

# Het experiment in de Quantum-Mechanica\*

De reeks van voordrachten waarin dit past gaat in het algemeen over het experiment. Ik zou de nuance iets anders willen leggen : eerder spreken over de waarneming dan over het experiment ; de waarneming dan, gezien in het licht van de theorie en in het bijzonder van de quantum-mechanica. Het experiment is nauw verwant met waarneming ; het is een waarneming onder speciale geselecteerde omstandigheden die we goed beheersen en die we eenvoudig uitgezocht hebben om over bepaalde probleemstellingen informatie te krijgen ; eenvoudige omstandigheden maar ook eenvoudige objecten. Dit is een van de kenmerken van de natuurkunde temidden van de natuurwetenschappen, dat die zulke eenvoudige objecten van onderzoek gekozen heeft, maar daar soms ook diep in is doorgedrongen en zich daarbij wel eens ver van het aanschouwelijke verwijdert. De wiskunde is misschien nog een eenvoudiger vak, maar dat noem ik geen natuurwetenschap. In de geo-fysica daarentegen gaat het om veel grotere hoeveelheden materiaal en daar is de statistische benadering een meer belangrijke rol gaan spelen, zoals ook in de biologie. In de zuivere klassieke natuurkunde speelt de statistiek ook wel een rol en in de quantum-mechanica wordt die rol nog fundamenteeler. Maar t.o.v. het experiment onderscheidt de quantum-mechanica zich niet zo fundamenteel van de klassieke natuurkunde. Er zijn in de quantum-mechanica en andere moderne gebieden van de natuurkunde wel bepaalde interessante aspecten aan het experiment ; grote verfijning van bepaalde instrumenten en de grote machines die meer en meer nodig zijn en die zo kostelijk worden dat één land dit langzamerhand niet meer kan betalen. (Om sommige experimenten te bekostigen zal meer en meer de samenwerking van alle landen van de wereld nodig zijn). De quantum-mechanica onderscheidt zich echter meer fundamenteel van de klassieke natuurkunde op het vlak van de *waarnemingen* ; het zal dus interessant zijn wat meer op de functie van de waar-

(\*) Deze tekst werd geredigeerd door E. Vermeersch op basis van een bandopname van de lezing die professor Groenewold gehouden heeft in onze voordrachtencyclus. De spreker heeft deze eindredactie gecontroleerd en goedgekeurd onder voorbehoud van de vermelding dat het hier om een verslag gaat van een mondelinge voordracht.

neming zelf de aandacht te vestigen en op de aspecten die daarmee samenhangen.

Het gebeurt veel, in de verschillende gebieden van de natuurkunde, dat een theorie stilaan zijn oorspronkelijk gebied van geldigheid gaat overschrijden. De betekenis van de begrippen wordt overschreden; ze verliezen hun betekenis, en er moet een nieuwe theorie komen; nieuwe begrippen of nieuwe hypothesen, of allebei, gaan een rol spelen. Meestal wordt de oude theorie daarmee niet volledig overboord gegooid maar bewaart in zekere zin in het oude gebied haar geldigheid en kan beschouwd worden als een benadering van de nieuwe theorie in het oude gebied; dit is dan het correspondentiebeginsel zoals het eerst door Niels Bohr geformuleerd is in het geval van de quantum-mechanica. Een ander voorbeeld hebben we in de speciale relativiteitstheorie: wanneer we uitgaan van de niet-relativistische natuurkunde, en we gaan dan kijken naar snelheden die groter worden, en langzamerhand gelijk met de lichtsnelheid, en energieën die groter worden en vergelijkbaar worden met de massa van de systemen waarmee we werken (volgens de formule  $E = mc^2$ ), dan gaat de oude theorie niet meer op en dan moet men een nieuwe theorie hebben, in dit geval de relativiteitstheorie. Als we dan vanuit deze relativiteitstheorie gaan kijken naar snelheden die eerder klein zijn, dan is de klassieke theorie weer bruikbaar en is eenvoudiger om te hanteren dan de nieuwe theorie: dit is een ander voorbeeld van het correspondentiebeginsel. In de quantum-mechanica hebben we ook zo iets. Als we een deeltje hebben met een bepaalde impuls (massasnelheid)  $p$ , dan komt daarmee overeen een lengte  $h/p$  ( $h$  is de constante van Planck). Als die impuls nu heel klein wordt (bvb. deeltje met heel kleine massa), dan wordt deze lengte  $h/p$  van de grootte-orde van de afstanden, die in dit geval voorkomen; en dan hebben we moeilijkheden met de klassieke theorie. Anders gezegd, als de energie  $E$  zo klein wordt dat de uitdrukking  $h/E$  van de orde wordt van de tijden waarin bepaalde periodieke bewegingen plaats hebben, dan moeten we overgaan naar de quantum-mechanica. We kunnen die  $h/p$  gelijk stellen aan een of andere golflengte  $\tau$  en die  $h/E$  kunnen we gelijkstellen aan een of andere periode  $\lambda$  (het omgekeerde van een frequentie). Dan krijgen we de quantum-mechanica en dan is het weer zo dat wanneer de golflengte klein is t.o.v. de karakteristieke lengten van het systeem, of wanneer de periode klein is vergeleken met de tijden die voor dat systeem karakteristiek zijn, dan gaan we weer, in de zin van het correspondentiebeginsel, over naar de klassieke theorie; formeel kunnen we zeggen dat we die overgang kunnen maken door die  $h$  maar klein te maken (maar dit is eigenlijk niet heel correct); dit is dan het correspondentiebeginsel van Bohr.

Die situatie krijgen we o.a. wanneer we kijken naar de electronen in een atoom; daarin is een groot gedeelte van de quantum-mechanica ontwikkeld. Die quantum-mechanica ontstond dus al in het begin van deze eeuw door Planck (het ging dan over straling); later, rond 1910, ontstond de oude quantum-theorie van Niels Bohr, hoofdzakelijk in verband met de electronen in het atoom, en later ook in moleculen, in kristallen enz. Ca 1925 kreeg de theorie een zekere voltooiing door Heisenberg en Schrödinger, door wie ze in een strengere formele vorm werd gebracht. Sinds die tijd zijn er veel toepassingen geweest en is de theorie sterk uitgewerkt. In de dertiger jaren kwam er een volgend gebied van de moderne natuurkunde, waar het niet meer ging om de electronen in het atoom, maar om de deeltjes in de atoomkern (nucleonen): wat we kennen als de kernfysica. Bij de beschrijving van de beweging van deze nucleonen, was de quantum-mechanica nog grotendeels bruikbaar, mits enkele toevoegingen, nl. een nieuw soort krachten: de kernkrachten die tussen die nucleonen voorkwamen. (De vergelijkingen van de quantum-mechanica bleven bruikbaar). Een volgende stap ontwikkelde zich vooral na de tweede wereldoorlog, nl. de veldentheorie: deze houdt zich bezig met de velden van vooreerst de electromagnetische krachten, die tussen de electronen en de kern werken, en verder van de kernkrachten en van nog andere soorten wisselwerking (o.a. zwakke) tussen verschillende deeltjes. Met die velden komen volgens de quantentheorie ook weer bepaalde deeltjes overeen, de zgn. quanten van die velden. Voor het electromagnetisch veld zijn dit fotonen, voor het veld van de kernkrachten zijn dat de pionen of de pi-mesonen. In de veldentheorie wordt de ontwikkeling van de quantum-theorie voor verschillende nieuwe problemen gesteld. In de eerste plaats door het onbeperkt toenemen van het aantal vrijheidsgraden, en ook door de eisen van een vereniging van de quantum-theorie met de (speciale) relativiteitstheorie en andere symmetrie- en behoudsbeginselen. Ondanks het feit dat er nog diepgaande moeilijkheden in zitten, zijn hier toch belangrijke vorderingen gemaakt. De laatste stap is dan de theorie van de elementaire deeltjes. Men heeft, door hoge energieën aan te wenden, kunstmatig nieuwe deeltjes kunnen maken, die ook « vreemde deeltjes » genoemd worden, omdat ze in normale omstandigheden niet voorkomen.

Als deeltjes heeft men thans vooreerst de lichte deeltjes: de *leptonen* (vb. electronen). Verder heeft men de *nucleonen*, de deeltjes in de kern (protonen en neutronen), die samen met nog andere deeltjes, de hyperonen die zwaarder zijn en die vreemd zijn, de *baryonen* vormen. Daarnaast hebben we nog de *mesonen* waarbij de pionen horen, (de deeltjes die overeenkomen met de kernkrachten) en dan hebben we nog de *fotonen*, de deeltjes die horen bij het electromagnetische veld. De vreemde deeltjes (en ook

de vrije neutronen) zijn geen stabiele deeltjes, ze hebben maar een eindige levensduur, en vallen na een poos uiteen in andere deeltjes. Soms is die levensduur zeer kort, en hoe korter die wordt, hoe minder zin het heeft die dingen als deeltjes te beschouwen. Het heeft nog enige zin zolang als de levensduur groter is dan de tijd die we nodig hebben om met zo'n deeltje experimenten te doen.

Wanneer deze tijd te kort is om het nog te kunnen waarnemen, kan men moeilijk nog van een deeltje spreken; wat er nog van overblijft zijn dan de zogenaamde *resonanties*: men merkt dat er iets aan de hand is, nl. dat er iets overgebleven is van wat men bij langere levensduur een deeltje kan noemen. Zo komen we in een steeds abstracter formalisme terecht.

De voornaamste aspecten waarover we hier in verband met de waarneming willen spreken komen al tot uiting in het eenvoudigste gebied van de quantum-mechanica dat rond 1925 onstond; later zijn er wel interessante dingen bijgekomen, maar het meest essentiële zit al in dat « oude » stuk; we zullen ons dus hiertoe hoofdzakelijk beperken. Over de beginselen van de quantum-mechanica heerst schijnbaar altijd nog strijd. De quantum-mechanica zelf is een grondig uitgewerkt vak dat goed geverifieerd en uit en te na toegepast is; over de *beginselen* echter is voortdurend strijd, die steeds weer opblaait. Bij nadere analyse zien we dat deze strijd over welbepaalde punten gaat: het gaat in de regel over kwesties van interpretatie en over standpunten die onaanvechtbaar zijn, maar ook onverdedigbaar en irrelevant voor de toepassingen, en die bij nader toezien ook helemaal geen fysica meer zijn, maar eerder metafysica. M.a.w. het gaat hier om een strijd schijnbaar tussen fysici, die zich echter bij deze discussie gedragen als metafysici. (Een interessant voorbeeld hiervan was een conferentie enkele jaren geleden in Bristol, waar fysici en filosofen bij elkaar gebracht werden; het waren daar vooral de fysici die elkaar als filosofen in de haren zaten). Om deze discussies over interpretatie te voeren, moet men minstens de fysica zelf grondig kennen, anders zijn ze volkomen waardeloos. Of ze *met* die vakkennis minder waardeloos zijn, laat ik voor het ogenblik in het midden.

Een preciesere formulering van *waarneming* is de *meting*: een waarneming die kwantitatief is. In de quantum-mechanica zijn er voor de fysicus een aantal interessante problemen in verband met die meting; en mogelijk zijn er ook een aantal problemen in die ook voor de filosoof belangrijk zijn.

Vooreerst wil ik kijken naar de problemen die voor de *fysicus* interessant zijn. In beginsel hadden die problemen in het begin kunnen opgelost worden, kort na het invoeren van de volledige quantum-mechanica van 1925. Toen

lag het materiaal klaar, op grond waarvan een tamelijk volledige theorie van de meting in de quantum-mechanica kad kunnen worden opgebouwd. Dit is niet gebeurd : het wordt nu pas de laatste jaren duidelijker hoe de zaken liggen, zonder dat een volledig bevredigend antwoord gegeven is.

Wanneer we een objectsysteem hebben en daar een meting aan gaan doen, dan is één meting maar van heel beperkte interesse. We kunnen wel enige informatie krijgen over de *kinematische* eigenschappen van zo'n systeem, over de grootheden die we daaraan kunnen meten. Daar zijn bepaalde interessante dingen in, b.v.b. wat betreft de *complementariteit*, (Niels Bohr) : bepaalde begrippen (zoals van deeltje en golf) sluiten elkaar uit en vullen elkaar aan. Daarmee hangt nauw samen de onzekerheidsrelatie, die zegt dat er bepaalde (complementaire) grootheden zijn (b.v.b. de plaats van een deeltje en de impuls) die niet gelijktijdig bepaald kunnen worden. (Naïef uitgedrukt, als de plaats gemeten is en men gaat dan de impuls meten, dan wordt die plaats weer verknoeid). Hetgeen ons in de fysica echter het meest interesseert is hoe systemen *veranderen*, hoe ze bewegen, de *dynamische* eigenschappen van een systeem. Daar nu kan ik alleen informatie over krijgen als ik het systeem verschillende keren na elkaar meet. Wanneer ik opeenvolgende metingen op een objectsysteem uitvoer, dan ga ik dus eerst één meting uitvoeren ; dan kennen we, volgens de theorie, aan het systeem een bepaalde golffunctie toe ; meer algemeen, we kennen er een statistische operator (dichtheidsmatrix) aan toe : *rho* ; het komt er dus op neer dat ik op grond van mijn waarneming mijn formalisme inschakel, in dit geval het toekennen van de operator *rho*. Dat doe ik op een bepaalde tijd :  $t_1$ . Nu is mijn theorie zo, dat die me zegt hoe ik kan uitrekenen hoe in de loop van de tijd die operator *rho* verandert, en dus hoe die op  $t_2$  is. Op  $t_2$  voer ik dan een tweede meting uit. Hier moet ik dan weer het formalisme kunnen uitschakelen dat ik bij de eerste meting heb ingeschakeld, maar dan moet ik een verband hebben, met wat ik waarneem en dit gebeurt zo, dat ik op grond van de *rho* op  $t_2$  de kansen voor de verschillende waarnemingen kan uitrekenen. Op grond van wat ik nu waargenomen heb, kan ik weer een nieuwe operator toekennen : *rho'*, enz. Het verband tussen de verschillende metingen, zoals dit voor mijn formalisme gegeven wordt, is dus een statistisch verband : het gaat over de kansen om verschillende meet-resultaten te vinden. Dat ik alleen maar statistische uitspraken kan doen is één van de typische trekken van de quantum-mechanica. Het feit dat hier waarschijnlijkheidsbegrippen gebruikt worden, maakt dat het alleen maar zin heeft als ik praat over een groot aantal exemplaren, individuen.

B.v.b. in de levensverzekering rekent men ook met sterftkansen van de mensen ; het heeft geen enkele zin om met de sterftkans van één man

te gaan rekenen ; deze theorie zegt niets over één man, maar alleen over een groep van mensen die allemaal in dezelfde omstandigheden zijn. Zo'n verzameling van gelijkwaardige individuen (in een opzicht) noemt men een *ensemble*. Ik moet dus ook niet naar één enkel objectstelsel kijken, maar naar een groot aantal objectsystemen, en op al die exemplaren die meting doen, en op die manier krijg ik die statistische uitspraken over het verband tussen die opeenvolgende metingen. Dat ensemble wordt dan beschreven door die *rho*. Nu is er een bekende controverse, of dit nu een *essentiële* beperking is ; of men nooit verder kan komen dan de beschrijving van een *ensemble*, en of ik toch niet een theorie kan maken over één enkel afzonderlijk systeem, en in beginsel daarover preciese uitspraken zou kunnen doen. Alle pogingen die gedaan zijn om te komen tot een theorie die verder gaat, zijn tot nu mislukt : geen enkele is consistent. Theoretisch moet ik de mogelijkheid open laten dat er op een goeie dag iemand is die wel hierin slaagt, maar ik geloof het niet. Ik zal er dus van uitgaan dat dit het uiterste is wat men bereiken kan. Men kan niet alleen zeggen dat men niet verder kan komen dan statistische uitspraken, maar het is ook mogelijk exact de *grens* aan te duiden hoever men kan komen ; men zou in andere wetenschappen bij zulkaardige problemen alleen beroep kunnen doen op een analogie met de quantum-mechanica als men ook in staat zou zijn even nauwkeurig de grens aan te geven.

Het gaat hier over kansuitspraken, en deze zijn altijd conditioneel ; d.w.z. die hebben altijd betrekking op bepaalde *omstandigheden*. Bij het voorbeeld van de levensverzekering is het zo dat ik een bepaalde groep van mensen kan hebben van een bepaalde leeftijd, waarvoor ik sterftetabellen kan opmaken ; ik kan ook op grond van het beroep dat ze uitoefenen deze tabellen opstellen ; als ik nu iemand van een bepaalde leeftijd heb, en ik heb zijn levenskansen op dit criterium nagegaan, en daarna kom ik erop dat hij een nogal gevaarlijk beroep uitoefent, b.v.b. glazenwasser, dan doet het er voor die man zelf natuurlijk niet toe, op grond waarvan ik mijn verwachtingen opgebouwd heb ; *zijn* levenskansen verminderen natuurlijk niet omdat *ik* iets over zijn beroep gehoord heb. Alles hangt er voor mij van af welke informatie ik over hem heb, zijn leeftijd of zijn beroep, de kans die ik hem geef heeft alleen betekenis *t.o.v. de informatie* die ik gebruik. Toch zit er in die kansen ook wel iets objectiefs over die man zelf. In de quantum-mechanica nu, doe ik waarschijnlijkheidsuitspraken over een objectstelsel, maar die waarschijnlijkheidsuitspraken zijn conditioneel ; die hangen er van af wat voor informatie ik over dat objectstelsel al heb. Als ik een andere keus maak, zal ik ook andere waarschijnlijkheden toekennen ; ook al gebeurt er met dit systeem zelf niets, toch kan ik op grond van andere informatie een andere *rho* toekennen.

Die  $\rho$  is dus niet zonder meer een objectief gegeven over het systeem ; er zit ook iets subjectiefs in : de keuze t.o. waarvan ik dit systeem beschrijf. Anderzijds beschrijft het ook iets over de objectieve eigenschappen van het systeem. Dit maakt het juist zo ingewikkeld, en het vereist een hele analyse om het uit elkaar te halen. Men kan die  $\rho$  niet zien, als iets wat zonder meer een « objectieve werkelijkheid » beschrijft.

We hebben nu gekeken naar wat er gebeurt tussen twee metingen. Ik heb eerst een  $\rho$  toegekend, op basis van de eerste meting ; ik doe een tweede meting en ik zal nu een nieuwe  $\rho$  toekennen die in algemene regel verschillend zal zijn van de  $\rho$  die ik eerst had toegekend. Het probleem waarmee we ons nu zullen bezighouden is juist dit van de verandering van de  $\rho$  van voor de meting, in de  $\rho$  na de meting. Er is dus met het systeem iets gebeurd bij de tweede meting. Ruwweg zouden we kunnen zeggen dat het systeem door de meting gestoord is, doordat het met het meetinstrument in wisselwerking is geweest. We hebben daar al iets over gezien : als ik een grootheid van een systeem ken door een meting, en ik ga dan een complementaire grootheid meten, dan wordt mijn kennis over die eerste grootheid als het ware teniet gedaan ; als ik daarna weer die eerste grootheid zou gaan meten, dan is die niet onveranderd gebleven. Als ik dus zo'n objectsysteem heb, dan is dit gedurende een zekere tijd in wisselwerking met het meetinstrument. Dit is in de klassieke theorie ook reeds zo, maar daar is het zo dat de inwerking van het meetinstrument op het objectsysteem willekeurig klein kan gemaakt worden. In de quantum-mechanica is daar een grens aan gesteld. Tijdens de wisselwerking is in het meetinstrument ook iets veranderd. Door dan het meetinstrument waar te nemen, kunnen we informatie krijgen over het objectsysteem. Om deze waarneming van het meetinstrument te doen, heb ik dan weer een meetinstrument nodig, en dan komen we uiteindelijk terecht in de hersenen van degene die de waarneming doet. Dit maakt de zaak echter moeilijk want die hersenen zijn nog altijd eerder moeilijk toegankelijk voor een quantum-mechanische behandeling. We kunnen dit dood spoor van de hersenen echter voorkomen, door te zorgen dat het meetinstrument zodanig is ingericht dat het volkomen geautomatiseerd is, en het resultaat van de meting *registreert*, b.v.b. in een ponsband of een foto. Dit geheel mag dan in een afgesloten kastje zitten waar geen waarnemer meer bij kan. Het is dus eigenlijk een registreerinstrument ; de hersenen spelen hier geen rol meer. Pas als het hele proces voltooid is, kan de waarnemer « het luikje openmaken ». Nu gaat hij waarnemen ; nu verandert zijn waarneming wel iets aan de ponsband, maar niet op een *relevante* wijze ; door naar de ponsband te kijken veranderen de ponsgaten zeker niet van plaats, hetgeen zich in het microgebied wel voordoet. Deze registratie is dus *irreversibel*,

en daarvoor moet die in een macrofysisch systeem gebeuren. Een irreversibel proces kan zich alleen in een macrosysteem voordoen, met een groot aantal vrijheidsgraden. Reeds Niels Bohr heeft van het begin af gewezen op het essentieel belang van het macro-fysisch aspect van het meetproces; (ook de vergroting speelt hier wel een rol, maar de betekenis van het irreversibel karakter is veel meer essentieel dan die van het vergrotingsaspect). Door de irreversibiliteit wordt de meting *onaantastbaar* gemaakt voor verdere waarneming (als die tenminste enigszins zachtzinnig te werk gaat). We hebben het meetproces nu dus gesplitst in twee fasen: de registrering en de aflezing en pas bij de aflezing komt de waarnemer te pas. Het registreerproces is een volkomen fysisch proces waar geen levende wezens bij te pas komen.

Het is interessant op te merken dat om een enkele vrijheidsgraad van een micro-systeem waar te nemen (een vrijheidsgraad is zoiets als een coördinaat van één deeltje, dus één deeltje heeft drie vrijheidsgraden, het kan in drie richtingen bewegen;  $n$  deeltjes hebben  $3n$  vrijheidsgraden) er een meetinstrument (registratie-instrument) nodig is met een enorm groot aantal vrijheidsgraden. Daarin ligt dus reeds een enorm grote beperking van wat ik kan waarnemen. Ik kan dus slechts een klein gedeelte van de fysische systemen exact waarnemen omdat het meetinstrument altijd een veel groter aantal vrijheidsgraden moet hebben dan elke vrijheidsgraad die ik waarneem. Dit is dus een nieuwe beperking naast die van de complementariteit.

We hadden dus de verandering van de *rho* tijdens de beweging en hier is de andere verandering van de *rho* onder de meting van het systeem. Nu kan men voor zo'n ensemble een begrip invoeren dat een maat is voor de wanorde van zo'n ensemble, de entropie (vgl. het entropiebegrip in de thermodynamica; men kan het negatieve van de entropie nemen, de negentropie, als een maat voor de orde). Nu blijkt het, dat tijdens de dynamische bewegingen van zo'n systeem de entropie gelijk blijft. Maar in de eerste fase van de meting neemt de entropie toe; in de tweede is het ingewikkelder: dan houden we niet hetzelfde ensemble, dan kiezen we een deelensemble uit, en het deelensemble zal natuurlijk een grotere orde hebben dan het totaalensemble waaruit men het kiest. In de eerste fase van de meting neemt de entropie dus toe, en daaruit ziet men dat wat er dan met dat objectsysteem gebeurt, iets anders is dan wat er bij de beweging gebeurt. Daar is dan de conclusie uit getrokken door von Neumann, dat datgene dat er met dat objectsysteem gebeurt, niet kan beschreven worden met de quantentheorie, met de Schrödingervergelijking, die die beweging beschrijft. Die conclusie is ook niet helemaal terecht, want met de Schrödingervergelijking beschrijf ik wat er met zo'n objectsysteem gebeurt



onder invloed van uitwendige krachten (dit zijn dus de krachten die afkomstig zijn van uitwendige systemen). Daarvoor nemen we een bepaalde benadering, nl. dan verwaarloos ik bepaalde dingen: correlaties tussen microbewegingen in het objectsysteem en microbewegingen in dat uitwendig systeem die verder niet belangrijk zijn, evenmin als de storing door het kijken naar een ponsband. Dat soort correlaties zijn wel belangrijk voor de koppeling tussen objectsysteem en meetinstrument. Dat er in het meetinstrument informatie komt over het objectsysteem, kan slechts door een correlatie tussen die beide systemen. Wanneer ik nu de verandering van het objectsysteem wil beschrijven, onder invloed van het meetinstrument, dan mag ik die correlatie niet meer verwaarlozen. Maar kan het nu niet zo, als die twee met elkaar gekoppeld zijn, dat ik het geheel van objectsysteem en meetinstrument als één fysisch systeem beschouw, en gaat het dan niet weer volgens de Schrödingervergelijking? Er is geen enkele reden om te geloven dat het niet zo zou zijn; het is alleen erg ingewikkeld, want dat meetinstrument is een macrofysisch instrument, met een enorm groot aantal vrijheidsgraden. Als we nu aannemen dat dit kan, dan zou dit betekenen dat ik dit geheel nu met de quantum-mechanica ga beschrijven. Het in- en uitschakelen kunnen we nu ook precieser uitdrukken, het is een omschakelen tussen twee manieren van beschrijven van dat laatste gedeelte van de registreerinstrument, van datgene waar de registratie in is vastgelegd (de ponsband of fotografische plaat). Dit kan ik nu op twee manieren bekijken, 1° de manier waarop de waarnemer het ziet, dus als een macrofysisch instrument of voorwerp, waar ik b.v.b. het ponsgaatje zie. 2° Ik kan het bekijken vanuit de kant van het quantum-mechanisch formalisme, met de abstracte en veel preciesere formele beschrijving. Dit zijn twee verschillende beschrijvingen van hetzelfde systeem, die in de zin van Bohr weer complementair zijn: die ik niet tegelijk kan toepassen, maar die elkaar tevens aanvullen. Er is dus een omschakeling tussen de macrofysische en de microfysische kant. Daarin liggen nu een aantal interessante problemen, vooreerst voor de fysicus, maar ook voor de geïnteresseerde van buitenaf. Het hoofdprobleem ligt in de omschakeling tussen de macro-klassieke beschrijving en de micro-quantumbeschrijving. Deze laatste geeft in alle opzichten omkeerbare processen, terwijl het macrogedrag irreversibel is. Dit verband is een probleem uit de statistische mechanica; er zijn ook een aantal nevenproblemen die meer technisch zijn, nl. hoe die omkeerbaarheid ontstaat; dit hangt samen met het verloren gaan van bepaalde correlaties.

Wat het omschakelingsprobleem betreft, er zitten hier twee probleemgebieden door elkaar, dit van de grondslagen van de quantum-mechanica en vooral van de waarneming (meting) in de quantum-mechanica, en het

andere, het grondprobleem van de statistische mechanica : dit van het verband tussen de omkeerbare processen op micro-schaal, en de niet-omkeerbare op macroschaal. Dit hangt samen met de theorie over systemen met een groot aantal vrijheidsgraden. Dit is één van de gebieden waar de moderne fysica zich veel mee bezighoudt : daarom zijn deze problemen niet in de dertiger jaren opgelost, omdat men moet wachten op bepaalde ontwikkelingen in de statistische mechanica, maar deze laatste wachten dan weer op het probleem van de quantum-mechanica ; het gaat dus om simultane problemen die gelijktijdig moeten worden opgelost.

Men kan nu het volgend overzicht geven, (gedeeltelijk hypothetisch) : men heeft enerzijds de fase van de formele beschrijving in de quantum-mechanica (van de *rho*'s vb.), dit is een volkomen abstract formalisme. De volgende stap is het meer aanschouwelijk model van de klassieke fysica (hoewel de electromagnetische velden ook al zo aanschouwelijk niet meer zijn, dit is een kwestie van gewoonte en aanpassing). Een derde stap is dan terug naar het primitieve beeld dat iedereen van de natuur heeft. Dan zouden we daar (zeer hypothetisch) nog een ander stadium vóór kunnen denken, waar helemaal geen hypothese gebruikt wordt : de directe waarneming. Dit kunnen we echter niet medelen, want deze mededeling kan alleen in de taal gebeuren. Deze veronderstelt al een heel apparaat van logische operaties en hypothesen, die moeilijk van de waarneming zelf geïsoleerd kan worden. Toch kan men die directe waarnemingen misschien wel als een van de drie elementen beschouwen waarop de natuurkunde is opgebouwd, waarbij dan de logische operaties en de hypothesen moeten gevoegd worden.

Men kan zeggen dat uit deze drie elementen alle beweringen uit de natuurwetenschappen in beginsel kunnen worden opgebouwd. Historisch kunnen daarbij dan nog metafysische elementen gevoegd worden die soms bij de ontwikkeling van een nieuwe theorie een rol spelen, maar uiteindelijk worden geëlimineerd.

Tot het primitieve wereldbeeld hoort de idee van de « objectieve buitenwereld » ; deze idee zit zo diep, dat, als ze ooit moet worden herzien, dit met allerlei moeite gepaard gaat (ook de taal is aan die wijzigingen niet aangepast, zodat men voor de volgende lagen een formele taal moet invoeren).

Men kan nog op een verschilpunt wijzen tussen de quantum-mechanica en de klassieke fysica ; als men in de klassieke fysica een fysisch systeem bekijkt, kan men in beginsel de beweging ervan volgen door het continu waar te nemen ; in de quantum-mechanica is dit niet meer mogelijk : daar is de beschrijving van de dynamische beweging zo formeel geworden, dat het directe verband met de waarneming nog sterker verloren gegaan is,

zodat de beschrijving niet slechts eigenschappen van het systeem geeft, maar, doordat het een geconditioneerde waarschijnlijkheid is, ook bepaalde subjectieve criteria van degene die het beschrijft inhoudt: nl. de selectie van datgene t.o. waarvan het wordt beschreven. Als ik t.o.v. een andere selectie beschrijf, dan bekom ik ook een andere *rho*. Verder is het zo dat ik niet verder kan komen bij die beschrijving, dan die statistische uitspraken.

Het meest opvallende verschil met de klassieke theorie ligt hierin: wanneer ik de verandering van het systeem heb tussen twee metingen, en ik wil daar aanschouwelijk iets meer van weten, nl. hoe ik het in de tussentijd moet voorstellen, dan kan ik dat alleen doen door te zeggen wat er zou gebeuren als ik ging waarnemen: maar als ik dit zou doen, zou ik in de verandering van het systeem ingrijpen. Daardoor kan deze verandering niet begeleid worden door iets wat aanschouwelijk is voor de waarneming, dit is een essentieel verschil tussen de quantum-mechanica en de klassieke beschrijving. Wanneer men dit nu wil interpreteren, analoog aan het primitieve beeld van de werkelijkheid, geeft dit natuurlijk allerlei moeilijkheden. Deze strekking naar abstractie zet zich nog door in de moderne gebieden waarmee ik wil eindigen, vooral het gebied van de elementaire deeltjes (die gedeeltelijk alleen maar resonanties zijn). Het begrip « deeltje » wordt hier aan kritiek onderworpen en gaat zijn grenzen overschrijden. In de klassieke theorie had men nog die beroemde onderscheiding tussen de primaire en secundaire kwaliteiten van de fysische objecten, de primaire kwaliteiten (ruimte, tijd, materie) en de secundaire zoals kleur, reuk, smaak, die wij wel waarnemen maar die bij een nadere fysische analyse verdwijnen (kleur is een kwestie van golflengte van electromagnetische trillingen en tonen een kwestie van de frequenties van de geluidsgolven enz.) Iets dergelijks gaat nu langzamerhand ook met de zogenaamde primaire kwaliteiten gebeuren: ook die gaan hun oude aanschouwelijke zin verliezen, de ruimte en tijd in de quantum-mechanica en in de veldentheorie, en de materie nog meer in het terrein van de elementaire deeltjes, waar men eerst de mogelijkheid heeft van de omzetting van materie in andere vormen, en tenslotte het begrip van elementair deeltje zelf zijn zin gaat verliezen. Wat blijft er dan over? Het antwoord is dat het toch zo is dat bij deze ontwikkeling de theorie in elk geval steeds rijker wordt en helemaal niet armer; men kan er steeds meer mee doen. Overigens blijven in het oude gebied de oude begrippen wel bruikbaar, maar alleen binnen deze grenzen. In die abstracte theorie kent men wel nog zogenaamde behoudsgrootheden, behoudsbeginselen, die in verband staan met invariantie, zoals behoud van energie en impuls, en dat hangt dan samen met invariantie onder verschuivingen in tijd en in ruimte (behoud van impulsmoment onder

draaiingen, behoud van lading onder zgn. ijktransformaties). Er komt dus wel iets in de plaats dat behouden wordt als men de notie van het behoud van deeltjes laat vallen, maar dat wat ervoor in de plaats komt is alleen veel abstracter en veel algemener, zodat het vorige alleen maar een bijzonder geval is (in eenvoudige omstandigheden). De theorie wordt dus steeds subtieler, genuanceerder en rijker, het wordt echter moeilijker om te volgen voor degenen die niet in het vak thuis zijn. Ook de regelmaat verdwijnt niet helemaal, maar ook die wordt moeilijker direct te formuleren. Sommige mensen zijn daar nu mee tevreden, anderen niet, de enen zullen zich misschien beroepen op de grenzen die ons door de natuur gesteld zijn, en die doen dan beroep op die objectieve natuur die die grenzen stelt, terwijl zij ook juist diegenen zijn die het meest de betrekkelijkheid van dat objectieve begrip inzien. Terwijl degenen die dit objectieve begrip juist zouden willen handhaven, soms juist het minst tevreden mee zijn met de begrenzing, die door de objectieve buitenwereld aan dit objectieve begrip wordt gesteld. Op deze paradox zou ik deze inleiding willen besluiten.

H. J. GROENEWOLD  
*Rijksuniversiteit Groningen*