolutionair is ontwikkeld uit — een omgeving die bestaat uit macroscopische objecten met vaste eigenschappen: biggen, bedden, bussen, bloembollen, et cetera. Wanneer wij vragen hoe een superpositie van een radioactieve atoomkern fysisch te begrijpen is, dan willen we eigenlijk de microscopische werkelijkheid in de sjablonen van onze intuïtie persen. Wij behoren ons bescheiden op te stellen en onze plaats in natuur leren te aanvaarden. Om te weten hoe de wereld van een atoomkern eruit ziet, zouden we zelf een atoomkern moeten zijn. En dat zijn we nu eenmaal niet. Volgens Bohr was de 'klassieke taal' niet van toepassing in het domein van het bijzonder kleine. En hiermee zijn we ongemerkt in de epistemologie (kentheorie) belandt, de tak van wijsbegeerte die onderzoekt onder welke voorwaarden kennis mogelijk is.

Deze redenering is een eigenaardige cocktail van kentheorie, amateurpsychologie, fysica en taal filosofie. Einstein schreef op 17 juni 1935 aan Schrödinger dat hij Bohr beschouwde als "een Talmoedische wijsgeer" en omschreef diens Kopenhaagse interpretatie van de quantummechanica als "een in epistemologie gedrenkte orgie". Het is een enigszins onthutsend feit dat natuurkundigen, de meest exacte onder de wetenschappers, dit placebo generaties lang zonder morren hebben geslikt. Natuurlijk zijn er ook beroemde uitzonderingen uit de generatie van na Einstein en Schrödinger. In 1976 zei Murray Gell-Mann, bij de aanvaarding van de Nobelprijs voor zijn quarktheorie: "Niels Bohr heeft een gehele generatie natuurkundigen gehersenspoeld met het geloof dat de problemen vijftig jaar geleden zijn opgelost."

Belangrijk is dat het gedachten-experiment van de buskruitkat zich *niet* tot de microscopische werkelijkheid beperkt, alwaar onze macroscopisch geketende intuïtie niets te zoeken heeft, maar in de macroscopische wereld van bommen en katten. Zoals Schrödinger schreef in zijn kat-artikel: "De essentie van deze voorbeelden is dat een onbepaaldheid die zich aanvankelijk beperkt tot atomaire afmetingen, wordt omgezet in een kolossale onbepaaldheid, die zich dan door een directe waarneming opheft." Dit door de plotselinge interventie van het projectiepostulaat.

INCOHERENTIE

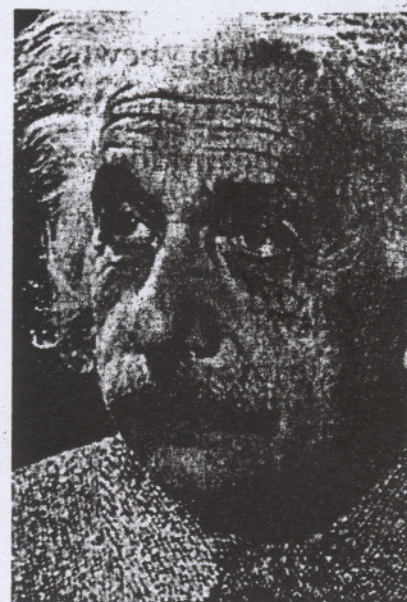
De meeste natuurkundigen kijken de kat uit de boom. Het lijkt of zij zich er niet van vergewissen dat dit probleem rechtstreeks in verband staat met de vraag naar de zin van de wetenschap. Waarom bouwen natuurkundigen miljoenen verslindende deeltjesversnellers en brengen zij miljoenen verslindende telescopen in een baan om de aarde? Om iets te weten te komen over de fysische werkelijkheid, hoe voorlopig ook, of slechts om te controleren of zij de getallen van tevoren kunnen uitrekenen die deze gigantische meetapparaten als meetuitkomst aanwijzen? Volgens positivisten het tweede: het doel van de natuurkunde is het organiseren van zintuiglijke indrukken. De verschijnselen proberen te verklaren en de fysische werkelijkheid trachten te begrijpen die verantwoordelijk is voor de waarneembare verschijnselen, dat is voor de positivist verderfelijke metafysica, betekenisloos gebral. Maar is niet juist de idee dat er een microscopische werkelijkheid bestaat die ons voorstellingsvermogen tart precies wat de quantummechanica zo fascinerend maakt? Schrödinger verklaarde in zijn *Suche nach dem Weg* (1925) over het positivisme: "Het is een feit (laten we onszelf recht in de ogen kijken) dat *alleen* dit doel onvoldoende is om het onderzoek gaande te houden in welke tak van wetenschap dan ook."

Het werkelijkheidsprobleem van de quantummechanica is dus niet los te zien van de vraag wat de zin is van de zuivere natuurkunde-beoefening. Wie goed kijkt naar wat natuurkundigen doen en zeggen, ziet dat zij kennis hopen te vergaren, hoe voorlopig ook, over de fysische werkelijkheid die ten grondslag ligt aan het pandemonium van de verschijnselen. De quantummechanica beantwoordt niet aan dit doel, want precies daarover, over de fysische werkelijkheid, zwijgt deze theorie in alle talen. Met de quantummechanica heeft de natuurkunde een kat in de zak gekocht.

Gelukkig kan ik het nieuws brengen dat de natuurkunde langzaam aan het ontwaken is uit de positivistisch-Kopenhaagse nachtmerrie. Of, om het in die neutrale bewoordingen uit te drukken waar de wetenschap verzot op is: de standaardoplossing van het werkelijkheidsprobleem is toe aan een mo-

dernisering. Tal van andere oplossingen van het werkelijkheidsprobleem dan de Kopenhaagse waren erger dan de kwaal: het menselijk bewustzijn zou zich doen gelden in de fysische theorie (Wigner), of het universum zou zich bij iedere meting splitsen (Wheeler), als kanker cel. Sinds een jaar of tien zijn er ook minder extreme voorstellen gedaan, waarvan die van de *voorkeursbasis* het meest lijkt te beloven.

Einstein en Schrödinger worden om de haverklap afgeschilderd als reactionairen die terugverlangden naar het negentiende-eeuwse wereldbeeld van de klassieke natuurkunde. Ammehoela. Gelijk chirurgen hebben zij de begripmatige absurditeiten van de quantummechanica en de incoherenties van de quantumfysicus blootgelegd. Wie goed luistert, kan horen dat thans hun brullen is overgegaan in schaterlachen.

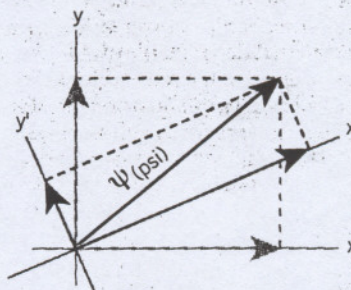


Albert Einstein (1879-1955)

VOORKEURSBASIS

Het minst gekke voorstel om het werkelijkheidsprobleem op te lossen (niet het lokaliteitsprobleem), gaat als volgt. Neem een 'toestandsruimte' met twee dimensies, die kunnen we voorstellen als een plat vlak. We kunnen een willekeurige toestand (vector) ontbinden in een horizontale en een verticale component. De horizontale en verticale vector noemt men tezamen een *basis*. Iedere basis correspondeert met een eigenschap van de kat: horizontaal-verticaal met doodlevend. Het kwadraat van de absolute waarde van de coëfficiënten in de superpositie interpreteert men als de kans dat het systeem naar de bijbehorende term springt bij het verrichten van een meting. De quantummechanica behandelt alle bases op voet van gelijkheid. We vervangen nu het projectiepostulaat door een postulaat dat zegt: er is een *voorkeursbasis*. Indien horizontaal-verticaal de voorkeursbasis is, mogen we met een gerust hart zeggen: de kat leeft of is dood, onafhankelijk van het feit of we kijken. Volgens een stelling van de quantumlogici Kochen en Specker uit 1967 kunnen we dit alleen zeggen voor *alle* bases op straffe van innerlijke tegenspraak. Daarom zijn we gedwongen een voorkeursbasis te postuleren. Maar welke? De omstandigheden van het fysisch systeem bepalen dat. Alle fysische systemen wisselwerken met de omgeving. Volmaakt afgezonderde systemen bestaan alleen in leerboeken, niet in de werkelijkheid; daarom hoeven we van zulke gevallen niet wakker te liggen. Vervolgens knutselt

TOESTANDSRUIMTE



NRC Handelsblad 290397

men een quantummechanisch model in elkaar dat zowel het systeem als de omgeving beschrijft en men slaat aan het rekenen. Dit gebeurt al enige tijd op diverse plaatsen in de wereld. De basis waarin de toestand geen 'kruistermen' heeft, zoals die waarin het buskruit is ontploft en de kat leeft, is de voorkeursbasis. De kruistermen moeten naar nul naderen (dit heet *decoherentie*), anders blijft de mogelijkheid open dat de kat zich in een absurde toestand bevindt en zijn we terug bij af. In tegenstelling tot wat menig natuurkundige schijnt te denken, lost decoherentie op zich zelf niets op. Zonder voorkeursbasis en de stipulering dat de kat de corresponderende eigenschappen echt heeft, blijft de kat branden in het vagevuur.

Kat met negen levens

DE QUANTUMMECHANICA HÉÉFT HELEMAAL GEEN PARADOX

Vincent Icke

QUANTUMMECHANICA is te gek voor woorden. Daarom gebruiken we wiskunde. Maar als je iets wilt uitleggen in plaats van uitrekenen, ben je weer op gebrekkige mensentaal aangewezen. Met dat Trojaanse taalpaard sluipen allerlei onduidelijkheden binnen, en voor je 't weet staat er een hele krantenbladzijdje vol halve waarheden en hele onzin, zoals in het stuk van F.A. Muller ('Kat in de zak', w&o, 29 maart).

Bestaat er zoiets als een 'quantumparadox'? Zeker wel in het hoofd van mensen die onvoldoende beseffen dat zij maar een flinterdun plakje van de fysieke wereld direct kunnen ervaren. Je ziet geen ultraviolet, hoort geen supernova, voelt geen elektron. Zulke 'paradoxen' ontstaan door een beroep te doen op 'gezond verstand', maar dat is een vastgeroest kompas in een gebied dat letterlijk te gek is voor woorden. Het zijn slimmigheidjes die, met hun retorische trucs van het type Achilles-ende-schildpad, thuishoren op de opiniepagina en niet in een wetenschapsbijlage. Het is gebruikelijk dat mensen die onbegrip tot paradox verheffen er beroemdheden bijstelen die het evenmin gesnapt hebben. Liefst natuurlijk Einstein, die het bij het verkeerde eind had (maar die zeker, in zijn eigen woorden, 'het recht had verdiend zich te vergissen'). In de vorige eeuw zei Ernst Mach, toen een wereldberoemd fysicus: "Atomen bestaan niet, want ik kan ze niet zien."

Maar een 'quantumparadox' bestaat (nog) niet in de natuurkunde. Een paradox krijg je als je twee met elkaar strijdige theorieën hebt, of een theorie die strijdig is met de waarnemingen. Geen van beide is het geval: er bestaat heden geen enkel experiment dat strijdig is met de quantummechanica.

Helaas! Want er is niets zo gezond voor de vooruitgang van de fysica als een daverende aanvaring tussen theo-

Over de kat van Schrödinger (w&o, 29 maart) zijn de fysici lang niet uitgepraat. Een 'quantumparadox' bestaat niet, zegt astrofysicus Vincent Icke, geen enkel experiment is strijdig met de quantummechanica. Over de visie van Bohr valt wel degelijk te twisten, reageert F.A. Muller.

rie en experiment, of tussen theorieën onderling. Uiteraard is de QM niet het laatste woord. Nimmer zal er een theoretisch fysicus thuiskomen en tegen haar man zeggen: "Ik kook vanavond wel, schat, de natuurkunde is af." De negen levens van de quantumkat zijn nog niet op, maar ooit wordt het lieve dier begraven. Dan komt er een nieuwe theorie die, dat garandeer ik u, nog veel gekker is.

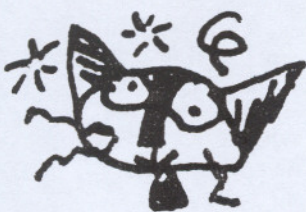
Pas dan zijn we de quantummechanica voorbij. Niet door schijnproblemen zoals die in Mullers artikel, maar door echte, onbegrepen zaken. Misschien zijn die er al: een experimenteel raadsel, zoals het gemeten feit dat de natuur onderscheid maakt tussen links en rechts (CP-asymmetrie). Of een theoretische kraker, zoals het conflict tussen de algemene relativiteitstheorie en de quantumveldentheorie. Maar het zal geen terugkeer zijn naar de klassieke intuïtie.

Intussen besef ik maar al te goed dat QM te gek voor woorden is. Het grootste probleem met theoretische natuurkunde is dat het zo buitensporig vreemd is. Daarom heb ik mijn boek ook geschreven onder een motto van Niels Bohr: "Wie van quantummechanica niet duizelig wordt, heeft er niets van begrepen." In weerwil van al dat gepraat over katten en elektronen hoef je die verbijsterende vreemdheid helemaal niet zo ver te zoeken. Ga 's avonds in een verlichte kamer voor het raam staan. U kunt uw spiegelbeeld in het venster zien. Tegelijkertijd kan iemand die buiten staat u ook zien. Zeer alle-daags, en buitengewoon vreemd. Immers, het licht dat door het venster wordt teruggekaatst, heeft uw gezicht verlaten onder precies dezelfde omstandigheden als het licht dat door het glas naar buiten treedt. U ziet hier met eigen ogen dat ons heelal te gek is voor woorden: dezelfde oorzaken hebben niet altijd dezelfde gevolgen.

Het is alsof het licht een 'keus' heeft of het terugkomt of doorgaat. In de QM zeggen we dat de voortplanting van de lichtdeeltjes verloopt via diverse alternatieven. Zoals Feynman het duidelijkst heeft aangetoond, kan de hele QM worden gezien als een stel rekenregels voor het samenstellen van zulke alter-

natieven. Waarom onze natuur zo in elkaar zit snapt geen mens, maar tot paradoxen leidt dat niet.

Laat ik dan toch maar een paar van Mullers malligheden proberen recht te zetten. Meer details kunt u lezen in mijn boek *The force of symmetry* (Cambridge University Press, 1995). Ten eerste, het stuk van Einstein, Podolsky en Rosen is geen paradox, evenmin als de 'tweelingparadox' een tegenspraak in de relativiteitstheorie is. Het is een voorstel voor een experiment, zoals briljant geanalyseerd door John Bell (zie bijvoorbeeld zijn *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, 1987) en door anderen uitgevoerd. Hoewel de gevonden uitspraken (de zogenoemde 'ongelijkheid van Bell') krankjorum zijn als



NRC HANDELSBLAD



je ze in mensentaal doet, is er geen paradox: hoe gek ook, het experiment klopt met de theorie. Mullers opvatting dat het hier geen 'macroscopisch' experiment betreft, is larie: zo'n laboratorium zie je ècht wel staan! Het hele onderscheid is trouwens nonsens; een neutronenster weegt anderhalf maal zoveel als de zon, maar is toch een quantummechanisch object.

Ten tweede, het is volstrekt vals om de quantummechanische golf functie (ψ) en QM-superposities voor te stellen als een kat die 'tegelijk levend en dood' is. Je moet ψ zien als 'een spel kaarten, dat weliswaar hartenaas en schoppenboer bevat, maar geenszins tegelijk aas en boer' is. Er is een kans van $1/52$ dat je een bepaalde kaart trekt. Om dan te zeggen dat 'de toestandsvector

springt', is een verdraaiing van de theorie. Heb ik klavernegen getrokken, dan zeg ik toch ook niet dat het hele pak kaarten in de nel is veranderd?

De toestand 'springt' niet; dat is mensentaal, en onjuist. Het is anders: door het doen van de meting vervallen bepaalde alternatieven. De meting (of beter: wisselwerking, want 'meting' suggereert apparaten en witte jassen die irrelevant zijn) beperkt het aantal alternatieven die ik in de quantumtoestand moet meenemen. Maar de meting als zodanig brengt niets teweeg (spaar me dus de onzin over de waarnemer die het Heelal 'creëert'). Als ik een waterstofatoom in een bepaalde quantumtoe-



stand aantref, dan is die meting consistent met de opvatting dat dat atoom al sinds de Oerknal in die toestand is geweest. Of niet; dat is onbepaald. Niet omdat de experimentator te lui of te dom is: het is niet *onbekend*, het is *onbepaald*. Met het woord 'onbepaaldheid' (*indeterminacy*) duidde Bohr aan dat sommige combinaties van waarnemingen onmogelijk zijn. Wie dat onaanvaardbaar vindt, leeft helaas in het verkeerde heelal.

Over het sponzige sopje van pseudofilosofie in Mullers stuk kan ik beter zwijgen. De QM behoeft geen 'interpretatie': dat laten we over aan de lezers van Nostradamus. Er is geen 'werkelijkheidsprobleem' en geen enkele fysicus werkt volgens "wat gij niet ziet...". Integendeel, in de veldentheorie is de uitkomst van een proces een som over alle mogelijke tussentoestanden, juist die welke je niet 'ziet' (de 'virtuele' processen).

Een zwamregel als "Het werkelijkheidsprobleem in de QM is dus niet los te zien van de vraag wat de zin is van de zuivere natuurkunde-beoefening" vervult mij met een diepe neerslachtigheid, verwant aan de wanhoop die Bohr moet hebben gevoeld tegenover Einstein. Het is beslist geen toeval dat Flip Jan van Oenen zijn toneelstuk over deze kwestie (*Einstein meets Bohr*) laat uitmonden in een vuistgevecht tussen beide geleerden.

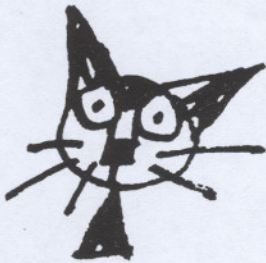


Incoherentie en intolerantie

VISIE BOHR HEEFT VOLWAARDIGE CONCURRENTEN

F.A. Muller

IN MIJN ARTIKEL over de kat van Schrödinger heb ik, net als een wetenschapshistoricus, beschreven hoe het probleem van de kat is ontstaan (uit een briefwisseling tussen twee Duitse bannelingen); vervolgens heb ik vastgesteld, net als een wetenschapsjournalist, dat er onder natuurkundigen absoluut geen overeenstemming bestaat over de oplossing; daarnaast heb ik, als natuurkundige, aan willen geven dat de standaardoplossing van Bohr minder duidelijk en eenvoudig is dan men gewoonlijk stilzwijgend onderstelt (vanzelfsprekend in prikkelende bewoordingen, niet in ambtenarentaal); en ten slotte heb ik, bij wijze van actueel terzijde, iets verteld over een andere oplossing, die aan populariteit wint. Dat is alles. Niettemin is het



voldoende geweest om Vincent Icke in toorn te doen ontsteken.

Het is jammer dat Icke niet uit is op een gedachtenwisseling over een fascinerend onderwerp: onzin, onwaarheid, zwamzin, malligheid, nonsens, larie — niet bepaald de terminologie waarin Bohr en Einstein van gedachten wisselden over dit onderwerp. Volgens Icke horen meningsverschillen thuis “op de opiniepagina” (lees: niet in de wetenschap), moeten we de interpretatie van natuurkundige theorieën overlaten aan Nostradamus, zijn degenen die het *niet eens zijn* met Bohr en Icke “neerslachtigmakende” lieden die het “niet begrijpen”, en, als apotheose, het feit dat het natuurkundig genie van de twintigste eeuw de oplossing van Bohr niet aanvaardde kan slechts betekenen dat “Einstein het niet snapte”, zoals een kleuter niet snapt dat 1997 een priemgetal is. Afkeer van kritiek, de ontkenning van verschillen van inzicht binnen

de eigen gelederen, verkettering van andersdenkenden: het lijkt wel of we de gedachtenwereld van een sektariër binnenwandelen. Dit benepen beeld van de natuurkunde, waarin verschillen van inzicht niet getolereerd worden en Yomanda de interpretatie van de wiskundige symbolen verzorgt, heeft weinig te maken met de natuurkunde zoals ik die ken en liefheb. Bohr en Einstein draaien zich om in hun graven, zoveel is zeker.

(1) Icke is van mening dat het onderscheid tussen micro- en macro-fysische systemen “nonsens” is. Maar Bohr, waar Icke pal voor staat, geloofde dat het onderscheid allerminst nonsens is en zelfs fundamenteel is. (Icke stopt mij in de mond dat ik een laboratorium microscopisch zou vinden — nou ja!) Zelf denk ik dat het onderscheid tussen micro- en macro-fysische systemen niet fundamenteel is, maar ook denk ik dat een gigantisch verschil in het aantal vrijheidsgraden aanleiding kan geven tot zeer uiteenlopend fysisch gedrag.

(2) Icke wil het verrichten van een meting opvatten als een gewone wisselwerking tussen fysische systemen, zoals eveneens alle ingezonden briefschrijvers van vorige week. Dit is evenwel exact de gevolgde weg van de oplossing die ik in het kader als “de minst gekke” aanpreef! *Kritische opmerkingen hierover gericht aan mij zijn dus verkeerd geadresseerd.* Het is overigens, opnieuw, pertinent niet de weg van Bohr, volgens wie het zo is dat indien we een fysisch systeem aanmerken als meetapparaat, daarmee alles anders wordt: het meetapparaat moet klassiek worden beschreven, “de voorwaarden voor de definitie van de typen van voorspelbaarheid op toekomstig gedrag” (Bohr) op het meetapparaat zijn niet vervuld, etc.

(3) Waar Icke bij zijn bespreking van de befaamde ongelijkheid van Bell en het experiment van Aspect volledig aan voorbijgaat, is waar het hun om te doen was: de experimentele toetsing van een verzameling theorieën die men onder de quantummechanica kan schuiven om haar begrijpelijk te maken, in de geest van Einstein. Deze gehele episode was dus gedreven door interpretatieproblemen, het soort van problemen dat Icke overlaat aan Krishnamurti.

(4) Volgens Icke gehoorzamen natuurkundigen niet aan het positivistische gebod ‘wat gij niet ziet, daarover zult gij zwijgen’: met onze zintuigen

ontwaren wij slechts een “flinterdun plakje van de de fysische wereld”. (Neem even nota: blijkbaar interpreteren we allerlei wiskundige symbolen uit fysische theorieën als verwijzend naar de onwaarneembare fysische wereld: hebben we dat geleerd van Raspoetin?) De meeste natuurkundigen zijn van oordeel dat er meer tussen hemel en aarde bestaat dan onze zintuigen kunnen ontwaren, mijzelf niet uitgezonderd. Precies daarom heb ik gewezen op de incoherentie tussen positivisme en fysica. Ter illustratie noemde ik Icke's boek *The Force of Symmetry* (1995), omdat ik daarin de volgende zin tegenkwam: “All it means is that we drop the presumption that we can make statements about things we have not observed.” (blz. 52) Bijgevolg moeten we dan helemaal de onderstelling laten varen dat we iets kunnen zeggen over dingen die we niet eens *kunnen* zien.

Positivistischer kan het niet. Incoherenter kan het ook niet.

(5) Daarenboven is het niet correct dat verwerping van het positivisme en omarming van de fysica de quantumparadoxen doen verdwijnen, in weerwil van wat Icke zegt, want het is juist de omarming van de quantummechanica die problemen oplevert met anti-positivistische beweringen over de onwaarneembare annex niet-waargenomen fysische werkelijkheid. De orthodoxe positivisten kunnen zorgeloos door de quantummechanica heenwandelen. Einstein heeft dat haarscherp ingezien.





Zijn buskruit en de kat van Schrödinger illustreren deze problemen door zich te begeven in een gebiedje in het flinterdunne plakje dat wij wel kunnen zien, maar waar we nog niet gekeken hebben. Dit geeft de gedachten-experimenten hun paradoxale karakter. Ergo, verwerping van het positivisme lost niets op, integendeel, het leidt tot paradoxen, in tegenstelling tot wat Icke beweert.

(6) Icke vergelijkt de quantummechanische toestand met een spel kaarten; een meting correspondeert met het trekken van een kaart. Wanneer we deze kaartspel-vergelijking wiskundig modelleren, en eisen dat het kaartspel zich gedraagt zoals de quantummechanica voorschrijft, dan kunnen we een tegenspraak afleiden. Dit is de sensationele stelling van Kochen en Specker (1967). Icke komt hier dus met iets aanzetten waarvan de onhoudbaarheid precies dertig jaar geleden glashard is aangetoond.

Ten slotte een kanttekening bij "beroemdheden erbij slepen die het evenmin gesnapt hebben". Icke noemt Bell en Feynman. Feynman was van opvatting dat "niemand de quantummechanica begrijpt" en dacht dat onze vertrouwde waarschijnlijkheidsleer eraan moest geloven! Bell verwierp de quantummechanica als ronduit absurd; op verschillende momenten in zijn leven heeft Bell een lans gebroken voor alternatieve theorieën, zoals die van David Bohm (1952) en die van de Italiaanse natuurkundigen Ghirardi, Rimini en Weber (1985). Er zijn dingen in de natuurkunde waar iedereen het over eens

is, zoals over de empirische toereikendheid van de quantummechanica, en er zijn dingen waarover verschil van inzicht bestaat, zoals over de vraag hoe de fysische werkelijkheid in elkaar steekt volgens de quantummechanica.

Het is een onomstotelijk feit dat veel natuurkundigen (en filosofen) zich hebben verdiept in de grondslagen en de interpretatie van de quantummechanica en, net als Einstein en Schrödinger, tot andere conclusies zijn geraakt dan Niels Bohr (Icke is dat ook op enkele punten, alleen hij beseft het niet): De Broglie, Wigner, Gell-Mann (allen Nobelprijswinnaars), Landé, Wheeler, London, Bohm, DeWitt, Hartle, Geroch, Penrose, Deutsch en 't Hooft, om een greep uit de bekendste namen te nemen — die overigens ook onderling weer van mening verschillen. Zij doen dit op basis van argumenten, waar een ieder kennis van kan nemen door hun geschriften te raadplegen.

Volgens Icke zijn het allemaal onwetenden en onwilligen. Het is daarom niet verwonderlijk dat de kritiek van Icke, die niet op de hoogte blijkt van de relevante vakliteratuur, geen standhoudt bij een nadere analyse. Over hoe we de fysische werkelijkheid dienen te begrijpen in het licht van het empirische succes van de quantummechanica, moeten we toch rationeel en geïnformeerd van gedachten kunnen wisselen? Zelfs als het een kwestie van filosofische smaak is, zoals sommigen beweren, dan nog zeg ik, omdat de inzet van het smaakverschil de wereld is waarin wij leven, lachen en huiveren: *tantum de gustibus disputandum!*

