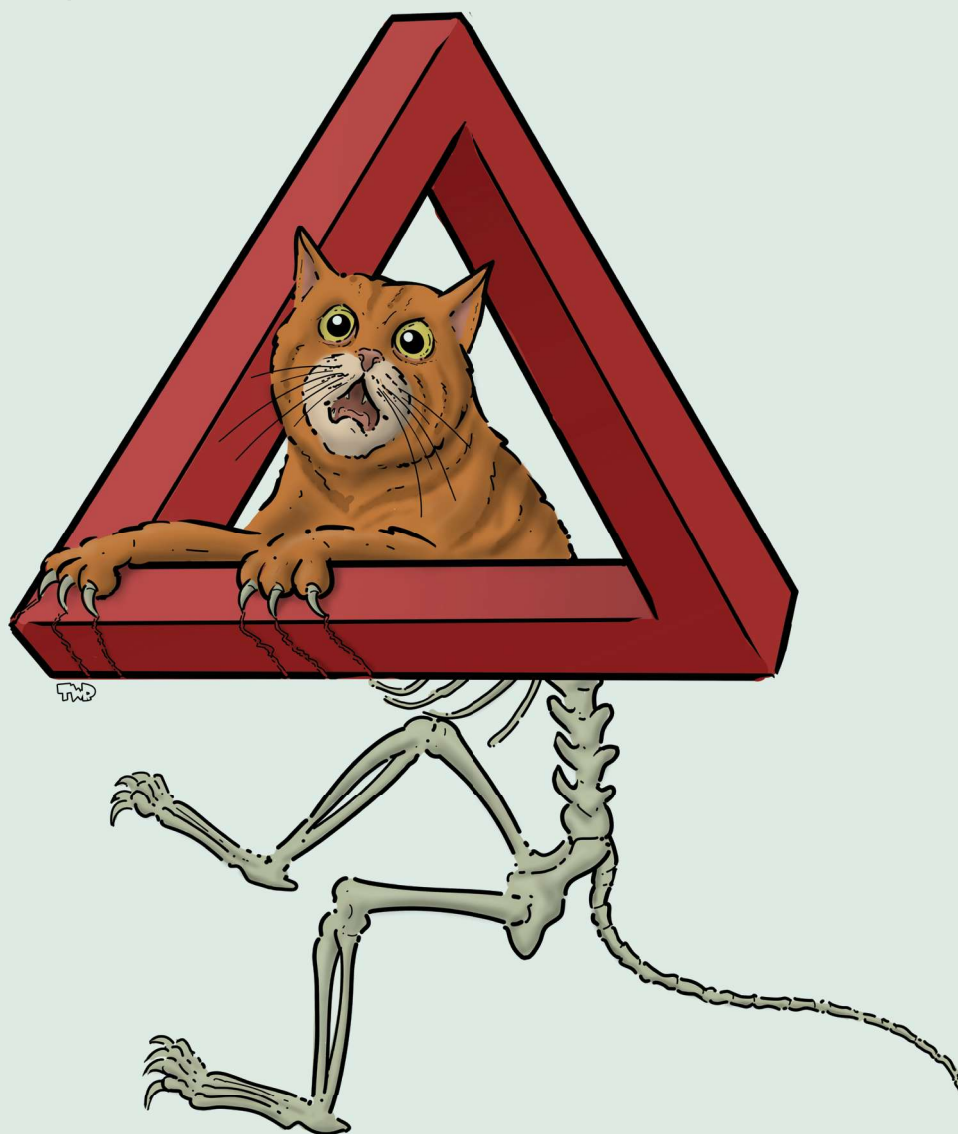


Het meetprobleem in de quantummechanica

Het meetprobleem staat centraal in de grondslagen van de quantummechanica, de meest succesvolle maar minst begrepen theorie in de natuurkunde. Het probleem is tot op heden onopgelost, maar de pogingen om het op te lossen geven een dieper begrip van het probleem.



Illustratie: Tjeerd Royaards

Schrödingers kat

De versie van het meetprobleem die het meest tot de verbeelding spreekt, en zelfs tot ver buiten de natuurkunde bekend is, is de kat van Schrödinger [1]. Schrödinger publiceerde dit gedachte-experiment als onderdeel van een kritische reflectie op de quantummechanica. Uit zijn correspondentie met Einstein blijkt dat ook de laatste een belangrijke bijdrage leverde aan dit idee [2, 3]. De kat wordt vaak gebruikt om de vreemdheid van de quantummechanica te illustreren en zo interesse voor deze theorie te wekken door het ogenschijnlijke gevolg ervan te presenteren als exotisch en mysterieus. Maar Schrödinger en Einstein wilden juist een conceptueel probleem van de quantummechanica aan het licht te brengen.

Een kat wordt in een strikt gesloten 'kamer van staal' opgesloten met een 'helse' constructie. Zodra een radioactieve substantie in dezelfde ruimte valt komt blauwzuur vrij dat de kat onmiddellijk doodt (Einstein suggereerde buskruit dat al dan niet binnen een jaar ontploft). De quantummechanica voorspelt dat dit radioactieve verval, en daarmee de dood van de kat, met een kans van zeg een half binnen een uur plaatsvindt. Maar evengoed zou de kat na dit uur met dezelfde kans nog kunnen leven. Schrödinger wijst erop dat de vraag of de substantie vervallen is volgens de nog steeds gangbare Kopenhaagse interpretatie van de quantummechanica door directe waarneming beslist wordt. Maar dat zou betekenen dat de vraag of de kat na een uur levend of dood is, pas door een waarneming wordt beslist. De vraag is dan wat de toestand van de kat is als deze waarneming niet wordt gedaan en hoe het mogelijk is dat het doen van een waarneming over het lot van de kat beslist. Het gezonde verstand zegt immers dat een kat dood of levend is, of we er nu naar kijken of niet. Schrödinger merkt uitdrukkelijk op dat de quantummechanica niet tot een tegenspraak leidt (al zien velen dat hier wel zo), maar ons voor de keuze stelt om deze theorie ofwel als een onscherpe foto van een scherpe

werkelijkheid te beschouwen (wat zijn opvatting en ook die van Einstein was), zodat de theorie gewijzigd moet worden tot een scherpe foto, ofwel als een scherpe foto van een mistbank (zoals Bohr en Heisenberg het zagen: beter krijg je het nu eenmaal niet).

Bohr en von Neumann

Schrödingers kat is een versie van wat later het meetprobleem van de quantummechanica is gaan heten. Deze term werd pas in 1949 voor het eerst gebruikt door Jordan [4]. Er was natuurlijk al vóór Schrödingers artikel nagedacht over metingen in de quantummechanica, waarbij het beroemde artikel van Heisenberg uit 1927, waarin hij zijn onzekerheidsrelaties afleidt uit beschouwingen over de verstoring van quantumsystemen door metingen, een grote rol speelde. Mede naar aanleiding van dit artikel ontstonden rond 1930 twee prominente manieren om tegen metingen aan te kijken, die vaak worden samengeraapt onder de vlag van Kopenhaagse interpretatie maar toch behoorlijk van elkaar verschillen.

Bohr benadrukte vanaf tenminste 1923 dat *alle* natuurkundige processen,

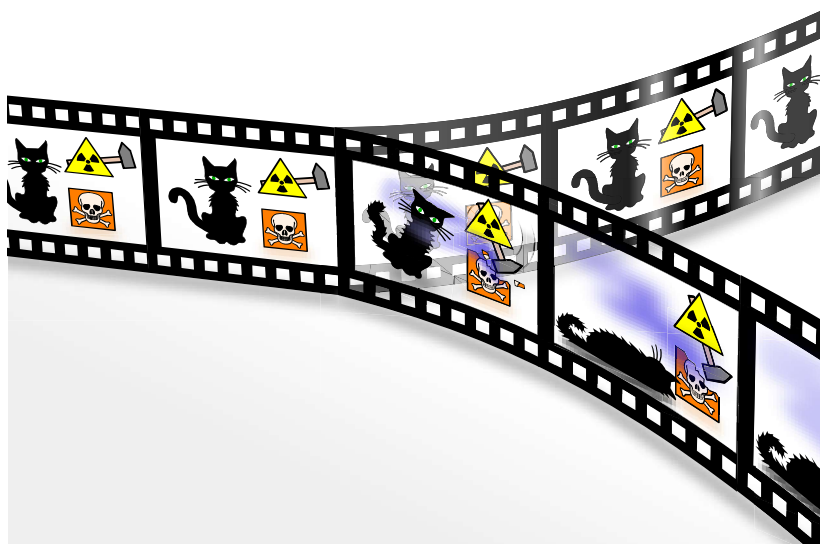
inclusief de quantummechanische, beschreven moeten worden door middel van de klassieke fysica. Afkomstig van een van de pioniers van de quantumfysica lijkt dit een paradoxaal standpunt, maar het houdt in dat wij de quantumwereld als het ware uitsluitend door een klassieke bril kunnen zien. Dit impliceert dat ieder meetinstrument klassiek beschreven moet worden, ook al bestaat het uit quanta zoals atomen. Sterker nog, het is de klassieke beschrijving die een quantummechanisch systeem tot een potentieel meetapparaat maakt. Von Neumann geeft als eerste een uitgebreide wiskundige en conceptuele analyse van het meetproces in de quantummechanica, waarbij hij impliciet Bohrs standpunt over klassieke beschrijvingen overneemt [5]. Hij noemt het meetapparaat echter macroscopisch. Von Neumann poneert dat de golf functie op twee verschillende manieren kan evolueren. Als het systeem niet wordt waargenomen gebeurt dit deterministisch via de schrödingervergelijking, maar zodra aan het systeem wordt gemeten stort de golf functie indeterministisch in naar een bepaalde uitkomst. Het



John von Neumann (1903–1957) meent dat een subjectieve waarneming het meetproces beëindigt en buiten de fysische beschrijving valt.



David Bohm (1917–1992) bleef aanvankelijk in de obscuriteit met zijn opvatting dat deeltjes te allen tijde zowel een golf functie als een 'verborgen' positie hebben, maar verwierf zich daardoor later een legendarische status.



Schrödingers kat in de many-worlds-interpretatie, waarin de wereld zich bij iedere meting opsplijt in alle mogelijke uitkomsten (beeld: Christian Schirm).

is echter niet duidelijk hoe en onder welke omstandigheden een golf functie precies instort. Von Neumann zegt dat de subjectieve waarneming het meetproces beëindigt en buiten de fysische beschrijving valt. Kennelijk deelde hij met Bohr de overtuiging dat het ontstaan van een specifieke uitkomst van een meting niet door de quantummechanica beschreven kan worden. Dit was de volgende afslag in de weg naar indeterminisme die al eerder door Born was ingeslagen met zijn waarschijnlijkheidsinterpretatie van Schrödingers golf functie [6]. Het meetprobleem stond niet direct centraal in de quantummechanica. Het was aanvankelijk voor velen niet eens duidelijk dat Bohr en Von Neumann verschillende beschrijvingen van het meetproces gaven, of beter gezegd, dat de eerste die helemaal niet gaf [7]. Zelfs na Schrödingers artikel was er weinig discussie over dit thema, in tegenstelling tot andere onderwerpen in de quantummechanica zoals visualiseerbaarheid, determinisme, lokaliteit, en causaliteit [8]. Tot de weinige uitzonderingen behoorde een essay van London en Bauer, waarin zij de opzet van Von Neumann

verder uitwerkten en de instorting van de golf functie uiteindelijk terugvoerden tot het 'vermogen tot introspectie' van de waarnemer [9].

Het probleem wordt opgepakt

De belangstelling voor het meetproces in de quantummechanica nam in de vijftiger jaren toe. Aan de ene kant werden verschillende interpretaties ontwikkeld die tot doel hadden het meetprobleem op te lossen. Vanuit huidig standpunt zijn de belangrijkste daarvan die van Bohm [10], waarin deeltjes te allen tijde zowel een golf functie als een 'verborgen' positie hebben, en die van Everett [11], waarin de wereld zich bij iedere meting dusdanig opsplijt dat alle mogelijke uitkomsten worden gerealiseerd. Er is dan bijvoorbeeld een wereld waarin de kat na een uur nog leeft, en een andere waarin deze helaas overleden is. De instorting van de golf functie vindt dan dus niet plaats. De evolutie verloopt altijd volgens de schrödingervergelijking. Everett noemde dit oorspronkelijk de relative state interpretation, maar deze naam werd later door zijn volgelingen vervangen door het meer tot de verbeelding sprekende

many-worlds interpretation. Bohm en Everett delen hierbij een langzame gang van obscuriteit naar een legendarische status. Het werk van Bohm werd in eerste instantie niet serieus genomen en dat van Everett werd simpelweg genegeerd [7]. Nu worden zij beiden verafgoed.

Aan de andere kant stonden pogingen van bijvoorbeeld Jordan, Ludwig, Feyerabend, en Daneri, Loinger & Prosperi om het instorten van de golf functie niet als een psychologisch maar een thermodynamisch (en dus fysisch) proces te beschrijven en de twee ogenschijnlijk totaal verschillende tijdevoluties van Von Neumann tot één dynamica terug te voeren. In een scherpe wiskundige analyse van het meetprobleem, voortbouwend op het werk van zijn vriend Von Neumann maar zonder diens beroep op het bewustzijn, toonde Wigner echter aan dat deze aanpak tot mislukken gedoemd was [12]. Daarvoor zijn de twee tijdevoluties wiskundig toch te verschillend. De meeste relevante artikelen uit die tijd kan men vinden in [13]. Zie ook [14].

In de jaren tachtig werd de indruk gewekt dat niets van dit alles nodig is omdat het verschijnsel van decoherentie het meetprobleem zou oplossen [15]. Het idee is dat het meetprobleem veroorzaakt wordt doordat de omgeving wordt weggelaten, terwijl ieder quantumstelsel open is, en dus niet los gezien kan worden van de omgeving. Bij het betrekken van de omgeving reduceert de golf functie (een superpositie) tot een type golf functie (een mengsel), waarin het probleem niet optreedt. Een dergelijke reductie vindt ook plaats ten opzichte van een macroscopische waarnemer in een oneindig groot systeem, zoals aangetoond door Hepp [16].

Deze aanpak wordt vooral aangehangen door mathematisch fysici, al werd een van de bekendsten onder hen, Arthur Wightman, hierover door Wigner op zijn nummer gezet: "You are a great man, Arthur, but not infinitely so." Inderdaad: geen enkel fysisch systeem is echt oneindig groot. Bovendien is inmiddels duidelijk dat ook de eerste aanpak

alleen werkt in combinatie met de many-worlds interpretation [17]. Zelfs mengsels bestaan namelijk nog steeds uit zowel dode als levende katten, die ergens een plaats moeten vinden. Omgekeerd bleek dat de splitsing van de wereld na een meting alleen goed gedefinieerd is als tevens decoherentie optreedt, zodat decoherentie en many-worlds alleen in combinatie met elkaar werken als mogelijke oplossingen van het meetprobleem. Nog los van haar gekmakende extravagantie houdt deze aanpak echter grote problemen met het kansbegrip in de quantummechanica, zodat deze langzamerhand weer naar de achtergrond is verdwenen.

De Efteling voor nerds

Hiermee zijn de piketpaaltjes wel geslagen. Al zijn er minstens zes manieren om het meetprobleem precies te formuleren [18], ruwweg bestaat het nog steeds uit de ogenschijnlijke inconsistentie tussen de twee tijds-evoluties van de golf functie die Von Neumann benoemde, een spanning die in Schrödingers kat haar hoogste voltage bereikt. Gegeven het enorme succes van de schrödingervergelijking bestaat een oplossing van het meetprobleem binnen de quantummechanica dus ofwel uit het tóch onder bepaalde omstandigheden afleiden van de instorting van de golf functie uit deze vergelijking – waarbij men de argumenten van Wigner moet zien te omzeilen – ofwel uit het ontkennen dat deze instorting ooit plaatsvindt – wat meestal gebeurt door het formalisme op een onverwachte manier te interpreteren, zoals bij Everett, bij Bohm, en in de zogenaamde modale interpretatie van de quantummechanica, waarin een verschil wordt gemaakt tussen de wiskundige en de feitelijke toestand van het systeem [19]. Als alternatief kan men de quantummechanica wijzigen om de instorting van de golf functie voor elkaar te krijgen, maar dit gaat ten koste van de succesvolle schrödingervergelijking [20, 21, 22]. Weinigen zijn bereid deze vergelijking zomaar op te geven, zodat ook dit voorlopig een niche is. Een voorbeeld van de eerste strategie

is een recente fysische oplossing waarin best practices van Bohr, Von Neumann, Schrödinger en Wigner worden gecombineerd. Hierin leidt de klassieke beschrijving van het meetapparaat binnen de schrödingervergelijking tot onverwachte maar wiskundig onontkoombare instabiliteiten die de golf functie via een tunneleffect doen instorten [23, 24]. Dit lost het meetprobleem binnen de quantummechanica op, echter ten koste van een wederopstanding van Schrödingers kat (indien dood) na zeer lange tijd. Wie daarvan schrikt herinnert zich de woorden van de Leidse theoretisch fysicus Jan Zaenen zaliger: “Quantummechanica is de Efteling voor nerds.”

Klaas Landsman is hoogleraar mathematische fysica, in het bijzonder in verband met meetkunde en quantumtheorie, aan de Radboud Universiteit in Nijmegen. In 2022 won hij de NWO-Spinozapremie.

REFERENTIES

1. E. Schrödinger, Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, *Die Naturwissenschaften* **23**, 807–812 (1935).
2. D. Kaiser, How Einstein and Schrödinger conspired to kill a cat, nautil.us/how-einstein-and-schrodinger-conspired-to-kill-a-cat-236140 (2016).
3. C.A. Lehner & J. Uffink, Schrödinger, Szilard, and the emergence of the EPR argument, philsci-archive.pitt.edu/24490/1/Entanglement.pdf (2025).
4. P. Jordan, On the process of measurement in quantum mechanics, *Philosophy of Science* **16**, 269–278 (1949).
5. J. Von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (Springer, Berlin, 1932).
6. M. Born, Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge, *Zeitschrift für Physik* **37**, 863–867 (1926).
7. O. Freire Junior, *The Quantum Dissidents: Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950–1990)* (Springer, 2015).
8. M. Jähnert & C. Lehner, The early debates about the interpretation of quantum mechanics, *The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations*, ed. O. Freire, Jr, pp. 135–172 (Oxford University Press, 2022).
9. F. London & E. Bauer, *La Théorie de l'Observation en Mécanique Quantique* (Hermann, Parijs, 1939).
10. D. Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables. I, *Physical Review*, **85**, 166 (1952).
11. H. Everett III, “Relative state” formulation of quantum mechanics, *Reviews of Modern Physics*, **29**, 454 (1957).
12. E.P. Wigner, The problem of measurement, *American Journal of Physics*, **31**, 6–15 (1963).
13. J.A. Wheeler, & W.H. Zurek (eds.), *Quantum Theory and Measurement* (Princeton University Press, 1983).
14. O. Pessoa Jr, The Measurement Problem, *The Oxford Handbook of the History of Quantum Inter-*

- pretations*, ed. O. Freire Jr, pp. 281–302 (Oxford University Press, 2022).
15. M. Schlosshauer, Decoherence, the measurement problem, and interpretations of quantum mechanics, *Reviews of Modern Physics*, **76**, 1267–1305 (2004).
 16. K. Hepp, Quantum theory of measurement and macroscopic observables, *Helvetica Physica Acta*, **45**, 237–248.
 17. D. Wallace, *The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation* (Oxford University Press, 2012).
 18. F. A. Muller, Six measurement problems of quantum mechanics, *Non-Reflexive Logics, Non-Individuals, and the Philosophy of Quantum Mechanics: Essays in Honour of the Philosophy of Décio Krause*, pp. 225–259 (Springer, 2022).
 19. O. Lombardi & D. Dieks, Modal interpretations of quantum mechanics, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2024 Edition), eds. E.N. Zalta & U. Nodelman (eds.), plato.stanford.edu/archives/sum2024/entries/qm-modal.
 20. R. Penrose, On gravity's role in quantum state reduction, *General Relativity and Gravitation*, **28**, 581–600 (1996).
 21. A. Bassi, K. Lochan, S. Satin, T.P. Singh, & H. Ulbricht, Models of wave-function collapse, underlying theories, and experimental tests, *Reviews of Modern Physics*, **85**, 471–527 (2013).
 22. A. Mukherjee, S. Gotur, J. Aalberts, R. van den Ende, L. Mertens, & J. van Wezel, Quantum state reduction of general initial states through spontaneous unitarity violation, *Entropy* **26**, 131 (2024).
 23. K. Landsman & R. Reuvers, A flea on Schrödinger's cat, *Foundations of Physics* **43**, 373–407 (2013).
 24. K. Landsman, *Foundations of Quantum Theory: From Classical Concepts to Operator Algebras* (Springer, 2017).