Aanvulling op de tekst van *TBR* 2026/114, p. 901-913: de meer uitvoerige versie van par. 2, over de quantumtheorie (ingekort gepubliceerd in *TBR*)

Het *conditio sine qua non*-vereiste voor causaal verband en de 100-jarige quantumtheorie. Een anachronisme dat het aansprakelijkheidsrecht ontregelt (Deel I)

J.M. van Dunné

[….]

2. De 100-jarige quantumtheorie: oorsprong en relevantie

2.1 Voor het Quantum Jaar werd 1925 gekozen als begin van het eeuwfeest voor de moderne natuurkunde. Begrijpelijk, maar dat was een keuze die ook anders had kunnen zijn. er is namelijk sprake van de Oude quantumtheorie die rond 1900 zijn oorsprong vond, en de Nieuw quantumtheorie die gekoppeld is aan een baanbrekend artikel van een jonge onderzoeker, Werner Heisenberg in 1925.[1] Sinds die tijd is de theorie onder de naam quantum*mechanica* verder gegaan, niet zonder reden, zoals nog zal blijken. De nieuwe visie op natuurkunde had echter nooit kunnen ontstaan zonder het werk van de grondleggers van de Oude quantumtheorie, giganten als Max Planck, Niels Bohr en Albert Einstein, en anderen (tot de voorlopers behoren Rutherford en Thomson, zelfs onze Constantijn Huijgens in het verre verleden wordt genoemd).[2] De grondleggers hebben zich na 1925 nog intensief met de nieuwe leer bezig gehouden, soms in een polemiek met de jongere generatie fysici, in klassiek geworden briefwisselingen.

Die ontstaansgeschiedenis van de nieuwe natuurkunde is ook voor juristen interessante kost, om drie redenen. De individuele bijdragen van de natuurkundigen uit die tijd – als gezegd, fundamenten leggend voor de nieuwe leer - krijgen nog steeds de erkenning in onze tijd, ze vormen een onderdeel van het geheel en zijn *common knowledge* in die wereld en in alle natuurkundestudies opgenomen. Men bouwt voort op het werk van de voorvaderen, die voor hun werk indertijd steevast met een Nobelprijs beloond werden. In de juridische wereld was zo'n traditie lange tijd ook het geval, maar tegenwoordig lijken civilisten zich alleen op de wetgever (het BW, anno 1992) of een standaard-handboek (Asser-serie, bijvoorbeeld) als bron te verlaten. Herkomst van rechtsregels en normen blijft duister, laat staan dat men de bijdragen van Grote Civilisten nog op het netvlies of in het achterhoofd heeft. Ik moest laatst een kantoorcursus geven voor jonge advocaten, en mijn gastheer fluisterde mij tevoren toe: 'Denk eraan, ze weten niet wie Scholten en Eggens zijn'. Maar ook voor juristen geldt: 'Het volk dat zijn verleden niet kent, heeft geen toekomst'. Het recht is in een continue ontwikkeling, waarbij voortgebouwd wordt op oude elementen, die elementair zijn voor iedere ontwikkeling. Het is een teken aan de

[1] Hij had zich op het eilandje Helgoland teruggetrokken om hooikoorts te ontvluchten en aan een probleem in het atoommodel van Bohr te werken, met zijn van baan springende elektronen. Zie: C. Rovelli, *Helgoland. Het verhaal van de kwantumfysica, de ingrijpendste wetenschappelijke revolutie aller tijden,* 2021, waarover: *De Ingenieur*, 11 juni 2021.

[2] Het waren toen revolutionaire tijden, in 1896 bracht Wilhelm Röntgen zijn stralen aan het licht, waarop Henri Berquerel radioactiviteit bij uranium ontdekte, toegejuicht door Henri Pointcaré: 'een nieuwe wereld zal zich openen!'

wand, dat in sommige rechtenfaculteiten het vak Rechtsgeschiedenis afgeschaft is (met Romeins recht als onderdeel) en Rechtsfilosofie op de tocht staat. Hieronder zal nog blijken dat het meest aangehaalde handboek *Verbintenissenrecht* ook een exponent van die trend is, tot schade van het onderwerp causaliteit.
Een tweede aspect, van evenveel belang voor de juridische wereld, is dat de Grote Natuurkundigen ieder een eigen element hebben ontwikkeld en toegevoegd aan het spectrum waaruit de nieuwe leer ontstaan is, als een nog steeds herkenbaar, dragend onderdeel. Dat is, *mutatis mutandis*, in het recht niet anders, maar blijft tegenwoordig doorgaans onder de oppervlakte in de benadering van de grote rechtsvragen. Hieronder zal dat nog aan de orde komen.
Tenslotte een derde kenmerk van deze natuurkundige queeste, elk afzonderlijk onderdeel en invalshoek in de problematiek werd onderworpen aan empirisch onderzoek en pas serieus genomen wanneer uit experimenten gebleken was dat de theorie opging, of dat nu over licht, straling of energie ging. In de wereld van juridisch onderzoek is het effect van een theorie op de praktijk doorgaans een ondergeschoven kindje, of zelfs in het geheel niet aan de orde. Om het wat cynisch te zeggen, doorgaans geldt het adagium: 'Als de theorie niet klopt met de feiten, des te erger voor de feiten'. Hier bedoeld in de zin van: wordt de rechtsbescherming van justitiabelen, of op iets hoger plan, de rechtvaardigheid, gediend met deze theorie? Meer in het platte vlak: de bewijspositie verbeterd, ontvankelijkheid in rechte toegenomen? Vaak is dat slechts de sluitpost van het geheel, als dat zo uitkomt, niet het vooropgezette doel van het onderzoek: een theoretisch goed klinkende, juridisch-dogmatische sluitende formule. Dat laatste vaak, zoals dat in de betreffende faculteit, of bij de promotor of begeleider in goede aarde valt, er moet tenslotte nog aan de carrière gedacht worden.

2.2 Maar nu eerst een introductie van de quantumtheorie, onder de naam quantum*mechanica* tot ontwikkeling gekomen. Hieraan gaan twee *caveats* vooraf: de nieuwe natuurkunde vraagt om begrip dat *contra-intuïtief* is, en het is bovendien een heel gecompliceerde materie, typisch iets voor bèta's en techneuten, en die zijn onder juristen niet zo talrijk, valt mij wel eens op.[3] Het contra-intuïtieve zit hem hierin, dat de wereld zoals wij die kennen op zijn kop gezet wordt: deeltjes materie en golven bestaan in dualiteit, dat wil zeggen, ze zijn niet onafhankelijk van elkaar. Het zijn ook geen normale deeltjes of golven: deeltjes kunnen op twee plaatsen tegelijk zijn, golven zijn niet rechtlijnig, zoals een leek zou verwachten. Zekerheid is ver te zoeken, het gaat steeds om 'waarschijnlijkheid': het bepalen van de *kans* dat een deeltje *x* zich op locatie *y* bevindt.

De complexiteit kan het beste geïllustreerd worden aan een uitspraak van Richard Feynman: 'I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics'. Die uitspraak uit 1960 van deze Nobelprijswinnaar wordt regelmatig aangehaald als nog steeds geldig. Opvallend is ook dat vrijwel alle Grote Natuurkundigen op dit gebied, vrijwel steeds met Nobelprijzen geëerd, indertijd in grote aarzeling en verwarring verkeerden over hun bijdrage aan de quantumtheorie, en daar ook uiting aan gaven. Soms wilden zij ook niet tot aanhangers van die theorie gerekend worden of bleven zij kritiek erop uiten (Einstein voorop). De oude natuurkunde speelde hen daarbij parten,

[3] De door mij geraadpleegde literatuur is: Carl J. Pratt, *Quantum physics for beginners,* 2024, Quantum Quill Press, U.K.; Brian Cox & Jeff Forshaw, *The Quantum Universe: everything that can happen does happen*, 2012, Penguin Books. De auteurs vermelden dat de lezer desgewenst de wiskundige formules mag overslaan. Zie verder ook op het Internet: Wikepedia, etc.

en ook de dagelijkse werkelijkheid die haaks stond op de nieuwe inzichten. Beroemd geworden is Einsteins uitspraak, naar aanleiding van de heerschappij van onzekerheid en kansen in de nieuwe leer: 'God dobbelt niet!'

Wat hield de oude leer in? Daarvoor staat model de 3 wetten van Newton (1687) over beweging, kort gezegd: 1. Ieder voorwerp verkeert in een staat van rust of van een uniforme beweging in rechte lijn tenzij het wordt blootgesteld aan een kracht; 2. Een voorwerp met massa ondergaat een versnelling *a* wanneer een kracht F daar op werkt (F=*ma*); 3. Tegenover elke actie staat een gelijke en tegengestelde reactie.
Deze wetten van Newton over object, tijd en plaats werden door de quantumtheorie terzijde gesteld: een deeltje verkeert voortdurend in beweging, zijn plaats kan slechts met *waarschijnlijkheid* vastgesteld worden. Bovendien kan het *op 2 plaatsen tegelijk zijn*, tot in het oneindige toe (zelfs in het universum, volgens recentere stromingen als de *Many Worlds Interpretation*, van Everett (1957) en DeWitt (1970)). Verder kunnen deeltjes ook onderling vervlochten zijn (*entanglement*), waardoor experimentele waarneming van één deeltje, directe invloed heeft op een ander deeltje op een totaal andere (onbekende) locatie.

Ook op gebied van empirisch onderzoek werd de klassieke natuurkunde ondersteboven gegooid: in de geest van Newton kan onderzoek de exacte vaststelling geven aan object, tijd en plaats, en als het resultaat onnauwkeurig is ligt dat aan de onderzoeksmethode, die verbetering behoeft. In de quantumtheorie gaat empirisch onderzoek altijd over waarschijnlijkheden, zoals wij zullen zien. Daar komt nog bij, dat de waarneming het object van onderzoek verstoort, een uiterst verontrustende gedachte in de klassieke natuurkunde van voor 1900.
Onder het regime van de Oude quantumtheorie van de eerder genoemde grondleggers Planck, Bohr en Einstein was er minder reuring in de natuurkunde, maar werden toch ook al vaste overtuigingen ruw opzij gezet. Planck gaf rond 1900 de aftrap met de opvatting dat energie-uitwisseling niet continu verloopt, maar in kleine, discrete pakketjes gebeurt (pakketje = *quantum*). Einstein haakte daarop in en gaf in 1905 een nieuwe visie op licht: dat bestaat ook uit afzonderlijke deeltjes of energiepakketjes, later fotonen genoemd, en niet alleen uit golven. Bohr paste in 1913 de nieuwe inzichten toe in zijn atoommodel, de wijze waarop elektronen (oneindig) om de kern cirkelen in vaste banen, maar kunnen verspringen naar een andere baan, hoger of lager.[4]

Dit waren de grondstenen waarop in 1925 en later voortgebouwd werd, allereerst door Heisenberg, direct daarin gevolgd door Schrödinger, waarmee de quantummechanica ontstond die nu het eeuwfeest beleeft. Aan hun namen zijn verbonden, respectievelijk de matrix- en de golfmechanica. Voor ons onderwerp is van groter belang het door Heisenberg in 1927 verdedigde zogenaamde *onzekerheidsprincipe* ('Uncertainty principle'): de zekerheid die verkregen wordt over één onderdeel (deeltje), veroorzaakt steeds onzekerheid over het andere, ermee verbonden onderdeel (golf).

[4] De 3 Giganten werden geboeid door resp. de stralingswerking van het zwarte lichaam, het foto-elektrische effect en atomaire spectra. Bohr bouwde voort op Thomson, ontdekker van het elektron in 1899, en op Rutherford (bij wie hij in de leer gegaan was), die in 1911 het atoom had beschreven als een kern (nucleus) omgeven door elektronen. Ik laat de bijdragen hierbij van andere grote natuurkundigen, als Sommerfeld, De Broglie, Pauli, Crompton en Millekan met hun experimenten op dit gebied onvermeld.

Met andere woorden, hoe preciezer de locatie van een deeltje bepaald kan worden, hoe minder wij over de snelheid (momentum) te weten kunnen komen, en *vice versa*.[5] Hieraan verwant is de figuur van *superposition*, een deeltje kan gelijktijdig in verschillende staten verkeren. Dat heeft niet alleen geleid tot de aanname van het eerder genoemde onzekerheidsprincipe – het niet gelijktijdig kunnen meten van zowel positie als snelheid van een deeltje – maar ook tot de ontwikkeling van de quantumcomputer. In de huidige computer vertegenwoordigen bits een waarde van óf 1, óf 0, maar qubits zijn een combinatie van 1 én 0 tegelijkertijd, en 2 qubits kunnen in een superposition van 4 staten verkeren, enzovoort. Aldus kunnen zeer complexe staten tegelijkertijd gehanteerd worden, met een ongekende rekenkracht.

2.3 Nog enkele afrondende opmerkingen over de quantummechanica. Ik wees er eerder op, dat de geesten intern soms sterk verdeeld waren, de rijen niet altijd gesloten waren. Een beroemd voorbeeld daarvan staat bekend als 'de Kat van Schrödinger', een denkbeeldig experiment door hem in 1935 gepubliceerd om de quantummechanica, met zijn onzekerheidspostulaat en de opvatting dat waarneming het object verstoort, belachelijk te maken. In een doos wordt een kat geplaatst met een flacon waaruit dodelijk gif lekt. Na enige tijd is de vraag, of de kat nog levend is, of gedood door het gif. Zonder de doos te openen (waarneming) is het onmogelijk om uitsluitsel daarover te verkrijgen, maar na opening van de doos bestaat die vraag niet meer: de kat is óf levend, óf dood. *Exit*: 'kansen'-benadering van quantummechanica.
Tot grote frustratie van Schrödinger leidde dit denkbeeldig experiment niet tot de afgang van de bestreden theorie, maar werd het juist door de aanhangers ervan aangehaald als beste illustratie van hun theorie, precies wat ermee bedoeld werd: het gaat slechts om 'kansen', en pas bij waarneming weet men waarover het gaat, terwijl het object erdoor beïnvloed werd.
Ook Einstein werd genoemd als criticus van de mede door hem gelanceerde quantumtheorie, waaruit de quantummechanica ontstaan is.[6] Opmerkelijk is dat onderzoek naar de relatie van die theorie tot Einsteins relativiteitsleer nog steeds geen resultaat opgeleverd heeft (evenals trouwens die tot de zwaartekrachttheorie).[7]

De Nobelprijs Natuurkunde 2025, op het gebied van quantummechanica gegeven, werd in de Inleiding al genoemd. Bij die prijs wil ik nog even stilstaan, want het werpt licht op een aspect van de quantummechanica dat nog niet vermeld werd. Het onderzoek van John Clarke, Michel Devoret en John Martinis gaat niet alleen over het gedrag van zeer kleine deeltjes in de microsfeer, maar het geldt ook voor de macroscopische sfeer, de zichtbare wereld. Met dat onderzoek werd aangetoond dat een groep elektronen zich als één quantumdeeltje kan gedragen en dwars door een betonnen muur kan gaan, waar een bal tegen zou afketsen, het zogenaamde 'tunnelen'. Het droeg bij aan de ontwikkeling van de quantumcomputer.

---

[5] Cox & Forshaw, p. 54. Heisenberg nam hiermee stelling tegen Schrödingers visie op de werking van golffuncties, die een fysiek beeld van het inwendige van een atoom zou bieden. Heisenbergs samenwerking met Bohr leidde vervolgens tot de zogenaamde 'Kopenhagense interpretatie' van quantummechanica.

[6] Einstein ging erover in debat met Bohr, in een klassiek geworden briefwisseling. Tegenwoordig wordt vrij algemeen aangenomen dat Bohr dat debat gewonnen heeft. Overigens ondervond Einstein met zijn relativiteitstheorie (1905) ook veel tegenstand, pas in 1921 kreeg hij de Nobelprijs ervoor.

[7] Einsteins gaf tenslotte als verklaring voor quantummechanica, de mogelijkheid van 'onbekende variabelen' die dergelijke opvattingen zou kunnen rechtvaardigen. Dat werd echter later empirisch weerlegd.

Tot zover een beschrijving van de quantumtheorie en -mechanica voor de jurist als geïnteresseerde leek, door een dito schrijver. Hoog tijd om ons nu te wenden tot de inbreng van natuurkunde in de juridische wereld, met het *conditio sine qua non*-vereiste bij de vaststelling van causaal verband als thema. In dat kader zal bij de afronding nog teruggekeerd worden naar de wereld van quantummechanica.