

Gepubliceerd als: "Niet-ruimtelijkheid als werktuig", in *Grenzeloze Wetenschap: Dertig Gesprekken met Vlamingen over Onderzoek*, Van Pelt, J., Garant, Leuven-Apeldoorn.

NIET-RUIMTELIJKHEID ALS WERKTUIG?

Prof. dr. Irina Veretennicoff is gewoon hoogleraar aan de Faculteit Toegepaste Wetenschappen en directeur van het Laboratorium voor "Photonic Computing and Perception" aan de Vrije Universiteit Brussel.

Prof. dr. Diederik Aerts is onderzoeksleider bij het Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek, hoofd van de onderzoeksgroep Fundamenten van de Exacte Wetenschappen, en directeur van het Centrum Leo Apostel aan de Vrije Universiteit Brussel.

Natuurkunde, zo zeggen Irina Veretennicoff en Diederik Aerts, is een taal en een techniek om een dialoog te voeren met de natuurverschijnselen die ons omringen en waarvan we zelf deel uitmaken, om dus niet alleen de zogenaamde "werkelijkheid" te begrijpen maar ook om voorspellingen over de werkelijkheid te maken op basis van theorieën of om hypothesen over de werkelijkheid te toetsen via experimenten. Natuurkunde heeft zeker als voorbeeldwetenschap voor vele van de andere wetenschappen gediend. De Natuurkunde heeft een fundamentele wending genomen gedurende de eerste helft van deze eeuw, toen de twee meest revolutionaire theorieën, de relativiteitstheorie en de quantummechanica, geboren werden.

Diederik Aerts : De relativiteitstheorie en de quantummechanica hebben een totaal nieuwe fase in de geschiedenis van de westerse wetenschap ingeleid. Het zijn theorieën die beide zeer fundamentele en contra-intuïtieve kennis over de werkelijkheid hebben aangereikt. Nog steeds worstelen de natuurkundigen met deze theorieën; vele aspecten zijn nog niet begrepen en andere aspecten vragen om verdere uitwerking. Enkele fundamentele concepten van ons wereldbeeld, zoals het concept ruimte en ruimtelijke scheiding, worden bijvoorbeeld ook op een intrinsieke manier in vraag gesteld.

Het is voor de theoretische natuurkundigen één van de grootste uitdagingen, een theorie op te bouwen die o.m. deze twee fundamentele theorieën kan verzoenen. Er blijken zeer diepe conceptuele problemen samen te gaan met deze zoektocht.

Zoals reeds dikwijls in de geschiedenis van de wetenschap het geval is geweest, zal de oplossing van dit probleem waarschijnlijk uit een onverwachte hoek komen, menen beide fysici. Een zeer spectaculaire vooruitgang verwachten ze uit het nieuwe samenspel tussen technologie en fundamentele natuurkunde - vooral de quantummechanica in dit geval - dat nu volop aan het groeien is. Steeds maar weer wordt onze technologie gedreven om informatie en energie te manipuleren op een kleinere schaal in kortere tijdsintervallen. Daardoor wordt deze technologie onherroepelijk

geconfronteerd met de mysterieuze werkelijkheid van de microwereld, en zal het in de toekomst nodig zijn om de quantummechanica, de theorie die deze microwereld beschrijft, steeds beter te begrijpen en ook nieuwe en betere formalismen te ontwikkelen.

Irina Veretennicoff meent ook dat Natuurkunde vaak, in haar meest fundamentele aspecten, doorbraken kent als er zich terzelfdertijd technologische ontwikkelingen, of toepassingen afspelen die deze aspecten nodig hebben of hun studie echt mogelijk maakt. Het allereerste voorbeeld dateert van de tijd van Galileï, waarin men het eerder vrijblijvend filosoferen, zoals Aristoteles het deed, opgaf, om met meetinstrumenten (een telescoop, een lat, een klok) over te gaan naar het toetsen van de vooroordelen over de beweging van lichamen aan de (imperfecte !) gegevens van "model"-experimenten.

Inderdaad, dat was een beslissende stap, zegt Diederik Aerts, die uiteindelijk heeft geleid naar de wetten van Newton en naar de klassieke mechanica. Ik voorspel dat nieuwe informatie en energietechnologieën een revolutionaire invloed zullen hebben op de verdere ontwikkelingen van de quantummechanica.

Misschien is dat wel de meest opzienbarende evolutie in de natuurkunde van de laatste decennia, beaamt Irina Veretennicoff. Vanuit de fundamentele van de fysica gaat het erom de wereld rondom ons te begrijpen, van het kosmische, tot het microscopisch kleine en het subatomaire niveau. Wat is materie, licht, tijd, ruimte, kracht, energie, informatie? Hoe worden die opgewekt, doorgegeven, verwerkt, opgeslagen ? Al deze basisbegrippen lijken te convergeren in een domein waar getracht wordt fundamentele kennis te vertalen in systemen die onze maatschappij van vandaag nodig heeft. Fotonica speelt met licht en materie en hun wederzijdse wisselwerking. Het is een uitgelezen domein waar die terugkoppeling tussen fundamenteel en toegepast onderzoek centraal staat. De laser is hét archetype van de impact van theoretische natuurkunde op experimentele natuurkunde en technologie. Er gaat geen maand voorbij of er wordt ergens op de wereld een doorbraak gerealiseerd in het manipuleren, doorgeven, opslaan, verwerken of weergeven van informatie via licht. In onze onderzoeksgroep zijn we precies met deze problematiek bezig.

En in de onze, zegt Diederik Aerts, volgen we deze nieuwe technologieën niet enkel uit interesse, want deze nieuwe experimentele ontwikkelingen leveren essentiële gegevens voor de uitwerking van vernieuwde quantumformalismen, eigenlijk het hoofdonderzoeksonderwerp van onze onderzoeksgroep. De meest interessante gegevens komen nu, enerzijds van de recente, dikwijls zeer spectaculaire, experimenten met individuele quantumdeeltjes waaronder de fotonen, en anderzijds uit de nieuwe, gewoonlijk wiskundig zeer gesofisticeerde, formalismen en theorieën. Zulke experimenten op individuele quantumdeeltjes waren om technische redenen onmogelijk in het verleden. Men kon enkel experimenten uitvoeren op bundels van quantumdeeltjes, zodat tijdens de experimenten

steeds zeer vele deeltjes tegelijkertijd in het spel waren. Daardoor werden sommige, toen reeds geïdentificeerde 'zeer eigenaardige' voorspellingen van de quantummechanica, toch niet helemaal als 'werkelijk waar zijnde' geïnterpreteerd door de natuurkundigen. Omdat er gedacht werd dat deze eigenaardigheden misschien zouden te wijten kunnen zijn aan wiskundige capriolen van de theorie zelf, en deze zich niet noodzakelijk, indien getest, ook zo voor zouden doen in de werkelijkheid. Door de nieuwe experimenten op individuele quantumdeeltjes is hierover uitsluitel gebracht, en het verdict is hard: de quantumdeeltjes gedragen zich werkelijk zo eigenaardig als de theorie had voorspeld en eigenlijk nog eigenaardiger dan de stoutste verbeelding zich had durven voorstellen. Tegelijkertijd zijn er, met deze nieuwe experimenten, nieuwe meer specifieke gegevens in verband met dit eigenaardig gedrag naar voren gekomen, en deze nieuwe gegevens geven aanleiding tot het uitbouwen van nieuwe formalismen, die nieuwe concepten trachten te integreren op een meer begrijpbare manier.

Vertel eens iets meer over dit eigenaardig gedrag?

Een experiment dat voor mezelf baanbrekend is geweest, vervolgt Diederik Aerts, in de zin dat dit experiment me overtuigde van het feit dat de theoretisch reeds gekende eigenaardigheden van de quantummechanica 'werkelijk' zijn, is het experiment dat Helmut Rauch in 1976 uitvoerde in het Laue Langevin Instituut te Grenoble. Rauch slaagt erin om een neutron in zulk een toestand te brengen dat dit neutron "gedelokaliseerd" is. Dit is de term die nu voor dit eigenaardig gedrag gebruikt wordt in het jargon van de quantummechanica, waarbij het ene neutron zich zo gedraagt alsof het tegelijkertijd op de twee plaatsen A en B (op 5 cm van elkaar verwijderd !) aanwezig is. Meer concreet slaagt Rauch en zijn ploeg erin om het neutron zowel op plaats A als op plaats B te manipuleren alsof het werkelijk op deze twee plaatsen 'is'. Om het spectaculaire van dit experiment meer naar voren te laten komen, moeten we ons bewust zijn van het feit dat een delocalisatie van 5 centimeter voor een neutron, zeer veel is. Moesten we het probleem kunnen herschalen en het neutron de dimensie van een appel geven, dan zou Rauch erin geslaagd zijn om een object ter grootte van een appel in zulk een toestand te brengen dat het zich tegelijkertijd manifesteert op twee plaatsen die 50 kilometer van mekaar verwijderd zijn ! Als men er zo over nadenkt is dit effect van niet-lokaliteit voor quantumentiteiten wel zeer spectaculair. Een tweede experiment dat dit effect van niet-lokaliteit zeer overtuigend demonstreert is het experiment dat in 1982 in Parijs werd uitgevoerd door Alain Aspect. Hier gaat het om fotonen, de deeltjes die actief zijn bij de elektromagnetische straling zoals o.m. radiogolven, microgolven, zichtbaar licht en Röntgenstraling. Aspect slaagt erin om twee fotonen in een gepaarde toestand te delocaliseren. In dit geval zijn de plaatsen A en B meer dan 12 meter van mekaar verwijderd en weer lijkt het alsof het paar, bestaande uit twee fotonen, aanwezig is op de twee plaatsen tegelijkertijd. Vermits het hier om een paar fotonen gaat slaagt Aspect erin - en dit is een quantumeffect dat theoretisch door Albert Einstein in 1935 voorspeld werd - een niet-lokale correlatie te creëren tussen de twee fotonen die deel uitmaken van dit paar. Dit is een totaal nieuw type van correlatie die wezenlijk nieuwe eigenschappen heeft. Zo is er

aangetoond geworden dat deze niet-lokale correlaties niet afkomstig kunnen zijn van een gemeenschappelijke oorzaak, zoals dat steeds het geval is voor de gekende klassieke correlaties die we vinden in de wereld rondom ons. Gedurende de jaren tachtig werd een groot aantal van de theoretische natuurkundigen, die werken op de fundamentele van de natuurkunde, benomen door deze problematiek van niet-lokaliteit en Einstein-gecorrleerde quantumdeeltjes, zoals in het experiment van Aspect, en ook onze groep heeft zeer actief deelgenomen aan dit onderzoek. Nu, in de jaren negentig, creëert men Einstein-gecorrleerde quantumdeeltjes bij de vleet en wordt er gezocht naar spectaculaire technologische toepassingen. Er heeft zich de jongste jaren een nieuw gebied gevormd die men quantuminformatica noemt: de studie van informatie-uitwisseling door middel van Einstein-gecorrleerde fotonenparen. Men onderzoekt welk type informatieoverdracht plaatsgrijpt aan de hand van Einstein-gecorrleerde quantumdeeltjes, en sommige natuurkundigen denken dat informatieoverdracht sneller dan het licht mogelijk zou kunnen zijn, wat ons in fundamentele problemen in verband met de principes van de relativiteitstheorie zou brengen. De vraag die onze onderzoeksgroep nu bezig houdt is hoe we dit momenteel goed gedocumenteerd quantumeffect op een verstaanbare manier kunnen introduceren in meer algemene quantumformalismen dan de standaard-quantummechanica. Er blijken hier conceptueel twee verschillende wegen open. Een eerste weg bestaat erin om deze niet-lokaliteit als een soort multipliciteit van aanwezigheid van die ene ter studie zijnde quantumentiteit te interpreteren. Het formalisme van de Feynmann-pad-integralen gaat in deze richting. In deze visie kan elke quantumgebeurtenis zich in de ruimte blijven afspelen, maar het wordt zeer moeilijk om over een quantumentiteit te spreken. Het concept 'entiteit' verliest in dit geval zijn betekenis op quantumschaal. Een andere weg bestaat erin om het concept entiteit te behouden en de hypothese dat elke entiteit zich in de driedimensionale ruimte moet bevinden te herzien. Het is deze weg die we in Brussel onderzoeken. We gaan ervan uit dat een quantumdeeltje in een niet-lokale toestand zich eigenlijk in een niet-ruimtelijke toestand bevindt. Een quantumdeeltje, het neutron in het experiment van Rauch en het paar fotonen in het experiment van Aspect, dat zich in zulk een niet-lokale toestand bevindt is 'niet aanwezig in de ruimte'. De detectie van zulk een quantumdeeltje 'sleurt' als het ware dit deeltje in de ruimte, en het vindt dus maar zijn plaats in de ruimte als een gevolg van de meting, detectie in dit geval.

Wat bedoel je juist met niet-ruimtelijkheid?

Wel, de hypothese die wij onderzoeken, vervolgt Diederik Aerts, zou het quantumeffect verklaren doordat ze ervan uitgaat dat een quantumdeeltje in een niet lokale toestand eigenlijk gewoon niet in de ruimte aanwezig is. De twee plaatsen A en B waaruit het gemanipuleerd kan worden zijn ruimtelijke plaatsen die op een of andere manier allebei dicht tegen de niet-ruimtelijke werkelijkheid zijn waar het ene quantumdeeltje is. Dit betekent dus dat materie, op subatomair niveau, zich niet meer manifesteert in de context van het begrip ruimte zoals wij dat sedert Descartes hebben

geïnterpreteerd. Onder fysici spreekt men van niet-ruimtelijkheid. We moeten ons begrip van ruimte en ruimtelijkheid en ook het begrip 'substantie', zoals door Descartes ingevoerd, herzien, want het klopt niet met de micro-werkelijkheid : de micro-werkelijkheid blijkt geen 'substantie aanwezig in de ruimte' te 'zijn'. Er zijn verdere zeer ingrijpende conceptuele stappen nodig om meer greep te krijgen op deze nieuwe inzichten en gegevens. In het gebied waar onze onderzoeksgroep nu actief is, zegt Diederik Aerts, is men volop bezig om atomen zelf experimenteel in niet-lokale toestanden te brengen. Atomen, in tegenstelling tot neutronen of fotonen, zijn deeltjes waarvan we door de jaren heen de samenstelling hebben leren kennen. Wij zijn nu in opperste spanning aan het wachten om te zien hoe zulke atomen zich in niet-lokale toestanden zullen gedragen. Zelf zijn we, samen met een groep in Parijs een experiment aan het voorbereiden waardoor het misschien mogelijk zal zijn om te kiezen tussen de twee wegen die ik reeds vernoemde; de multipliciteit van een entiteit en het behoud van het concept ruimte, of het behoud van het concept entiteit en de herziening van het concept ruimte. Verder werken we reeds vanaf 1986 met de gehele groep aan de uitwerking van een eigen formalisme, dat nu wel internationaal het formalisme van de Brusselse groep wordt genoemd, en waar we op een eigen manier een aantal van deze nieuwe gegevens uit de experimenten en theoretische ontwikkelingen integreren. In ons formalisme komt een totaal onverwachte verklaring voor de aanwezigheid van het quantumindeterminisme naar voren: dit indeterminisme zou te wijten zijn aan de aanwezigheid van fluctuaties op de interacties tussen meetapparaat en fysisch systeem.

Sommige van die ontwikkelingen lijken wel science fiction?

Ja, maar dat is niet zo, vervolgt Irina Veretennicoff. De relativiteitstheorie van Einstein en de quantummechanica van Heisenberg en Schrödinger zijn ook eerst ontstaan op papier, maar ze hebben jaren nadien aanleiding gegeven tot zeer concrete toepassingen. De laser in de jaren 60 bijvoorbeeld, de optische vezel tien jaar later, de hele halfgeleider-technologie in de jaren 80. Wereldwijd zijn er op dit ogenblik zo'n 35.000 vorsers en ingenieurs bezig met onderzoek, zowel fundamenteel als toegepast, op het vlak van fotonica en optica. Zonder de optische vezel en de vaststelling dat men met glas goedkoop en betrouwbaar informatie kon doorzenden van een plaats naar een andere, zou er nooit zo'n enorme ontwikkeling tot stand gekomen zijn, noch in de experimentele, noch in de fundamentele aspecten van de natuurkunde. Dat heeft onderzoekers ertoe verplicht om te kijken naar wat er gebeurt als fotonen of elektronen onder elkaar of met atomen interageren. Een schoolvoorbeeld is de ontwikkeling van de chip en de hele technologie van de lithografie daarrond. Dank zij die technologie kunnen we vandaag allerlei componenten maken zoals microscopische lichtbronnen, lichtmodulatoren, fotodetectoren, optische vezelsensoren, beeldschermen, optische communicatie en perceptie systeem, enz., waarmee we zaken kunnen exploreren in domeinen waar we vroeger gewoon geen benul van hadden. De toekomstige technologie zal zonder twijfel deze mysterieuze eigenschappen van de micromaterie beter moeten leren begrijpen en manipuleren. De zogenaamde "atoomoptica" waar de rollen

van fotonen en atomen gewoon omgewisseld worden, is daar een voorbeeld van. Je kan nu met licht, laser, spiegels, golfgeleiders van atomen maken. Toegepaste natuurkunde en fundamentele natuurkunde gaan hier werkelijk hand in hand.

In welke richting denkt u dat er onverwachte evoluties zullen zijn?

Onverwachte evoluties zijn per definitie onvoorspelbaar, dat maakt juist fundamenteel wetenschappelijk onderzoek zo boeiend en belangrijk, zegt Irina Veretennicoff. Maar we kunnen huidige trends vermelden. In het gebied van de informatietechnologie bijvoorbeeld. Onze PC's zijn tot nu toe seriële computers waar de bitstream sequentieel behandeld wordt. Om de snelheid en de capaciteit op te voeren heeft men voor specifieke taken parallelle computers ontwikkeld die in staat zijn vele miljoenen operaties per seconde tegelijkertijd uit te voeren. Het is precies in dit domein dat optica en fotonica doorbraken kent, en waar wij op de VUB reeds geruime tijd mee bezig zijn.

Maar nu, zegt Diederik Aerts, denkt men ook aan quantumcomputers. Die systemen, die nog niet kunnen gerealiseerd worden met de huidige technologie en dus voorlopig enkel theoretische objecten zijn, zijn gebaseerd op het principe van niet-lokaliteit en superpositie, niet-ruimtelijkheid dus. Theoretisch kan men gemakkelijke nagaan dat een quantumcomputer essentiële tekortkomingen van de huidige computers zou oplossen; problemen die nu niet berekenbaar zijn worden het wel. Een ander domein is quantumcryptografie. Een van de grote problemen vandaag is de beveiliging van elektronische gegevensoverdracht. Voor een aantal sectoren, is het van groot belang dat boodschappen niet afgetapt worden. Het komt er dus op aan om de boodschap zo te coderen dat ze haar bestemming bereikt vooraleer iemand anders de code kan kraken. Quantumcryptografie is een gebied dat in volle ontwikkeling is, en in tegenstelling met de quantumcomputers, liggen hier de technologische realisaties in het verschiet.

Technologie die enkele jaren geleden nog tot de science fiction behoorde, ligt vandaag binnen het bereik van fysici en ingenieurs, vervolgt Irina Veretennicoff. Het is juist door hun synergie dat de ontwikkelingen in de fysica en de fotonica zo snel vooruitgaan. Heel wat onderzoeksgroepen zijn vandaag bezig met het implementeren van ideeën over licht en materie en fundamentele aspecten van de natuurwetenschappen in concrete toepassingen. Dit impliceert tegelijk dat je instrumenten moet ontwerpen die bepaalde zintuigen van de mens kunnen overnemen en extrapoleren naar die niveaus. In de ruimte is de Hubble telescoop daar een prachtig voorbeeld van. Een van onze dromen op het laboratorium is op kleine schaal een artificieel oog te bouwen. Een instrument dat zou toelaten om aan pre-processing te doen van de enorme hoeveelheid beeldinformatie zoals de mens die via zijn oog waarneemt. Daar is de centrale vraag: Hoe kan men informatie op een optisch betrouwbare en niet invasieve manier uit de buitenwereld halen en hoe wordt die informatie verwerkt tot een bruikbaar gegeven. Met zo'n artificieel oog zouden we automatische

inspectie kunnen doen van productieprocessen, goederen, vervuiling. Maar ook met biofotonische componenten, alternatieven vinden om de werking van het zenuw- en spierstelsel van de mens beter te begrijpen, te monitoren.

Zijn er nu al concrete ontwikkelingen van de fotonica in het verschiet !

Zeer zeker, stelt Irina Veretennicoff. Fotonica speelt een essentiële rol in het ontwikkelen van systemen als videodiskettes, optische sensoren voor de bepaling van druk, temperatuur, chemische samenstelling, optische computers, hoge dichtheid CD's en hoge definitie LC displays. Ook in de robotica, de lucht- en ruimtevaart, de goederenbehandeling, de gezondheidszorg en andere toepassingsgebieden wordt de ontwikkeling van aangepaste lichtbronnen en optische componenten hoe langer hoe meer belangrijk. Holografie bijvoorbeeld is een veelbelovend ontwikkelingsgebied. Je zou bij wijze van spreken de hele Library of Congress in een kubusje van enkele cm³ kunnen stoppen om ze dan in enkele microseconden te kunnen opvragen. Dat soort van ontwikkelingen gebeurt nu nog op basis van de klassieke interpretatie van ruimte, tijd en energie. Maar over enkele jaren zal de wetenschap misschien zover zijn dat superpositie en niet-lokaliteit de toon aangeven en zal de technologie die wij nu baanbrekend vinden al lang voorbijgestreefd zijn.