

De ultieme realiteit. Over de implicaties van de 20^e eeuwse natuurkunde.

Inleiding

In zijn monumentale werk 'Kritiek van de zuivere rede' stelde Immanuel Kant dat ruimte en tijd geen werkelijke entiteiten zijn in een materiële werkelijkheid buiten ons maar dat het ordeningsprincipes van de menselijke geest zijn.¹ Ruimte en tijd zijn (a priori) voorstellingen die onze wirwar aan indrukken die wij via de waarneming ontvangen ordenen zodat wij verschijningen kunnen opdoen. Dit was een revolutionaire gedachte omdat Kant cruciale noties als 'ruimte' en 'tijd' van de buitenwereld naar het hoofd van de waarnemer verplaatste. Veel mensen zullen Kants gedachte nogal tegen-intuïtief vinden en deze daarom verwerpen. Nu worden er in de filosofie maar vooral binnen de natuurwetenschap wel vaker ontdekkingen gedaan en theorieën geformuleerd die haaks staan op de onze intuïtie. Neem bijvoorbeeld de ontdekking dat wij, bewoners van de planeet aarde, momenteel met een snelheid van ongeveer 400 kilometer per seconde door de ruimte bewegen en de aarde op dit moment om de zon en haar eigen as draait. Afgaande op onze ervaringen lijkt dit beslist niet zo te zijn en lijkt onze planeet juist stil te staan. Of neem de theorieën die vanaf het begin van de 20^e eeuw in de fysica werden geformuleerd, te weten de speciale en algemene relativiteitstheorie en de kwantummechanica. Deze zijn zo tegen-intuïtief dat de meeste mensen ze, wanneer ze al begrijpen wat de theorieën inhouden, ze vermoedelijk direct hoofdschuddend zullen verwerpen. Tijd en ruimte relatief? Een materiedeeltje dat zich voor kan doen als golf en een golf dat zich voordoet als deeltje? Eigenschappen van een fysisch systeem die niet objectief maar pas in en door waarneming ontstaan? Zelfs voor wie gewend is geraakt aan inzichten in de filosofie die het accent leggen op de cruciale rol van het subject, zullen deze conclusies uit de 20^e -eeuwse fysica al snel al te gek zijn. En toch zijn deze zaken allemaal wetenschappelijk veelvuldig bevestigd.

Dergelijke tegen-intuïtieve ideeën komen ook veelvuldig aan bod in het vlot geschreven boek van Amanda Gefter (*In Einsteins achtertuin. Een duizelingwekkende toer langs de mooiste ideeën uit de natuurkunde*), dat onlangs in een uitstekende Nederlandse vertaling verscheen maar in de Nederlandse geschreven pers vooralsnog niet de aandacht kreeg die het verdient. Gefter, wetenschapsjournalist, doet twee dingen in haar boek: ze beschrijft welke theorieën de huidige fysica bepalen maar ontvouwt ook welk wereldbeeld volgens haar uit deze theorieën volgt. Ze laat daarmee overtuigend zien hoe diep deze theorieën ingrijpen in onze wereldbeschouwing. Gefter doet dit in een persoonlijke geschreven verslag van haar zoektocht naar de betekenis van 'niets' en het begin van 'alles', dat zich voltrok door gesprekken te voeren met de toonaangevende fysici van vandaag, van John Wheeler tot Stephen Hawking. Deze zoektocht roept vragen op: wat is de verhouding tussen hedendaagse fysica (theorie) en wereldbeeld? Wat betekent de hedendaagse fysica voor de relatie tussen geloof en wetenschap? En voor de status van de logica? En klopt het wat Gefter beweert? Een essay over de implicaties van de 20^e eeuwse natuurkunde, aan de hand van Gefters boek.

Gefters verhaal begint in 1995, wanneer haar vader haar vraagt om het begrip 'niets' te definiëren. Nu zullen de meeste mensen het begrip 'niets' definiëren aan de hand van wat het *niet* is, bijvoorbeeld: niets is de afwezigheid van alles. Gefters vader is echter tot een andere, tegen-intuïtieve definitie gekomen, waarbij het begrip 'niets' wordt gedefinieerd aan de hand van wat het *is*: een ding wordt gedefinieerd door zijn grenzen, door wat het onderscheidt van iets anders, door de randen ervan. Stel nu dat je een volledig homogene toestand hebt zonder randen, die oneindig is, dan zou die toestand geen dingen bevatten. Die toestand zou 'niets' zijn. 'Niets' is dan een oneindige, onbegrensde homogene toestand. 'Niets' is dan 'alles' in een andere configuratie. Maar kan dit idee, gesteld dat dit adequaat is, verklaren hoe het heelal ontstond, dus hoe iets uit niets ontstond? Waarom zou en hoe kan een toestand van oneindige, onbegrensde

¹Kant 2004.

homogeniteit veranderen in de geboorte van een heelal? Met deze vraag begint Gifter haar zoektocht. Nu begint de kosmologie niet met 'niets' maar met 'alles'. Het start met een uitdijend heelal vol materie en straling en zet van daaruit de klok 14 miljard jaar terug, tot het ene punt waaruit het universum ontstond, een (soort) singulariteit. Dit ene punt, dat niet *in* de ruimte is maar ruimte *is*, is het heelal, het 'alles' waar ook wij mensen dus onderdeel van uitmaken en waar wij niet van buitenaf naar kunnen kijken omdat singulariteit simpelweg geen buitenkant heeft.

Verklaringen voor 'finetuning': John Wheeler

Nu is het opmerkelijk dat de fysieke constanten die in het universum gelden, dusdanig blijken te zijn 'afgesteld' dat, wanneer zij ook maar een heel klein beetje anders waren geweest, er in het geheel geen leven mogelijk zou zijn geweest. Dit verschijnsel wordt *finetuning* genoemd. Hoe is dit verschijnsel te verklaren? Eén verklaring is het *antropisch principe* dat stelt dat de finetuning er op duidt dat het universum voor de mens gemaakt lijkt. Een andere verklaring ontkent dit en stelt dat ons universum onderdeel is van een multiversum, waar ieder universum zijn eigen constanten heeft. De beroemde Amerikaanse natuurkundige John Wheeler (1911-2008), die Gifter op haar zoektocht ontmoette, formuleerde een opmerkelijke derde verklaring, die beide vorige verklaringen verwerpt. Hij stelde dat het universum in de ogen van waarnemers van *finetuning* getuigt omdat waarnemers (lees: 'referentiekaders' of 'mogelijke gezichtspunten') het universum zelf creëren. Hoe kwam Wheeler op dit idee?

Einsteins relativiteitstheorie

Eén van de peilers onder Wheelers verklaring is Einsteins stelling dat 'ruimte' en 'tijd' geen absolute categorieën zijn buiten ons maar afhankelijk zijn van ons standpunt en dus relatief zijn.² Einstein kwam tot zijn theorie aan het einde van een onderzoek dat begon met de eenvoudige vraag: hoe zou een lichtbundel er uit zien als je er met dezelfde snelheid naast zou vliegen? Uit Maxwells wetten van het elektromagnetisme weten we dat licht, oftewel elektromagnetische golven, altijd reist met een snelheid van 300.000 km per seconde. Dat betekent dat voor een waarnemer die met een snelheid van 300.000 km/seconde reist, de snelheid van het licht afneemt tot nul. Einstein stelde hierop dat de lichtsnelheid voor iedereen onder alle omstandigheden constant is en daarmee de enige absolute grootheid is. Deze theorie bleek juist maar had enorme consequenties. Ruimte en tijd zijn vanaf nu geen absolute grootheden meer en zijn dus niet absoluut meetbaar maar zijn met elkaar verstrengeld. Ze hangen af van de plaats en de snelheid van degene die de meting uitvoert. Met deze theorie toonde Einstein aan dat er een nauw verband is tussen invariantie en werkelijkheid: ruimte en tijd zijn niet-invariant.³

Nu stelde Einstein, die geloofde dat er desondanks wel een werkelijkheid bestaat los van onze gefragmenteerde kijk daarop, dat de geünificeerde, vierdimensionale ruimtetijd, bestaande uit lengte, breedte, hoogte oftewel ruimte én tijd, invariant is.⁴ Beroemd is de anekdote dat Einstein als vierjarig jongetje een kompas van zijn vader kreeg. Door te kijken hoe een onzichtbare kracht altijd de kompasnaald naar het noorden leidt raakte Einstein ervan overtuigd dat er 'iets achter dingen zit, iets diep verborgen.'

²Merk hierbij de opmerkelijke parallel op tussen Einsteins algemene relativiteitstheorie en Kants idee over ruimte en tijd, in die zin dat beiden stellen dat ruimte en tijd geen werkelijke entiteiten zijn in een objectieve werkelijkheid buiten ons.

³Iets is invariant wanneer het in elk referentiekader hetzelfde (ofwel: objectief) is. Wanneer iets niet invariant is, is het te vergelijken met de kleur van een sterrenstelsel: kleur is niet een werkelijke eigenschap van een sterrenstelsel maar hangt af van de beweging van het sterrenstelsel in relatie tot de waarnemer. Wanneer het sterrenstelsel roodverschuiving vertoont, beweegt het van de waarnemer weg. Wanneer het blauwverschuiving vertoont, beweegt het naar de waarnemer toe.

⁴Einsteins bekende uitspraak hierover luidde: "Ik mag graag denken dat de maan er is, ook terwijl ik er niet naar zit te kijken."

Kwantummechanica

Wheeler was het niet eens met die overtuiging. In zijn zoektocht naar de bouwstenen van de werkelijkheid, naar de diepste basiseenheden waar het leven, het universum en alles uit voortkomt, kwam hij tot de conclusie dat die diepste basiseenheid of basiseenheden niet bestaat/n. Wheelers basis hiervoor, dat de tweede peiler onder zijn verklaring vormde, vormde de kwantummechanica, waarvoor Einstein overigens de basis had gegeven. De kwantummechanica is, anders dan de relativiteitstheorie, een *instrumentalistisch* geformuleerde theorie over elementaire deeltjes zoals elektronen, protonen en neutronen. Het voorspelt systematisch welke uitkomsten meetinstrumenten aangeven zodra metingen worden verricht aan elementaire deeltjes, maar beschrijft slechts sporadisch de eigenschappen van deze deeltjes zelf.⁵

Drie problemen met de kwantummechanica

Nu bestaan er een aantal problemen met deze theorie. Het is allereerst de vraag wat de status van de logica binnen de kwantummechanica is. De klassieke logica (zoals bijvoorbeeld de propositielogica) lijkt binnen de kwantummechanica onbruikbaar. De vraag is dan hoe de kwantummechanica zich verhoudt tot andere vormen van logica. Het is ten tweede de vraag binnen de fysica hoe de kwantummechanica zich verhoudt tot de algemene relativiteitstheorie die, simpel gezegd, de wereld op macroniveau, beschrijft. Ten derde is er het filosofisch debat wat de kwantummechanica ons vertelt over het gebied van de metafysica: leert zij ons bijvoorbeeld dat de werkelijkheid als geheel fundamenteel indeterministisch is? En bestaat er een objectieve buitenwereld buiten onze waarneming? Ik zal deze drie vraagstukken verduidelijken met de kanttekening dat het hier gaat om kwesties waar onder kenners fundamenteel (gefundeerd) verschil van mening over bestaat.

Om een antwoord op deze drie vragen te formuleren is het nuttig eerst iets over het ontstaan van deze theorie te weten.⁶ Einstein had laten zien dat je bepaalde fysische verschijnselen kunt verklaren door aan te nemen dat het licht een deeltjeskarakter heeft. Dit stond haaks op het toentertijd vaststaande idee dat licht een golfverschijnsel is. Einstein ontwikkelde zijn theorie op basis van het onderzoek dat de Duitse natuurkundige Max Planck een aantal jaren eerder had gedaan. Planck onderzocht de straling van zwarte lichamen. Dit zijn lichamen die geen licht weerkaatsen zoals bijvoorbeeld de buik van een potkachel.⁷ Planck nam voor zijn conclusies de aanname dat deze straling gekwantificeerd was, dat wil zeggen alleen in bepaalde hoeveelheden vrij kwam. Dat deze aanname volstrekt juist is, bleek pas later, toen lichtkwanta een sleutelrol gingen spelen bij het onderzoek naar de structuur van materie. Licht bleek, opmerkelijk genoeg, zowel een golf- als een deeltjeskarakter te hebben. De fysicus Erwin Schrödinger stelde in 1926 de Schrödinger-vergelijking op, nog steeds een van de fundamentele natuurwetten van de 20^e eeuw. De vergelijking handelt over de beweging van een elementair deeltje en met deze vergelijking is het mogelijk de *kans* (een centraal begrip in de kwantummechanica) te berekenen dat een deeltje, gegeven bepaalde randvoorwaarden, zich op een zeker moment op een zekere plaats bevindt. Het bleek onmogelijk om de beweging of de plaats exact te berekenen. Dit komt doordat het deeltje zelf zich onvoorspelbaar, niet-deterministisch gedraagt. Op basis van deze theorie hebben vele natuurkundigen de conclusie getrokken dat de natuur zich niet-deterministisch zou gedragen. Dit vormde uiteraard een enorme schok voor veel natuurkundigen inclusief Einstein, die de natuur als fundamenteel deterministisch beschouwden en het begrip 'kans' niet in een wetenschappelijke theorie wenste te zien.⁸

⁵Vermaas 2001.

⁶Vermij 2006 en Nienhuis 2010.

⁷Klukhuhn 2003.

⁸Bekend is de uitspraak van Einstein uit 1926 in een brief aan Max Born: "Jedenfalls bin ich überzeugt davon dass der Alte (te weten 'God', DvdW) nicht würfelt." Het determinisme in de fysica werd ontleend aan de

Einstein probeerde zijn leven lang de kwantummechanica te weerleggen, hetgeen hem echter nooit is gelukt.⁹ Dit brengt ons bij de verhouding tussen de relativiteitstheorie en de kwantummechanica.

Verhouding relativiteitstheorie-kwantummechanica

Eén van de vragen die in de hedendaagse fysica actueel is, is die van de verhouding tussen de relativiteitstheorie en de kwantummechanica. Op dit moment lijkt het alsof er twee reeksen wetten nodig zijn om het universum te begrijpen: de kwantummechanica voor de microwereld van elementaire deeltjes en de relativiteitstheorie voor de macrowereld.¹⁰ Het is voor veel fysici moeilijk te accepteren dat de zwaartekracht van de relativiteitstheorie een uitstekende verklaring levert voor het feit dat melkwegstelsels samenklonteren maar dat diezelfde theorie op het niveau van elementaire deeltjes totaal betekenisloos is. Ditzelfde geldt voor de Bohrs Kopenhaagse interpretatie van de kwantummechanica, die stelt dat een deeltje nooit tegelijkertijd een welbepaalde positie en snelheid heeft of dat de wisselwerking van twee deeltjes zich sneller dan het licht door de ruimte kan voortplanten, hetgeen strijdig is met Einsteins stelling dat de lichtsnelheid naast constant ook ultiem is en door niets is voorbij te streven. En hoe is het te begrijpen dat de kwantummechanica een indeterministisch universum lijkt te impliceren, terwijl de relativiteitstheorie een deterministisch universum lijkt voor te staan? En waar gaan macro- en microwereld precies in elkaar over? Er worden dan ook allerlei pogingen gedaan om deze fundamentele tegenstelling op te lossen in één geünificeerde theorie, zoals bijvoorbeeld in de snaartheorie, tot op heden nog zonder definitief resultaat. Dit vraagstuk is dus nog even actueel als het een eeuw geleden was.

Verhouding tot de logica

Ten tweede bestaat discussie over de vraag wat de status van de logica binnen de kwantummechanica is. Gefter komt in haar boek tot de conclusie dat de klassieke propositielogica met haar binaire systeem van 'waar' of 'onwaar' in de kwantummechanica onbruikbaar is.¹¹ Noodzakelijk is volgens haar dat er een logica wordt ontworpen waarin grijstinten bestaan. Door de fysicus Fotini Makopoulou wordt dan ook voorgesteld de intuïtionistische logica in te zetten.¹² Anderen hanteren een kwantumlogica. Hierover is nog veel debat gaande.

Metafysische implicaties

Naast bovengenoemde problemen zijn de vragen en implicaties van metafysische aard die de kwantummechanica oproept niet minder ingrijpend. Het gaat hierbij om wijsgerige (en dus niet strikt fysische) vragen zoals uit welke bestanddelen de werkelijkheid bestaat en welk wereldbeeld redelijkerwijs volgt uit de kwantummechanica. Ook roept het vragen op die in het domein van geloof en wetenschap thuishoren. Het is op dit moment de meest geaccepteerde benadering om de Kopenhaagse interpretatie van de kwantummechanica aan te hangen, zoals deze bijvoorbeeld door Niels Bohr werd verdedigd. Deze interpretatie, die in 1982 nog door de Fransman Alain Aspect experimenteel werd bevestigd, stelt dat de kwantummechanica het fundamentele toevalskarakter van de bewegingen van de deeltjes onderstreept en dat de natuur op

klassieke mechanica, zoals in 1687 door Isaac Newton werd ontwikkeld. Newtons mechanica vormde meer dan tweehonderd jaar het onbetwifelbare fundament van de natuurkunde en het wetenschappelijk wereldbeeld dat daaraan werd ontleend, te weten dat van het universum als mechanisch systeem of gigantisch uurwerk, waar natuurwetten de loop van de volledige machinerie van het universum kunnen berekenen en voorspellen. Dit duurde tot 1900, toen de theorie ernstige kritiek kreeg door drie theorieën, te weten de chaostheorie van Kovalevskaja/Poincaré en (met name) de kwantummechanica en de relativiteitstheorie van Planck en Einstein. Zie hierover uitvoerig Klukhuhn 2003.

⁹Heden ten dage verdedigt de Nederlandse fysicus Gerard 't Hoofd als één van de weinige hedendaagse natuurkundigen de stelling dat de wereld op de allerkleinste schaal toch deterministisch is. Zie De Vries 2008.

¹⁰Bryson 2012, Vermaas 2001.

¹¹Gefter 2014, p. 70.

¹²Zie Gefter 2014, p. 65 e.v. voor een uitwerking hiervan.

basis hiervan fundamenteel indeterministisch is. Let er op dat fysica hier overgaat in metafysica. Met een beroep op de onzekerheidsrelatie van Heisenberg, die stelt dat het onmogelijk is om tegelijkertijd zowel plaats als impuls (massa x snelheid) van een deeltje binnen zekere nauwkeurigheidsmarges te kennen, trekken velen dezelfde metafysische conclusie.

Terug naar John Wheeler in Gefters boek, die voor Gefters eigen ideeën bepalend blijkt te zijn geweest. De kwantummechanica leidde bij hem tot een onalledaags wereldbeeld, dat echter inzichtelijk wordt voor wie deze theorie tot zich laat doordringen. We zagen al dat meting en waarneming een centrale rol heeft in de kwantummechanica.¹³ Wat niet wordt waargenomen blijft wezenlijk onbepaald. Nienhuis stelt dat daarmee de klassieke voorstelling dat een fysisch systeem objectieve eigenschappen heeft die door waarneming worden bepaald onhoudbaar is. Deze eigenschappen ontstaan pas in en door waarneming. Daarmee wordt de filosofische positie van het realisme in elk geval voor het kwantumniveau ondergraven. Wheeler trok hieruit, zoals we al zagen, een zeer vergaande conclusie: een eindelijk referentiekader creëert de illusie van een wereld, maar zelfs het referentiekader zelf is een illusie. Waarnemers, aldus Wheeler, creëren de werkelijkheid maar zijn zelf niet werkelijk. Er is niets ontologisch onderscheidens aan een waarnemer nu je altijd een referentiekader kunt vinden waarin die waarnemer verdwijnt: het kader van het kader zelf, de grens van de grens, waarover Gefters vader in zijn definitie van 'niets' sprak. Het zal duidelijk zijn hoe immens tegenintuïtief deze conclusie is. Dat geldt ook voor de conclusies die Gefters zelf aan het eind van haar boek trekt en die aansluiten bij Wheeler. Gefters conclusie is dat het criterium voor de ultieme werkelijkheid *invariantie* is: iets bestaat alleen werkelijk als het waarnemer-onafhankelijk is. Het blijkt dat vrijwel niets deze test doorstaat. Ruimte, tijd en zwaartekracht vallen door de relativiteit af. Daarmee vallen ook begrippen als massa, energie, impuls en lading af. Ditzelfde geldt voor ruimtetijd, zwaartekracht, elektromagnetisme, nucleaire krachten, massa, energie, deeltjes, ja zelfs voor de lichtsnelheid en het universum zelf, laat staan voor multiversa. Eén voor een blijken ze voor Gefters illusies te zijn.¹⁴ Slechts de fysisch die iets invariants ontdekt kan het universum weer tot leven wekken, zo concluderen Gefters en haar vader aan het eind van het boek.

Slot

Het zal duidelijk zijn dat de theorieën die aan het begin van de 20^e eeuw in de fysica werden geformuleerd het wereldbeeld toentertijd fundamenteel op zijn kop hebben gezet. Dit geldt met name voor de kwantummechanica. In Gefters boek wordt duidelijk dat dit in de 21^e eeuw nog beslist niet anders is. Het is daarom merkwaardig dat hierover buiten de fysica zo weinig wordt gedebatteerd. Zo is het bijvoorbeeld opvallend dat de debatten over de verhouding tussen religieus geloof en wetenschap zich veelal beperken tot (de implicaties van) de evolutietheorie, moderne bijbelwetenschap of inzichten uit de neurowetenschappen voor religieus geloof. Ditzelfde geldt voor (wetenschaps)filosofische debatten over de aard van de werkelijkheid of de vraag naar de verhouding tussen waarneming, waarnemer en theorie. Opvallend is ook dat door sommige filosofen en natuurkundigen, die alleen in de wetenschap de maat der dingen zien de implicaties van de kwantummechanica vrijwel nooit aan de orde worden gesteld.¹⁵ Met Gefters boek in

¹³Nienhuis 2010 onderbouwt dit standpunt uitvoerig.

¹⁴Anders dan Gefters meent o.a. Dieks dat het mogelijk is een realistische positie in te nemen die met de kwantummechanica én de klassieke fysica te verenigen is. Zie: Dieks 1991.

¹⁵Zie bijvoorbeeld Philipse 2008, die in zijn artikel stelt dat geloof en wetenschap fundamenteel conflicteren maar niet vermeldt dat de beide gangbare wetenschappelijke fysische theorieën (relativiteitstheorie en kwantummechanica) zélf fundamenteel met elkaar conflicteren. Dit feit lijkt mij aanleiding te geven om Philipse's uitspraak dat alleen 'de wetenschap' de maat der dingen is (lees: behoort te zijn) – los van alle andere bezwaren daartegen – op dit punt al als onjuist te verwerpen, nu het begrip 'de wetenschap' een fictieve eenheid postuleert. Dit geldt ook voor Groot's uitspraak dat "wie het wetenschappelijke wereldbeeld omarmt als het enige dat op rationaliteit aanspraak maakt, moeilijk om de conclusie heen kan dat godsdienst overwonnen is." (Groot 2014).

de hand zou aan deze omissie iets kunnen worden gedaan. Voor diegenen die het debat boven het boek prefereren: op maandag 13 oktober 2014 vindt in het Academiegebouw in Utrecht een debat plaats over dit vraagstuk waarbij fysici prof. Gerard 't Hooft en prof. Erik Verlinde hun laatste inzichten met u delen.¹⁶ Allen daarheen!¹⁷

Dirk van der Wulp

Bronnen:

- Bill Bryson, Een kleine geschiedenis van bijna alles, vert. Servaas Goddijn; Olympus 2012;
- Martijn van Calmthout, 'Schrödingers kat gevat'; in: Volkskrant, 8 juni 2013;
- Dennis Dieks, 'Realisme en quantummechanica'; in: Jaap van Brakel en Diederik Raven (red.), Realisme en waarheid; Van Gorcum Assen/Maastricht, 1991, hoofdstuk 9;
- Amanda Gefter, In Einsteins achtertuin. Een duizelingwekkende toer langs de mooiste ideeën uit de natuurkunde, vert. Ingrid Ottevanger en Wim Scherpenisse; Maven Publishing, 2014;
- Ger Groot, 'Wel goed maar niet God'; in: Trouw, 30 augustus 2014;
- Immanuel Kant, Kritiek van de zuivere rede, vert. Jabik Veenbaas en Willem Visser; Boom Amsterdam 2004;
- André Klukhuhn, De geschiedenis van het denken. Filosofie, wetenschap, kunst en cultuur van de oudheid tot nu; Uitgeverij Bert Bakker Amsterdam 2003, deel IX en epiloog;
- Gerard Nienhuis, 'Niemand begrijpt de quantummechanica. Maar iedereen kan die toepassen'; in: De Academische Boekengids 83 (2010);
- Herman Philipse, 'Alleen de wetenschap is de maat der dingen'; in: NRC Handelsblad, 13 december 2008, website: http://vorige.nrc.nl/opinie/article2099090.ece/Alleen_de_wetenschap_is_de_maat_der_dingen;
- Pieter Vermaas, 'Modale Interpretaties van Quantummechanica: Filosofie tussen Fysica en Metafysica'; in: Algemeen Nederlands Tijdschrift voor Wijsbegeerte, jrg. 93, nr. 2, 2001, p. 93-104;
- Rienk Vermij, Kleine geschiedenis van de wetenschap; Uitgeverij Nieuwezijds, 2006, hoofdstuk 10;
- Gieljan de Vries, 'Onder de kwantum motorkap'; in: Kennislink, donderdag 22 mei 2008, website: <http://www.kennislink.nl/publicaties/onder-de-kwantum-motorkap>.

¹⁶Het debat wordt door Studium Generale Utrecht opgenomen en is later als videobestand na te kijken (www.sg.uu.nl).

¹⁷Ik dank Jan Riemersma en anderen voor hun kritische blik op een eerdere versie van dit artikel.