

QUANTUMMECHANICA EN (META)FYSICA

W.M. de Muynck

Beschrijft de quantummechanica alleen maar verschijnselen, en verder niets, of zegt de theorie misschien toch (ook) iets over de realiteit achter de verschijnselen? In een recente discussie in dit blad kiest van Kampen voor de eerste interpretatie die ik zal aanduiden als *instrumentalistisch*, terwijl Hilgevoord een meer *realistische* interpretatie lijkt voor te staan. Zonder nu direct een lans te willen breken voor de realistische interpretatie, wil ik hier toch een paar vraagtekens plaatsen bij van Kampen's "no nonsense" opvatting.

Realisme of instrumentalisme

Uit van Kampen's bijdragen^[1,2] spreekt het heilig anti-metafysisch vuur van het empirisme dat de verschijnselen kiest als de basis van alle wetenschap en dat wars is van alle speculatie over de werkelijkheid achter de verschijnselen. Het gaat, zegt hij, in de quantummechanica niet om de "plaats van het electron" (dat is metafysica), maar slechts om de "resultaten van plaatsmetingen", uitgevoerd met macroscopische meetinstrumenten. Inderdaad hoeven we van de quantummechanica niet méér te eisen dan de beschrijving van de relatieve frequenties van die verschijnselen in onze meetapparaten die we interpreteren als meetresultaten van onze quantummechanische grootheden. In het laboratorium hebben we te maken met twee soorten apparatuur, apparaten die *prepareren*, zoals radioactieve preparaten, gloeikathodes en deeltjesversnellers, en apparaten die *meten*, zoals fotodetectoren en Wilsonkamers. De preparatieapparaten hebben vaak macroscopische instelknoppen die ons in staat stellen verschillende quantumtoestanden te prepareren; de meetapparaten hebben macroscopische "wijzers" (bijv. de sporen in een bellenvat of de stroomstootjes in de fotodetector). Meetresultaten corresponderen met de posities die deze wijzers innemen.

Voor de pure instrumentalist is nòch het meetresultaat, nòch de golffunctie een eigenschap van het object. Zo goed als het meetresultaat (een wijzerpositie) hoogstens een eigenschap is van het *meetapparaat*, zo goed is de golffunctie hoogstens een eigenschap van het *preparatie-apparaat*. Wat dit laatste betreft bevindt de instrumentalist zich tot op zekere hoogte in het goede gezelschap van Bohr, die de golffunctie slechts zag als een *symbolische* representatie van de werkelijkheid, en *geen* beschrijving van de microscopische werkelijkheid als zodanig.

De golffunctie is voor Bohr niet meer dan een boekhoudkundig instrument.

Een instrumentalistische opvatting van de quantummechanica is bestand tegen alle bekende paradoxen zoals die van Schrödinger's kat of EPR. Die doen zich pas gelden als de golffunctie wordt geacht de microscopische realiteit zèlf te beschrijven. Als van Kampen de hier weergegeven instrumentalistische opvatting huldigt, kan hij inderdaad paradox-vrij door het leven.

Maar *is* van Kampen inderdaad zo'n instrumentalist? Dat blijkt niet uit wat hij schrijft. In zijn spraakgebruik beperkt hij zich niet tot preparaties en metingen, maar conformeert hij zich aan het nogal realistische idee dat er iets (dat we "electron" noemen) van het elektronenkanon naar de electronendetector vliegt, ook al hoort daar geen "verschijnsel" bij. Daarmee is de eerste stap op weg naar de metafysica gezet, zij het dat men hier als anti-metafysicus misschien nog de nodige gemoedsrust kan putten uit het idee dat men, als men zou willen, de aanwezigheid van dat "iets" op elk punt van de baan zou kunnen aantonen door daar een detector te plaatsen. Van Kampen gaat echter nog een stapje verder. Zijn microscopische objecten (atomen, electronen) zijn "in" een quantummechanische toestand alsof die toestand daar net zo aanwezig is als dat geacht wordt te gelden voor de grootheden q en p in de klassieke fysica. Mij dunkt, zijn we nu wel erg ver van de verschijnselen afgeraakt, zèlfs al zou men ook hier proberen om de zaak te redden met behulp van metingen die men zou kúnnen doen: die leveren alleen een verschijnsel op corresponderend met een meetresultaat, *niet* corresponderend met de golffunctie.

De hier gesignaleerde problemen die de pure instrumentalist heeft met de interpretatie van de quantummechanische golffunctie staan niet op zichzelf. Ze zijn er de oorzaak van dat de logisch empiristen in de vijftiger jaren de strenge these van het empirisme (waarin gepoogd wordt om *alle* concepten van een fysische theorie te baseren op waarnemingen) hebben vervangen door een meer liberale these (zie bijv. Hempel^[3]). Daarin mogen theoretische termen in de theorie voorkomen die geen direct observeerbare betekenis hebben, mits ze maar op een controleerbare wijze samenhangen met empirisch toegankelijke grootheden. De quantummechanische golffunctie wordt door Hempel genoemd als zo'n theoretische term.

Daarmee is echter nog niets gezegd over de precieze relatie tussen golffunctie en realiteit. Het bovenstaande hoeft nog lang niet te betekenen dat aan de golffunctie een werkelijkheidswaarde kan worden toegekend zoals dat gebeurt in een quantum-realistische interpretatie, waarin een electron min of meer wordt gelijkgesteld met een golfpakket. Het lijkt me zeer onwaarschijnlijk dat van Kampen zo ver wil gaan. Dit blijkt ook uit het feit dat hij vaak aan zijn interpretatie een meer epistemologisch tintje geeft door de golffunctie het object te laten "beschrijven". Dit

taalgebruik sluit aan bij een statistische interpretatie van de quantummechanica waarin de golffunctie wordt geacht niet een individueel object te zijn, maar een *ensemble* van identiek geprepareerde objecten te beschrijven. Daarmee wordt de quantummechanica een soort statistische mechanica die inderdaad in staat is om een aantal paradoxen van het quantumrealisme te omzeilen^[4]. De ensemble-interpretatie is, denk ik, op dit moment de meest gangbare opvatting. De quantummechanische toestandsfunctie wordt hierin opgevat als een (statistische) beschrijving van een *objectieve* microscopische werkelijkheid, *onafhankelijk van enige meting*. Ik weet niet of van Kampen deze laatste interpretatie van de quantummechanica gebruikt. Vast staat in ieder geval wèl dat zijn taalgebruik tamelijk ver af is geraakt van de "verschijnselen".

Het is jammer dat van Kampen geen consequent instrumentalistische terminologie hanteert. Doordat hij, integendeel, meedoet aan het nogal slordige realistische taalgebruik dat door de meeste fysici wordt gebezigd, laat hij ruimte open voor kritiek, die door Hilgevoord^[5] wordt toegespitst op de veel bediscussieerde "interferentietermen" bij het meetproces (de superpositie van de levende en de dode kat). Als de golffunctie niets anders is dan een instrument voor het berekenen van resultaten van metingen, dan hoeft men niet bang te zijn voor interferentietermen. Als Hilgevoord in het bestaan daarvan gelooft, dan rust op hem de taak om aan te geven welk experiment die interferentietermen waarneembaar maakt. Zolang hij dat niet kan, is er niets aan de hand. Van Kampen's beroep op het macroscopische karakter van het meetapparaat (c.q. de kat) voor het onzichtbaar maken van de interferentietermen, is dan ook volstrekt overbodig. En dat is maar goed ook, want in de eerste plaats kennen we *macroscopische* quantumeffecten (supergeleiding) waarin interferentie kennelijk op macroscopische schaal plaatsvindt. In de tweede plaats worden onze meetapparaten naarmate de technologie voortschrijdt steeds kleiner, waardoor de grens tussen microscopische en macroscopische systemen vervaagt.^[6]

Hoe compleet is de quantummechanica?

De door van Kampen gehanteerde definitie van een quantummechanische meting is zeer sterk geënt op de axiomatic van Dirac en von Neumann, waarin een observabele wordt beschreven door een hermitische operator, en waarin het meetresultaat correspondeert met een eigenwaarde daarvan. Deze axiomatic is zodanig dat interferentietermen geen probleem hoeven op te leveren: het meetapparaat wordt geacht zodanig te zijn geconstrueerd dat het correspondeert met een bepaalde hermitische operator, en geen informatie verstrekt over de

kruistermen in de corresponderende representatie (de interferentie-termen). Van Kampen toont de mogelijkheid daarvan aan door middel van een quantummechanische analyse van het meetproces zèlf. De interne consistentie van het geheel wordt beschouwd als evidentie voor de geldigheid van de axiomatic.

Toch moeten we juist nu oppassen, want met interne consistentie is het laatste woord nog lang niet gesproken. De Dirac-von Neumann-axiomatic blijkt slechts een beperkte klasse van experimenten te beschrijven. Een meer algemene klasse van metingen krijgt men als het observabelenbegrip wordt gegeneraliseerd van de hermitische operator tot de zgn. positieve operatorwaardige maat, waarbij quantummechanische waarschijnlijkheden niet langer worden beschreven door de verwachtingswaarden van projectie-operatoren, maar van meer algemene positieve operatoren. Deze generalisatie is niet nieuw^[7,8]. Het wordt echter slechts geleidelijk aan duidelijk dat deze generalisatie experimenten beschrijft die ook echt kunnen worden uitgevoerd en die verschillen van de klasse van experimenten die worden beschreven door de hermitische operatoren van de Dirac-von Neumann axiomatic. Eén voorbeeld is dat van homodyne optische detectie^[9] waarbij een optisch signaal in een Mach-Zehnder-interferometer tot interferentie wordt gebracht met een referentiebundel. Het blijkt dat zo'n meting kan worden opgevat als een gelijktijdige meting van de plaats- en impulsobservabelen^[10]. Binnen het toepassingsgebied van de Dirac-von Neumann axiomatic is dit laatste onmogelijk; het wordt echter mogelijk in het formalisme van de positieve operatorwaardige maten. Ook andere voorbeelden van gelijktijdige meting van incompatibele observabelen zijn inmiddels bekend.^[11]

Problemen van het instrumentalisme

Van Kampen zal met de hier gemelde generalisatie van de quantummechanica geen moeite hebben omdat er een duidelijke relatie is met het experiment. Was die laatste er niet, dan zag het er echter donker uit voor diegene die het waagt om zich bezig te houden met zo iets "metafysisch" als de gelijktijdige meting van incompatibele observabelen. Die kan zich voor de financiering van zijn onderzoek beter tot de wiskundigen of de filosofen wenden. We worden hier geconfronteerd met het dilemma van de empirist/instrumentalist. Hij wil "de" verschijnselen beschrijven. De theorie heeft slechts waarde voorzover deze de relatie tussen de verschijnselen correct beschrijft. De theorie moet zo weinig mogelijk metafysica bevatten. Theorie en experiment krijgen dan echter wèl de neiging om in een zelfgenoegzaam kringetje te gaan ronddraaien: het Bohr'se compleetheidsdogma van de quantummechanica. De theorie wordt per definitie "waar" c.q. de compleetst

mogelijke beschrijving (Einstein's "tranquilizing philosophy"); experimenten die niet aan de theorie voldoen zullen wel verkeerd zijn uitgevoerd, en worden genegeerd. Aan de andere kant is het zonder experimentele aanleiding ook niet toegestaan om het theoretisch kader te verruimen, want dit introduceert metafysica. Het is dan maar het veiligst om binnen het kader van de gangbare theorie te blijven. Weliswaar zal men dan nooit het genoegen smaken iets echt verrassends te vinden dat niet door de gangbare theorie wordt beschreven; men loopt dan echter ook geen gevaar onder van Kampen's anti-metafysische hamer te worden geplet.

Toch is het een bekend methodologisch gegeven dat men moet oppassen met het primaat van de verschijnselen. Een aardig voorbeeld daarvan wordt gemeld door Franklin^[12]. Experimenteel was pariteitsschending vrijwel zeker reeds in 1928 waargenomen door Cox c.s. en in 1930 door Chase^[13]. Daar er op theoretische gronden toen echter geen aanleiding was om te geloven in een echte links-rechts-asymmetrie, werd algemeen aangenomen dat de waargenomen asymmetrie een artefact van het experiment was. Pas nadat in 1956 Lee en Yang hun theorie hadden geponeerd ter oplossing van de zgn. θ - τ -puzzel, kon de pariteitsschending als zodanig ook experimenteel herkend worden. In dit voorbeeld lijkt eerder de theorie primair dan de verschijnselen. Een ander voorbeeld met soortgelijke strekking treffen we aan in de vroegste ontwikkelingsfase van de quantummechanica zelf, waar Heisenberg zich de vraag stelt:^[14] "Ist es vielleicht so, dass nur solche experimentelle Situationen überhaupt in der Natur vorkommen, die in dem mathematischen Formalismus der Quantentheorie auch ausgedrückt werden können?" Aan deze allesbehalve empiristische vraagstelling danken we de onzekerheidsrelaties van Heisenberg, die op hun beurt weer aan de basis liggen van de Dirac-von Neumann axiomatic.

Deze voorbeelden illustreren één van de grote problemen van het empirisme, nl. de afhankelijkheid van de zgn. "harde feiten" van de theoretische context. Wat een quantummechanische meting is, wordt slechts door de theorie bepaald op een in wezen circulaire manier: een experimentele procedure is dan en slechts dan een quantummechanische meetprocedure als ze door de quantummechanica correct wordt beschreven. Lukt dit laatste niet, dan wordt allereerst het experiment gewantrouwd. De instrumentalist loopt zodoende echter wèl het gevaar waardevolle informatie te negeren. Bij van Kampen lijkt dit gevaar zeker aanwezig. Hoe zal hij de kring kunnen doorbreken, zònder dat stuk metafysica dat gepaard gaat met de sprong naar een nieuwe, nog niet experimenteel getoetste theorie?

Quantummechanica en de werkelijkheid

De poging om de quantummechanische golffunctie niet instrumentalistisch maar realistisch te interpreteren, komt voort uit een zekere onvrede met het idee dat de theorie slechts de verschijnselen beschrijft, en niet de werkelijkheid achter de verschijnselen. Er zijn, denk ik, weinig fysici die niet geloven in het objectieve bestaan van electronen, òòk als die níet worden waargenomen c.q. wisselwerken met een meetapparaat. En als het gaat om neutronensterren, waar bijvoorbeeld het Pauli-principe een belangrijke rol speelt bij het tot stand komen van de druk, dan lijkt het nauwelijks nog zinvol om de quantummechanische beschrijving te interpreteren in de aan het aardse laboratorium ontleende terminologie van preparatie- en meetverschijnselen. Het is om deze redenen zeer begrijpelijk dat de neiging tot een quantumrealistische interpretatie van de quantummechanica onder fysici zeer sterk is. Dit is echter metafysica *in het kwadraat*: niet alleen gaan we ervan uit dat de sterren óók nog bestaan als we niet kijken, maar we nemen bovendien nog aan dat die objectieve realiteit wordt beschreven door een quantummechanische golffunctie.

Bohr's compleetheidsdogma heeft er toe bijgedragen dat deze twee soorten van metafysica min of meer aan elkaar worden gelijkgesteld: als het niet door de quantummechanica wordt beschreven, dan bestaat het ook niet. Het is echter duidelijk dat dit op zijn beurt een nogal metafysisch standpunt is. Wat onderscheidt de quantummechanica van alle andere fysische theorieën die slechts geldig zijn op een beperkt toepassingsgebied? We weten nu dat het bevestigende antwoord dat Heisenberg gaf op zijn hierboven geciteerde vraag, zeker niet correct is, want we hebben nu voorbeelden van experimentele situaties die niet corresponderen met het door hem gebruikte beperkte formalisme van de quantummechanica. Kennelijk laat de werkelijkheid zich niet zo gemakkelijk in het keurslijf van een bepaalde theorie stoppen. Inderdaad is de theorie slechts een instrument, een instrument dat slechts bepaalde aspecten van de werkelijkheid beschrijft, namelijk dié verschijnselen die tot ons komen door middel van een speciaal soort meetprocedures die liggen binnen het toepassingsgebied van die theorie. Die verschijnselen zijn voor de von Neumann-Dirac quantummechanica verschillend van die van de gegeneraliseerde quantummechanica van de positieve operatorwaardige maten. Die laatste blijken meer informatie over de toestand van het object te kunnen geven dan de eerste. Met name de interferentietermen kunnen in het toepassingsgebied van het gegeneraliseerde formalisme aanleiding geven tot experimentele verschijnselen. Deze termen zijn kennelijk minder ongrijpbaar voor het experiment dan van Kampen zich voorstelt.

Met het voorbeeld van de gegeneraliseerde quantummechanica heb ik willen illustreren dat ook de instrumentalistische interpretatie van een theorie zijn problemen heeft. De instrumentalist zal minder dan de quantumrealist geneigd zijn om theoretische termen die niet direct met verschijnselen zijn verbonden, serieus te nemen. Het voordeel daarvan is dat zinloze discussie over metafysische zaken wordt vermeden. Het nadeel blijkt in die gevallen waarin de theoretische term wél correspondeert met iets werkelijk bestaands (zoals bijvoorbeeld bij de interferentietermen het geval lijkt te zijn). Een al te starre instrumentalistische houding leidt dan tot het vasthouden aan de tot dat moment bekende theorie en verschijnselen (zonder interferentieverschijnselen), en werkt remmend op elke poging om theorie en experiment geschikt te maken voor een nieuw stuk realiteit. Fundamentele vooruitgang in de fysica is nauwelijks mogelijk zonder een zekere mate van metafysica.

Dat ook een (quantum)realistische houding remmend kan werken, behoeft in de hedendaagse fysische wereld nauwelijks enig betoog. Wie zijn theorie ziet als de ultieme beschrijving van de werkelijkheid zal nog minder dan de starre instrumentalist geneigd zijn om een gegeneraliseerd formalisme te gaan bestuderen. Merkwaaardig genoeg is het juist de instrumentalist die het meest open kan staan voor het idee dat de werkelijkheid ruimer kan zijn dan de inhoud van zijn theorie en de daardoor beschreven verschijnselen.

Terug naar de klassieke fysica?

Ik wil besluiten met enige opmerkingen over de door van Kampen gesignaleerde "merkwaaardige zucht om de quantummechanica te ontmaskeren als onvolledige beschrijving van een onderliggende werkelijkheid", en de door hem daaraan gekoppelde neiging tot terugkeer naar de klassieke mechanica. Ik vrees dat van Kampen hier twee zaken met elkaar verwart. Het idee dat er een werkelijkheid achter de verschijnselen bestaat, heeft weinig met de klassieke mechanica te maken. Die laatste gaat over puntmassa's, starre lichamen of continue media, en het lijkt alleszins waarschijnlijk dat onze werkelijkheid zulke dingen niet bevat. De klassieke mechanica beschrijft net zo goed verschijnselen (bepaalde macroscopische aspecten van de werkelijkheid) als de quantummechanica, en we hebben geen reden om te geloven dat het toepassingsgebied van de eerste ruimer is dan dat van de laatste; integendeel. Met name de quantumveldentheorie doet ons vermoeden dat de werkelijkheid uiterst gecompliceerd is: het vacuüm vertoont allerhande fluctuaties, en het electron blijkt^[15] een uitgebreide structuur te hebben die afhangt van zijn baan in het H-atoom (tot uiting komend in de Lambverschuiving). Het lijkt

volstrekt irreëel om die werkelijkheid te proberen *volledig* te beschrijven met behulp van welke theorie dan ook, klassiek of niet-klassiek. Wat we hoogstens kunnen doen, is zoveel mogelijk aspecten van die werkelijkheid proberen te beschrijven. En daarbij behoeven we ons niet te beperken tot die aspecten die beschreven worden door de Dirac-von Neumann axiomatiek. Dat is iets anders dan "het klassieke beeld in ere herstellen"^[2]. Ik ben het met van Kampen eens dat niet alle verborgen variabelen-theorieën even nuttig zijn geweest bij het vinden van generalisaties van de quantummechanica. Ik ben echter minder somber dan hij over het nut van deze exercities. Ik geloof dat werk zoals bijvoorbeeld dat van Nelson^[16] ons veel kan leren over de aard van de stochastiek die we in onze quantummechanische experimenten ontmoeten, en ik denk dat deze inzichten op den duur wel degelijk kunnen leiden tot generalisaties die nog ruimere klassen van experimenten kunnen beschrijven dan de hierboven besproken bescheiden generalisatie van het quantumformalisme. Het lijkt daarbij bijna vanzelfsprekend dat naarmate we ons verder experimenteel verwijderen van onze dagelijkse belevingswereld de theorie die we nodig hebben sterker zal verschillen van de klassieke mechanica.

Referenties

1. N.G. van Kampen, Ned. Tijdschr. v. Natk. **A56** (1990), 13.
2. N.G. van Kampen, Ned. Tijdschr. v. Natk. **A56** (1990), 21.
3. C.G. Hempel, *Grundzüge der Begriffsbildung in der empirischen Wissenschaft*, Bertelmann Universitätsverlag, Düsseldorf, 1974, Hfdst. II.
4. L.E. Ballentine, Rev. Mod. Phys. **42** (1970) 358.
5. J. Hilgevoord, Ned. Tijdschr. v. Natk. **A56** (1990), 19.
6. Cf. Commentaren van R. Landauer en C.N. Yang op van Kampen's bijdrage in Proceedings 3rd Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo, 1989, eds. S. Kobayashi c.s., The Physical Society of Japan, 1990, p. 107.
7. E.B. Davies, *Quantum theory of open systems*, Academic Press, London, 1976.
8. A.S. Holevo, *Probabilistic and statistical aspects of quantum theory*, North-Holland, Amsterdam, 1982.
9. H.P. Yuen, J.H. Shapiro, IEEE Trans. Inform. Theory **IT-26** (1980), 78.
10. N.G. Walker, J.E. Carroll, Electronic Letters **20** (1984), 981; H. Martens and W.M. de Muynck, Found. of Phys. **20** (1990), 255.
11. W.M. de Muynck and H. Martens, *Neutron interferometry and the joint measurement of incompatible observables* (te verschijnen in Phys. Rev. A).
12. A. Franklin, *The neglect of experiment*, Cambridge UP, 1986.
13. R.T. Cox, C.G. McIlwraight, and B. Kurrelmeyer, Proc. Nat. Acad. of Sciences (USA) **14** (1928), 544; C.T. Chase, Phys. Rev. **36** (1930), 1060.
14. W. Heisenberg, *Physik und Philosophie*, Verlag Ullstein, Frankfurt, etc. 1959, p. 26.
15. W.M. de Muynck, Found. of Phys. **14** (1984), 199.
16. E. Nelson, *Quantum fluctuations*, Princeton UP, 1985.