

1.1.72

DE HERZIENING VAN HET
PHYSISCHE CAUSALITEITS-BEGINSEL

REDE

UITGESPROKEN TER GELEGENHEID VAN DE DIES NATALIS
DER VRIJE UNIVERSITEIT OP 20 OCTOBER 1952
DOOR DE RECTOR MAGNIFICUS

Dr G. J. SIZOO



J. H. KOK N.V. KAMPEN

DE HERZIENING VAN HET
PHYSISCHE CAUSALITEITS-BEGINSEL

REDE

UITGESPROKEN TER GELEGENHEID VAN DE DIES NATALIS
DER VRIJE UNIVERSITEIT OP 20 OCTOBER 1952
DOOR DE RECTOR MAGNIFICUS

Dr G. J. SIZOO



J. H. KOK N.V. KAMPEN

ARCHIEF
van de
BIBLIOTHEEK der
VRIJE UNIVERSITEIT

Nummer: 1.172

*Mijne Heren Directeuren der Vereniging voor Hoger Onderwijs op Gereformeerden Grondslag,
Mijne Heren Curatoren der Vrije Universiteit,
Mevrouw, Mijne Heren Hoogleraren, Lectoren en Docenten,
Dames en Heren Studenten,
en voorts gij allen, die de viering van de Dies Natalis der Vrije Universiteit met Uwe tegenwoordigheid wilt vereren.*

Zeer gewaardeerde Toehoorderessen en Toehoorders,

De ontwikkeling der natuurkunde, geleid door de steeds zorgvuldiger waarneming der physische verschijnselen, heeft reeds bij herhaling noodzaak tot herziening van denkbeelden van algemeen wijsgerig karakter, die door de eerbiedwaardigheid hunner traditie tot ontwijfelbare axioma's schenen te zijn geworden.

Toen Galileï de valwetten uit zijn waarneming had afgeleid, Kepler door zijn metingen de ellipsvorm der planetenbanen had vastgesteld en Newton tenslotte aantoonde, dat het vallen der aardse voorwerpen en de beweging der hemellichamen door dezelfde gravitatiekracht konden worden verklaard, moest de antiek-middeleeuwse opvatting omtrent de physische beweging worden herzien. In deze, aan de wijsbegeerte van Aristoteles ontleende, beschouwingswijze werd aan de plaats in het wereldruim en aan de geometrische vorm van de banen een kwalitatieve waarde toegekend, werd aan de physische lichamen een verschillende graad van volmaaktheid toegeschreven en werd de beweging gezien als een streving naar de natuurlijke plaats in de ruimte.

Deze opvattingen moesten nu echter wijken voor de wiskundige leer der mechanica, die de beweging achtte te geschieden in een qualiteitsloze ruimte, onder de invloed der physische krachten, als onmiddellijk werkende oorzaken.

Hoe vruchtbaar deze bevrijding uit de kluisters der overlevering, deze wending van het kwalitatieve naar het kwantitatieve, van de finale naar de causale beschouwingswijze, voor de natuurkunde geweest is, bewijst de verrassende ontwikkeling, die er het gevolg van was.

Wat wij thans de klassieke physica noemen, kan gezien worden als het resultaat van een continue voortbouw op de grondslagen welke nu ongeveer drie eeuwen geleden werden gelegd.

Met de voltooiing der analytische mechanica, met de thermo-dynamica en de statistisch-mechanische verklaring der warmteprocessen, met de veldtheorie der electromagnetische verschijnselen en de electronentheorie der materie, scheen deze klassieke natuurkunde tegen het einde van de vorige eeuw alle gebieden der waarneembare physische verschijnselen te omvatten. In het aldus voltooide gebouw leek nog slechts inwendige afwerking en detailarbeid te verrichten.

De grondlijnen van de logische structuur van dit theoretische gebouw kunnen als volgt worden omschreven:

a. De physische lichamen bewegen zich in de absolute ruimte, welke op zichzelf geen physische kwaliteiten bezit, terwijl mathematisch de regels der euclidische geometrie er op van toepassing zijn.

b. De physische verschijnselen voltrekken zich in de absolute, continu vervlietende tijd, die, als zodanig, geen physische werking uitoefent.

c. Het physisch gebeuren is causaal, in dien zin dat de toestand op een zeker ogenblik alle toekomstige toestanden volledig bepaalt.

Het was niet alleen de snelle vooruitgang der natuurkunde, waardoor het vertrouwen in de juistheid dezer grondslagen van het physisch denken werd gevestigd. Het scheen daarenboven een hechte verankering te hebben verkregen in wijsgerige bodem. Niemand minder dan Kant had immers de euclidische ruimte, de absolute tijd en de causaliteit tot noodzakelijke grondvormen van menselijke kennis omtrent de werkelijkheid verheven. Desalniettemin, bleek ook ditmaal de proefondervindelijke wijsbegeerte, zoals de natuurkunde niet ten onrechte in Mussenbroek's tijd in Nederland werd genoemd, zich aan het gezag der bespiegelende wijsbegeerte toch niet blijvend te kunnen onderwerpen.

Toen, na twee en een halve eeuw van moeizame arbeid, toch niet *alle* waarnemingen zich lieten voegen in het theoretisch gebouw, heeft de natuurkunde niet gearzeld haar grondslagen te herzien. Zij heeft dit inderdaad niet eerder gedaan dan uit hoofde der waarnemingen noodzakelijk was. Want pas nadat de invariantie der lichtsnelheid ten opzichte van de beweging der aarde door de proef van Michelson was aangetoond en de poging van Lorentz de uitkomst van deze proef binnen het kader der klassieke physica te verklaren was mislukt, besloot Einstein tot een herziening van de geijkte opvatting omtrent de absolute euclidische ruimte en de absolute tijd en werd de relatieve, vierdimensionale, niet-euclidische tijd-ruimte als nieuwe grondslag voor de physische beschrijvingswijze aanvaard.

Het mag thans wel algemeen bekend worden geacht, dat in de laatste kwarteeuw ook tegen het causaliteitsbeginsel der klassieke physica ernstige bedenkingen van proefondervindelijke aard zijn gerezen. Ook ten aanzien van deze grondlijn in de structuur van de klassieke physica is een revisie aan de orde gesteld.

Aangezien de betekenis hiervan zeker verder strekt, dan het gebied der physica zelf, heb ik gemeend in dit uur Uw aandacht te mogen

vragen voor enige beschouwingen over *De herziening van het fysieke causaliteitsbeginsel*.

Een nadere bepaling van de inhoud die het causaliteitsbeginsel in de klassieke physica had verkregen is daartoe allereerst vereist. De gebruikelijke formulering, nl. „dat de toestand van een fysisch systeem op een zeker ogenblik de toekomstige toestanden volledig bepaalt”, geeft nl. direct aanleiding tot de vraag, wat daarbij onder „de toestand” en wat onder „volledig” moet worden verstaan.

De physica richt zich in haar onderzoek tot de niet-levende natuur en stelt zich tot taak daarin de quantitative betrekkingen op te sporen. Zij verkrijgt haar kennis door waarneming, welke, aangezien het gaat om de getalmatige verhoudingen, steeds de vorm van *telling* of *meting* aanneemt. Meting is daarbij altijd een vergelijking met maatstaven, die aan het veld van onderzoek zelf zijn ontleend.

De kenmerken van de toestand van een fysisch systeem zullen dus *grootheden* moeten zijn, wier getalwaarden door metende en tellende waarneming zijn of kunnen worden bepaald. Wij zullen deze grootheden in het algemeen als *observabelen* aanduiden. Afstanden, snelheden, impulsen, energieën, elektrische en magnetische veldsterkten zijn voorbeelden van observabelen. De volledige beschrijving van een toestand zal dus moeten omvatten de verzameling der getalwaarden van alle observabelen.

Niet alle observabelen behoeven echter door afzonderlijke metingen te worden bepaald. Als bijv. van een bewegende puntmassa de massa en de snelheid bekend zijn, kan de bewegingsenergie uit een eenvoudige wiskundige formule worden afgeleid. Men kan dus volstaan met het minimum aantal observabelen aan te geven, dat noodzakelijk en voldoende is om alle andere door berekening te vinden. Wij noemen deze de *onafhankelijke* observabelen.

Het causaliteitsbeginsel verlangt dus dat de toestand van een systeem op een zeker ogenblik, door de onafhankelijke observabelen zodanig kan worden gekenmerkt, dat ook de toekomstige waarden van deze observabelen daardoor zijn bepaald. In de beschrijving van het „nu” moet besloten zijn „wat worden zal” De toestand moet zowel het „zijn” als de „verandering van het zijn” omvatten.

De physica vat dit probleem aan door aan elk fysisch systeem tweerlei observabelen toe te schrijven. Men zou ze in het algemeen als de *statische* en de *kinetische* observabelen kunnen aanduiden. In de mechanica worden zij resp. *coördinaten* en *impulsen* genoemd, welke termen wij in het vervolg ook in meer algemene zin zullen gebruiken. Deze twee soorten observabelen staan tot elkaar in de volgende betrekking:

a. Als alle impulsen nul zijn, blijven alle coördinaten constant. Het systeem is dan statisch, hetgeen de term statische observabelen rechtvaardigt.

b. De coördinaten en impulsen zijn twee aan twee aan elkaar toege-

voegd, zodanig dat wanneer alle impulsen nul zijn op één na, alleen de aan deze impuls toegevoegde coördinaat verandert.

In de impulsen ligt dus inderdaad de beweging, in het algemeen de verandering, besloten, waarom wij ze kinetische observabelen mogen noemen.

Voor elk fysisch systeem, dat men beschouwen wil, zal het nu allereerst noodzakelijk zijn de passende statische en kinetische observabelen te vinden. Bij een puntmassa, die zich beweegt op een rechte lijn, geldt als coördinaat de afstand van de positie van de puntmassa tot een vast punt op de lijn, als impuls het product van de massa en de snelheid, ook als hoeveelheid van beweging aangeduid. Bij een vast lichaam, dat om een as roteert, kan de hoek tussen een met het lichaam verbonden vlak en een stilstaand vlak, beide gaande door de as, als coördinaat worden genomen. Als impuls geldt dan het totale moment van hoeveelheid van beweging, dat men ook hoeveelheid van draaiing zou kunnen noemen.

Er treden nu in de natuur toestanden op, die zich over een eindige tijd uitstrekken, waarbij wel de statische variabelen veranderen, maar de kinetische gelijk blijven. Men noemt zulke toestanden stationnair. De eenparige translatie en de eenparige rotatie zijn voorbeelden van zulke stationnaire toestanden. Het is van belang op te merken, dat de natuurkunde ten aanzien van zulke toestanden, hoewel zij ongetwijfeld waarneembare veranderingen omvatten, de vraag naar de oorzaak der verandering niet stelt. Pas wanneer ook de impulsen veranderen spreekt men van oorzaken. Men noemt deze dan „krachten”, welk woord daarbij in meer algemene zin moet worden genomen, zodat het bijv. ook koppels omvat. Men stelt de grootte van de „krachten” gelijk aan de veranderingssnelheden van de impulsen. Aan elke veranderende impuls wordt dus een „kracht” toegevoegd, die geacht wordt de toename van deze impuls te veroorzaken en wel zodanig dat de toename per tijds-eenheid, of zoals men ook zegt *de fluctie*, gelijk is aan de „kracht”. Hoewel de krachten als zodanig niet waarneembaar zijn, kan men ze toch observabelen noemen, in dien zin, dat hun aanwezigheid zich verdraagt door de waarneembare flucties van de impulsen. Men kan ze daarom als *dynamische observabelen* aanduiden.

Denken wij ons nu een gesloten systeem, d. w. z. een systeem dat aan alle uitwendige invloeden onttrokken is, dan kunnen alle veranderingen in dit systeem slechts door inwendige „krachten” veroorzaakt worden, die moeten worden toegeschreven aan de wisselwerking tussen de delen van het systeem.

Wil men de toestand op een zeker ogenblik nu zodanig beschrijven, dat daarin ook de toekomstige toestanden besloten zijn, dan zal deze beschrijving niet alleen de statische en kinetische, maar ook de dynamische observabelen moeten omvatten. Deze opzet zal alleen dan tot het gestelde doel leiden, wanneer door deze beschrijving tevens is vastgelegd, wat de toekomstige waarden van de dynamische observabelen zijn.

Daartoe is noodzakelijk en voldoende, dat deze dynamische observabelen op elk moment op ondubbelzinnige wijze worden bepaald door de statische en kinetische observabelen, anders gezegd, de krachten moeten eenduidige functies zijn van de coördinaten en impulsen. Uitgaande van een gegeven toestand kan men dan zeggen, dat de dynamische observabelen een verandering van de statische en kinetische veroorzaken, terwijl in de daardoor ontstane nieuwe toestand de dynamische opnieuw door de statische en de kinetische observabelen worden bepaald.

Het is duidelijk, dat het causaliteitsbeginsel in deze vorm het karakter heeft verkregen van een wetenschappelijke werkhypothese en dat daaruit een werkprogram voortvloeit. De hypothese is, dat alle waarnemingen zullen blijken zich naar dit schema te willen voegen. Het programma omvat allereerst de opsporing van de passende onafhankelijke observabelen voor de onderscheiden physische systemen, vervolgens het formuleren van de betrekkingen, die aangeven hoe de wisselwerkingen, dus de dynamische observabelen, afhangen van de statische en de kinetische observabelen en tenslotte de berekening van de veranderingen, die deze laatste tengevolge van de wisselwerkingen zullen ondergaan.

Wanneer dit programma uitvoerbaar blijkt, dan verkrijgt het „bepaald zijn”, waarvan in het causaliteitsprincipe sprake is, voor de physica betekenis van „voorspelbaar” zijn. Dat het tweede meer inhoudt dan het eerste, blijkt uit de overweging, dat de voorspelbaarheid de eis meebrengt, dat de betrekkingen, die de physische wisselwerking tot uitdrukking brengen, zelf met de tijd niet veranderen, anders gezegd, dat de relaties tussen de dynamische observabelen enerzijds en de statische en kinetische anderzijds, invariant zijn ten opzichte van de tijd.

Wanneer bijv. de gravitatiewet uitdrukt, dat de wederzijdse aantrekkingskracht omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand, dan zal — wanneer dit inderdaad een fundamentele wet is — de evenredigheidsfactor een constante moeten zijn. Stel, dat dit niet het geval zou zijn, dat zij bijv. met de tijd zou blijken toe te nemen, dan zou daardoor de bepaaldheid van toekomstige toestanden nog niet te loor zijn gegaan, wel echter de voorspelbaarheid. Uit de in het verleden waargenomen verandering zou immers zonder meer nooit tot de toekomstige kunnen worden besloten. Het voorspelbaarheidsprincipe zou dan medebrengen, dat wij de gravitatiewet nog niet als een fundamentele natuurwet zouden mogen beschouwen, maar naar de *oorzaak* der verandering van de evenredigheidsfactor zouden moeten zoeken.

Het voorspelbaarheidsprincipe resulteert blijkbaar uit de combinatie van het causaliteitsprincipe met de stelling, dat aan de tijd zelf geen physische werking is toe te schrijven en stelt aan de physica de eis, dat de *fundamentele natuurwetten de tijd niet explicite zullen mogen bevatten*.

Aangezien ook van de *plaats* in de ruimte de onderstelling geldt

dat zij geen fysieke werking heeft, kan samenvattend worden gezegd, dat volgens de opzet der klassieke physica alle waarneembare veranderingen in een gesloten systeem moeten kunnen worden afgeleid uit wiskundige betrekkingen tussen de dynamische observabelen, dat zijn dus de flucties van de kinetische observabelen, enerzijds en de statische en kinetische observabelen anderzijds. Deze betrekkingen zullen invariant moeten zijn ten opzichte van een verplaatsing in de ruimte en een verschuiving in de tijd.

Door een wiskundige beschouwing laat zich hieruit een belangrijke conclusie trekken, nl. dat er bepaalde functies van de statische en kinetische observabelen zullen zijn, die gedurende de veranderingen in een gesloten systeem constant zullen blijven. Deze functies, zullen aangezien zij uit observabelen zijn samengesteld, ook zelf weer observabelen zijn. De energie, de totale hoeveelheid van beweging en het totale moment van hoeveelheid van beweging zijn observabelen, die aan deze eis voldoen. De wetten van behoud van energie, van hoeveelheid van beweging en van moment van hoeveelheid van beweging liggen dus reeds in de opzet van de theorie besloten.

In de discussies over causaliteit en voorspelbaarheid in de physica wordt de geldigheid van deze behoudswetten vaak aangevoerd als een criterium voor het causale karakter van het gebeuren. Men diene daarbij echter wel te bedenken, dat de principes van *causaliteit*, van *voorspelbaarheid* en van *behoud* niet identiek van inhoud zijn, maar dat de volgorde waarin zij hier genoemd zijn, die van een successieve specificatie is.

Het verdient voorts nog de aandacht dat in de klassieke physica aan de bepaaldheid en de voorspelbaarheid steeds de eis der *exactheid* wordt gesteld. Soms wordt ter rechtvaardiging van deze eis gewezen op het wiskundig karakter van de fysieke theorie. Dit argument is echter niet zonder meer genoegzaam. De wiskunde dient in de physica tot formulering van de *betrekkingen* tussen de observabelen. De eigenlijke fysieke grootheden zijn de observabelen zelf. De wiskundige exactheid der *betrekkingen* moet dus onderscheiden worden van de onderstelde exactheid der *observabelen*, die noodzakelijk is voor een exacte voorspelbaarheid.

Aangezien nu de waarden der observabelen steeds door meting worden verkregen, zou onmiddellijk tegen de eis der exacte voorspelbaarheid een bedenking kunnen worden aangevoerd. Het is immers algemeen bekend, dat geen enkele meting van een observabele tot volledig nauwkeurige resultaten leidt. Niettemin nemen wij dan aan, dat er een exacte waarde van de observabele *bestaat* en schrijven wij de gevonden verschillen aan waarnemingsfouten toe. Deze fouten blijken inderdaad door verfijning der meetinstrumenten en meetmethoden te kunnen worden verkleind, terwijl de foutenrekening ons leert hoe wij de vermoedelijke exacte waarde uit de niet exacte metingen kunnen

vinden. De *practische* onmogelijkheid van volkomen nauwkeurige metingen, behoeft ons dus nog niet te weerhouden, de strenge bepaaldheid van de observabelen aan te nemen en daarmee in de *theorie* het principe der exacte voorspelbaarheid te handhaven.

Een tweede bedenking, die reeds een meer principieel karakter draagt, kan ontleend worden aan de discontinue, corpusculaire structuur van materie en electriciteit. In de vaste, vloeibare en gasvormige toestand, doet de materie zich in eerste instantie aan ons voor als een continue vulling van de ruimte. Evenzeer schijnt het electromagnetisch veld het karakter van een continue fysieke uitgebreidheid te bezitten. In aansluiting hieraan zijn de observabelen, waarmee wij in de elasticiteitsleer, in de thermodynamica, in de hydro- en aerodynamica en in de electrodynamicica de toestanden karakteriseren, continue functies van de ruimtelijke coördinaten.

Aan de andere zijde heeft het onderzoek echter geleid tot de overtuiging dat aan materie en electriciteit een granulaire, korrelachtige, structuur moet worden toegekend. De materie bestaat uit moleculen en atomen, de electriciteit uit electronen, en men moet zich daarbij voorstellen dat deze „deeltjes” in een toestand van voortdurende ongeordende beweging verkeren.

Vatten wij een bepaald volume-element van de materie in het oog, dan is daarbinnen geen sprake van een continue verdeling van de massa of de lading over de ruimte, maar deze zijn geconcentreerd in de nagenoeg puntvormige deeltjes. Bovendien wisselt het aantal van die deeltjes voortdurend door de onregelmatige bewegingstoestand waarin zij verkeren. De totale lading en massa die door het volume-element worden omvat zijn dus als voortdurend fluctuerende grootheden op te vatten, de ladingsdichtheid en de massadichtheid zullen binnen het volume-element van punt tot punt verschillend zijn en voortdurend veranderen.

Deze fluctuaties geven onder geschikte omstandigheden ook aanleiding tot waarneembare verschijnselen. Een zeer klein, maar met een microscoop toch waarneembaar, vast deeltje, gesuspendeerd in een vloeistof, of ook een zeer dunne draad opgehangen in een met gas gevulde ruimte, ondergaan zichtbare onregelmatige verplaatsingen, waarvoor op het eerste gezicht geen enkele oorzaak aanwezig schijnt te zijn. Men heeft echter de oorzaak van deze z.g. *beweging van Brown* juist kunnen vinden in de besproken fluctuaties in druk en dichtheid van de omringende vloeistof of gasatmosfeer.

Analoge fluctuaties treden op in alle elektrische observabelen. De weerstand van een draad, de stroom in een electronenbuis, zijn nooit volkomen constant. Zij schommelen, ook als de uiterste voorzorgen voor het constant houden zijn getroffen, om een gemiddelde waarde. Men spreekt hier van *ruisverschijnselen* en schrijft ze toe aan de granulaire structuur der electriciteit.

Deze waarneembare fluctuaties zijn niet voorspelbaar in de betekenis, die wij in het voorafgaande aan dit woord hebben gegeven. Men kan er echter *wel* de beschouwingen der waarschijnlijkheidsrekening op toepassen en daaruit voorspellingen afleiden omtrent de te verwachten middelwaarden en de statistische afwijkingen van die middelwaarden. Bij al onze metingen blijken nu deze fluctuaties, die uit de discontinue structuur van materie en electriciteit voortvloeien en die men ook wel *stochastische* verschijnselen noemt, een grens te stellen aan de nauwkeurigheid waarmede de waarden van observabelen kunnen worden vastgelegd. Daaruit volgt dat een exacte bepaling van de toestand en dus ook een exacte voorspelling uitgesloten is.

Toch is ook deze bedenking nog niet voldoende om het causaliteitsbeginsel te verwerpen. Men kan, teneinde het te handhaven, een onderscheid maken tussen macro-toestanden en micro-toestanden. De eerste zijn dan de schijnbaar continue toestanden, die beschreven worden door de macro-observabelen, d. w. z. de grootheden die wij door onze meetinstrumenten kunnen bepalen. Met de microtoestand bedoelen wij de bewegingstoestand van alle atomen, moleculen en electronen. Weliswaar kunnen wij deze toestand niet waarnemen in de directe betekenis van dit woord, wij kunnen ze echter wel in onze verbeelding te voorschijn roepen. Ook al kunnen wij de coördinaten en de impulsen van een enkel partikel niet in directe zin *meten* dit verhindert ons niet in de *theorie* zodanige grootheden er aan *toe te kennen*. Wij kunnen ze ook observabelen blijven noemen, want door middeling en sommering kunnen wij er grootheden uit afleiden van overeenkomstig karakter, die zich in de macro-verschijnselen als werkelijke observabelen, d. w. z. als meetbare grootheden aan ons voordoen. Tenslotte kunnen wij aan deze micro-observabelen weer exacte waarden toekennen en daarbij aan deze micro-toestanden de idee van de volkomen bepaaldheid en de exacte voorspelbaarheid verbinden. De uitermate grote gecompliceerdheid van deze toestanden en het overweldigend aantal observabelen, waardoor zij gekenmerkt zijn, noopt ons dan echter van een volledige beschrijving af te zien en gebruik te maken van de methoden der waarschijnlijkheidsrekening. Uit het aldus berekende gedrag van de statistische middelwaarden der micro-observabelen, zullen wij tot het te verwachten gedrag der macro-observabelen kunnen besluiten, zodat de metingen der macrophysica toch de toetssteen zullen kunnen zijn voor de uitkomsten der microphysica.

Dat deze metingen in sommige gebieden der macrophysica — men denke bijvoorbeeld aan de mechanica der hemellichamen — een zo hoge nauwkeurigheid kunnen verkrijgen, dat de suggestie der exacte bepaaldheid erdoor kon worden gewekt, wordt dan een begrijpelijk gevolg van het overweldigend grote aantal der micro-elementen waaruit de macro-structuren zijn opgebouwd, waardoor de statistische fluctuaties in de macro-observabelen beneden de grens der waarnemingsfouten blijven. Anderzijds vormen de zoëven besproken stochastische verschijn-

selen een directe aanwijzing voor de juistheid van de microfysische theorie.

Wat de behoudswetten betreft, deze blijven uiteraard in het micro-gebeuren onverminderd gehandhaafd en moeten dus ook in het macro-gebeuren worden teruggevonden. Met name in de equivalentie van warmte en mechanisch arbeidsvermogen vindt ook deze conclusie een fraaie bevestiging.

Zo scheen dan het fysische causaliteitsbeginsel tegen het einde der vorige eeuw, hoewel het in de macrophysica het aureool der exactheid had verloren, in de microphysica zich in ongerepte staat te kunnen handhaven.

In de laatste halve eeuw heeft het onderzoek echter macro-verschijnselen leren kennen, die hun oorzaak vinden in micro-processen waarbij slechts één of enkele micro-structuren betrokken zijn. Het is in het bijzonder de ontdekking van het verschijnsel der radioactiviteit, dat tot deze ontwikkeling heeft aanleiding gegeven. Het is ook bij het onderzoek van dit verschijnsel, dat voor het eerst ernstige twijfel is gerezen aan de mogelijkheid het causaliteitsbeginsel in de oude vorm voor het micro-gebeuren te handhaven.

Dit onderzoek heeft geleid tot de voorstelling, dat in de kern van een radioactief atoom een plotselinge toestandsverandering kan optreden, waarbij een materieel deeltje met grote snelheid uit de kern gestoten wordt. Wij zullen zulk een toestandsverandering een *desintegratie* noemen. De energie, welke één zo'n uitgestoten deeltje meedraagt, is zo groot, dat het in staat is een waarneembaar macro-proces teweeg te brengen, bijvoorbeeld een zichtbare lichtflits op een fluorescerend scherm of een uitslag van een meetinstrument. Men zou deze deeltjes dus kunnen beschouwen als boodschappers, die in de taal van de macrowereld mededelingen doen omtrent gebeurtenissen die zich in de individuele microstructuren voltrekken. Het ligt voor de hand, dat het zeer de moeite waard zal zijn naar deze boodschappen nauwlettend te luisteren en zulks naar de wijze der physica, d. w. z. door tellen en meten.

Aangezien elk deeltje ons door een waarneembare gebeurtenis mededeelt, dat een desintegratie heeft plaatsgehad, kunnen wij door telling en tijdmeting nagaan of er een algemene regel geldt voor het aantal desintegraties dat per tijdseenheid optreedt.

Zulk een wet wordt nu inderdaad gevonden en de inhoud blijkt zeer merkwaardig. Volgens deze desintegratiewet is voor elke hoeveelheid van een radioactief element, waar en wanneer ook onderzocht, het aantal desintegraties per tijdseenheid gelijk aan een constante vermenigvuldigd met het aantal nog niet gedesintegreerde atomen. Deze constante, die voor elke radioactieve atoomsoort een karakteristieke waarde heeft, noemt men de *desintegratieconstante*. Het merkwaardige van deze wet ligt nu juist in de constantheid van deze grootheid,

in het feit dat zij op geen enkele wijze door uitwendige omstandigheden kan worden beïnvloed en dat zij niet verandert met de bestaansduur van de atomen.

Wanneer wij ons een overdrachtelijke spreekwijze veroorloven en de desintegratie als het sterven van het atoom aanduiden, dan zou men de desintegratieconstante het sterftcijfer kunnen noemen. De reciproke waarde van de desintegratieconstante verkrijgt dan de betekenis van de gemiddelde levensduur, d. w. z. de gemiddelde waarde van de tijd gedurende welke de atomen gerekend vanaf een zeker tijdstip nog in de niet gedesintegreerde toestand zullen verblijven.

Dat het sterftcijfer en dus ook de gemiddelde levensduur der radioactieve atomen niet beïnvloed wordt door uitwendige omstandigheden kan men beschouwen als een aanwijzing dat de invloed van alle uitwendige omstandigheden verwaarloosbaar is tegenover de factoren die de inwendige toestand dezer atomen bepalen. Anders gezegd, dat elk radioactief atoom als een afgesloten systeem mag worden beschouwd.

Het causaliteitsbeginsel verlangt dan, dat voor elk individueel radioactief atoom alle toekomstige veranderingen, dus ook de desintegratie, besloten liggen in de momentele toestand. Hoe ouder een groep radioactieve atomen wordt, hoe verder in elk daarvan de veranderingen moeten voortschrijden, die noodzakelijk op de desintegratie moeten uitlopen. Het verwonderlijke is nu echter, dat aan dit onderstelde verouderingsproces der radioactieve atomen geen enkele waarneembare verandering beantwoordt. Met name zegt ons de desintegratiewet, dat dit verouderingsproces, zo het al aanwezig is, geen enkele invloed heeft op de gemiddelde levensduur, d. w. z. de gemiddelde tijd welke de nog niet gedesintegreerde atomen nog van het tijdstip van hun desintegratie scheidt. De in de waarneming beschikbare gegevens bieden dus voor een causale beschrijving van dit verouderingsproces en voor de voorspelling van het tijdstip der individuele desintegratie geen enkel aangrijpingspunt.

Reeds in 1905 heeft E. v. Schweidler opgemerkt, dat de desintegratiewet kan worden verklaard als men de desintegratie opvat als een toevallige gebeurtenis in den zin der waarschijnlijkheidsrekening. De desintegratieconstante verkrijgt dan de betekenis van een kans, nl. de sterftkans per atoom per tijdseenheid. Deze kans moet dan geacht worden onafhankelijk te zijn, zowel van de uitwendige omstandigheden als van de voorgeschiedenis van het atoom. Het moet een invariante grootte zijn, die op de een of andere wijze in de toestand van het atoom ligt besloten.

Aanvaarden wij deze interpretatie dan verkrijgt de desintegratiewet het karakter van een statistische wet, d. w. z. de voorspellingen die men er op kan baseren missen het karakter van zekerheid en exactheid. Als men in een bepaald geval uit de wet zou berekenen dat in een zeker tijdsinterval 100 desintegraties moeten optreden, dan kan de telling even goed meer (bv. 110) of minder (bv. 95) opleveren. De voorspelling gaf

niet meer dan een *verwachtingswaarde*. De afwijkingen, die de waargenomen waarden van de verwachtingswaarden vertonen, zullen echter, hoewel ze individueel onvoorspelbaar zijn, in hun gemiddelde waarden weer aan de regels der waarschijnlijkheidsrekening moeten voldoen.

De hypothese van Schweidler heeft dan ook aanleiding gegeven tot tal van onderzoekingen, die de bedoeling hadden het statistische karakter van de desintegratiewet te verifiëren. Het resultaat van al deze metingen kan als een volkomen bevestiging van Schweidler's onderstelling worden beschouwd.

Anderzijds moet echter worden opgemerkt dat, het geheel der onderzoekingen betreffende de radioactieve desintegratie ons het recht geeft tot de conclusie, dat voor het individuele desintegratieproces de behoudswetten geldig blijven. Weliswaar heeft er enige tijd twijfel bestaan omtrent de vraag of deze conclusie ook geldig is voor de z.g. bèta-radioactiviteit, d. w. z. die vorm van radioactiviteit, waarbij de transmutatie van de atoomkern gepaard gaat met de uitzending van een electron. De hypothese van Pauli volgens welke behalve het electron nog een tweede deeltje wordt uitgezonden, het z.g. *neutrino*, dat zich door zijn geringe wisselwerking met de materie aan de waarneming onttrekt, heeft deze moeilijkheid echter op bevredigende wijze opgelost.

Zo zijn wij dan wel in een zeer moeilijke situatie gekomen. Wij hadden gemeend het deterministisch causaliteitsbeginsel en de exacte voorspelbaarheid met inbegrip van de behoudswetten veilig te kunnen stellen in het micro-gebeuren. Nu bereiken ons boodschappen uit het allerbinnenste van de individuele microstructuren, die ons mededelen dat zelfs daar, voor wat betreft het plaatsgrijpen der gebeurtenissen in de tijd, slechts van kansen en waarschijnlijkheden sprake kan zijn, hoewel voor de gebeurtenis zelf de behoudswetten geldig blijven. Zullen wij dan, op dit punt gekomen, niet genoodzaakt zijn tot een revisie van het causaliteitsbeginsel? Er schijnt, door het onderzoek zelf, ons nog één mogelijkheid geboden te worden aan deze noodzaak te ontkomen. Dit onderzoek heeft nl. ook aan het licht gebracht, dat een atoomkern een samengestelde structuur is, opgebouwd uit *protonen* en *neutronen*. Moet men het causaliteits principe misschien verplaatsen naar een nog dieper niveau, nl. dat der fundamentele deeltjes, neutronen, protonen, mesonen, electronen enz. Verhoudt de physica van de atoomkernen tot de physica der fundamentele deeltjes zich opnieuw als een macro-physica tot een micro-physica?

Misschien is het voor ogen hebben van deze mogelijkheid de reden geweest, waarom Schweidler's hypothese niet onmiddellijk tot principiële discussies over het causaliteitsbeginsel aanleiding heeft gegeven. Inmiddels is het onderzoek echter reeds weer voortgeschreden en het is daarbij gebleken dat ook *neutronen* radioactief zijn en dat ook zij de desintegratiewet volgen, zodat de voorafgaande beschouwingen ook op hen van toepassing zijn. Zelfs op het allerdiepste niveau, van waaruit de

huidige verklaring der fysische verschijnselen haar uitgangspunt neemt, het niveau der fundamentele deeltjes, wordt dus het causaliteitsbeginsel der klassieke physica door de waarnemingen zelf van de hand gewezen.

De quantumphysica, ontwikkeld door de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Born, Dirac, e. a., heeft de consequentie van deze situatie aanvaard en tot een revisie van het causaliteitsbeginsel besloten en zulks niet alleen op grond van de uitkomsten van het radioactieve onderzoek, maar op grond van het geheel der resultaten van het atoom- en kernfysisch onderzoek. Met name heeft zij daarbij rekening gehouden met het feit, dat bij dit onderzoek op tal van wijzen het bestaan van een universele natuurconstante, het z.g. *elementaire werkingsquantum*, te voorschijn is gekomen, die bij alle wisselwerkingen een essentiële rol blijkt te spelen. In het bijzonder door Heisenberg en Bohr is daarbij aangetoond, dat een kritische analyse van de aard der fysische kennis met inachtneming van het bestaan van het werkingsquantum zulk een revisie van het causaliteitsbeginsel onvermijdelijk maakt.

Bij deze critiek wordt naar voren gebracht, dat alle fysische kennis berust op metingen en dus ook door metingen controleerbaar moet zijn. Meting is echter altijd een vergelijking, zij het ook langs indirecte weg, met maatstaven ontleend aan de macro-fysische wereld. Kennen wij aan een micro-systeem observabelen, zoals coördinaten en impulsen toe, dan zullen wij daarbij moeten bedenken dat de getalwaarden dezer observabelen op de een of andere wijze voor meting vatbaar zullen moeten zijn. Daartoe is noodzakelijk dat het microsysteem in wisselwerking treedt met het meetinstrument, d. w. z. zich in de macro-wereld zodanig manifesteert, dat zijn observabelen voor meting toegankelijk worden. Deze wisselwerking fungeert echter voor het micro-systeem als een storing, die zijn toestand op oncontroleerbare wijze beïnvloedt. In de klassieke theorie mocht men deze storing oneindig klein denken. Dit is echter niet meer geoorloofd nu wij weten, dat het universele werkingsquantum een onderste grens stelt aan de grootte van deze storing. Wegens het bestaan van dit werkingsquantum zal voor een microstructuur elke meting een storende *ingreep*, een *bewerking*, een operatie zijn.

Daarom heeft het geen betekenis meer in de trant der klassieke physica te zeggen, dat er op elk ogenblik een scherp bepaalde toestand *is*, gekenmerkt door observabelen die exacte waarden *hebben*. Het heeft alleen zin om te vragen naar de waarden der observabelen, die te voorschijn zullen komen bij een meting, d. w. z. bij het aanbrengen van een storing van eindige grootte en eindige tijdsduur.

In aansluiting aan deze overwegingen heeft de quantummechanica allereerst aan het begrip *toestand* een gewijzigde inhoud gegeven. Het quantummechanisch begrip toestand is niet langer betrokken op een enkel tijdsmoment, maar omvat altijd een *tijdsduur*, het heeft betrekking op een gebied in de vier-dimensionale tijd-ruimte.

De toestand wordt symbolisch beschreven door een toestandsfunctie,

een grootheid die op continue wijze in tijd en ruimte varieert. Deze variaties worden beheerst door betrekkingen die wiskundig van hetzelfde karakter zijn als de vergelijkingen die in de klassieke physica gelden voor het electromagnetische veld. Men spreekt dan ook van het toestandsveld. De periodiciteiten in dit veld worden bepaald door de energie en de impulsen van het systeem. Zijn deze constant, is dus de toestand stationnair, dan is ook het veld stationnair. Terwijl de toestandfunctie zelf geen observabele is moet nu uit de kennis van de toestandsvelden al datgene kunnen worden *afgeleid* wat door waarneming van het systeem kan worden gevonden.

Uit de theorie van de toestandsvelden volgt nu dat de mogelijke stationnaire toestanden van een gesloten systeem veelal een discrete reeks vormen, d. w. z. van twee opeenvolgende toestanden in deze reeks verschillen de energie en de impulsen met eindige bedragen, waarvan de grootten bepaald worden door het elementaire werkingsquantum.

Men neemt nu aan dat een systeem, dat in een stationnaire toestand verkeert, in deze toestand zal blijven, zolang het niet op de een of andere wijze wordt „gestoord”. Zulk een stationnaire toestand kan wel waarneembare veranderingen in de coördinaten van het systeem omvatten, maar deze worden geacht tot de toestand te behoren. Evenals in de klassieke physica treedt de vraag naar de oorzaak dus pas op bij een verandering van een stationnaire toestand. Zulk een verandering kan nu echter, aangezien de reeks der stationnaire toestanden discreet is, slechts sprongsgewijze geschieden, nl. door overgangen uit de ene stationnaire toestand naar een andere. Het optreden van deze overgangen schrijft men dan toe aan de storingen, welke voortvloeien uit de wisselwerking van het systeem met zijn omgeving, of van de delen van het systeem onderling.

De quantummechanica is dus geenszins a-causaal, zij heeft het begrip oorzaak niet uit de physica verbannen. Zij voert dit begrip in op hetzelfde niveau als de klassieke physica, nl. bij de verandering van stationnaire toestanden, en zij zoekt de oorzaken in de wisselwerking tussen fysieke dingen. Voorts neemt zij omtrent deze wisselwerking weer aan dat zij bepaald wordt door de observabelen, de coördinaten en impulsen, van het systeem.

Niettemin draagt de voorspelbaarheid van het waarneembare gebeuren in de quantummechanica een statistisch karakter. Wanneer nl. van een systeem de mogelijke stationnaire toestandsvelden bekend zijn en ook de uitdrukking voor de wisselwerking is gevonden dan biedt de theorie de mogelijkheid de waarschijnlijkheden per tijdseenheid te berekenen voor het optreden van overgangen tussen deze toestanden. De waarschijnlijkheid voor de overgang van een toestand A naar een toestand B hangt daarbij af van de wisselwerking en voorts zowel van de begintoestand A als van de eindtoestand B. Men zou kunnen opmerken, dat in dit mede-betrokken-zijn van de eindtoestand dus toch weer iets te voorschijn komt van de oude *finale* zienswijze.

Toegepast op de radioactieve desintegratie, die ook als zo'n overgang uit een stationnaire toestand is op te vatten, betekent het voorgaande dat de theorie in beginsel de mogelijkheid inhoudt de desintegratieconstante, het sterftecijfer dus, te voorspellen, echter niet het tijdstip van de individuele desintegratie, het sterftegeval. Wel valt er ook omtrent de individuele desintegratie iets te zeggen. Uit de theorie volgt namelijk dat de waarschijnlijkheid voor een overgang slechts dan van nul verschillend is, wanneer deze overgang voldoet aan de eerder besproken wetten van behoud van energie, van hoeveelheid van beweging en van moment van hoeveelheid van beweging. Hiermede heeft de theorie dus juist het resultaat bereikt, dat in de proeven naar voren is gekomen.

Men komt dus tot deze conclusie: de waarneembare toestandsveranderingen, die zich binnen een micro-structuur kunnen voltrekken, zijn *mogelijke* processen, *geen noodzakelijke* processen. De tijdstippen waarop zij zullen optreden zijn onvoorspelbaar. Uit de toestandsvelden en de wisselwerkingen kunnen slechts de waarschijnlijkheden voor het optreden worden berekend. *Als* een proces optreedt zal het steeds aan de behoudswetten blijken te voldoen.

Voor de deterministische causaliteit der klassieke physica is een statistische vorm van causaliteit in de plaats getreden; voor de volledige, strenge voorspelbaarheid een voorspelbaarheid van kansen en middelenwaarden.

Zoals reeds is opgemerkt, hangt deze uitkomst ten nauwste samen met de omstandigheid, dat reeds in de opzet der theorie rekening is gehouden met het bestaan van het universele werkingsquantum en met het karakter der observabelen. Deze laatste treden n.l. in de toestandsvergelijkingen niet op als numerieke functies van de tijd, maar als symbolen voor de verzameling van mogelijke getalwaarden, die bij een meting te voorschijn kunnen komen. Ook kan men ze beschouwen als *operatoren*, d. w. z. als voorschriften voor wiskundige bewerkingen van de functie, die het toestandsveld beschrijft. De algebra waaraan deze symbolen voldoen is dan ook niet de algebra van de gewone getallen; zij onderscheidt zich daarvan o.a. doordat zij *niet commutatief* is. Hiermede is bedoeld, dat het product van twee symbolen niet onafhankelijk behoeft te zijn van de volgorde der factoren. Wanneer q een coördinaat symboliseert en p de bijbehorende impuls, dan zal „ p maal q ” niet hetzelfde zijn als „ q maal p ”.

De introductie van het elementaire werkingsquantum in de theorie geschiedt nu juist door een universeel verband aan te nemen, tussen dit quantum enerzijds en het verschil tussen „ p maal q ” en „ q maal p ” anderzijds. Uit dit niet-commutatief karakter van de algebra der observabelen volgt dan noodzakelijk de z.g. onnauwkeurighedsrelatie van Heisenberg, die ook buiten het gebied der physica reeds bekendheid en belangstelling heeft verkregen.

De inhoud van deze relatie is, dat de *exacte* bepaling van de waarde

van een coördinaat *zowel* als van zijn toegevoegde impuls *op hetzelfde tijdstip* niet mogelijk is. Men zou kunnen zeggen, dat deze relatie tot uitdrukking brengt de onmogelijkheid het statische „zijn” en het kinetische „worden” in één punt des tijds samen te trekken. Men kan slechts beide aangeven met een zekere onnauwkeurigheid en wel zodanig dat het product dezer onnauwkeurigheden gelijk is aan het elementaire werkingsquantum. Hoe geringer men de onnauwkeurigheid in de coördinaat zou willen maken, des te groter wordt de onnauwkeurigheid in de impuls. Het klassieke ideaal om door de exacte waarden van de statische en de kinetische observabelen de *ogenblikkelijke* toestand van het systeem volledig te bepalen, wordt dus door de onnauwkeurighedsrelatie definitief van de hand gewezen.

En deze conclusie, die ongetwijfeld van wijsgerige betekenis is, vloeit niet voort uit een filosofische bespiegeling omtrent „zijn en worden” maar uit een proefondervindelijk resultaat, nl. het optreden van het elementaire werkingsquantum.

Het is op deze grond dat verreweg de meeste physici thans van oordeel zijn, dat de herziening van het causaliteitsbeginsel als definitief moet worden beschouwd. Uiteraard is daarmee niet gezegd dat de theorie zelf haar eindstadium heeft bereikt. Niemand minder dan Einstein verdedigt telkens weer de stelling, dat de quantummechanica in haar huidige vorm niet als een complete theorie der fysische verschijnselen kan gelden. Hij wil haar wel beschouwen als een theorie, die het gedrag van een verzameling van vele identieke microstructuren beschrijft, maar niet als de definitieve theorie van het gedrag van een individueel systeem. Einstein ontkent niet, dat het bestaan van het elementaire werkingsquantum en de daarmee samenhangende onnauwkeurighedsrelatie de exacte *meting* van het tijdstip van de desintegratie van een radioactief atoom uitsluit. Hij is echter niettemin van mening dat binnen het kader van de theorie de idee van het tijdstip der desintegratie zinvol blijft, ja zelfs dat een theorie waarin dit begrip niet is vervat, niet als compleet kan gelden.

Einsteins bedenkingen verdienen des te meer de aandacht, omdat hij zelf in belangrijke mate tot de doordringing der statistische methoden in de atoomphysica heeft bijgedragen.

Met name is juist hij het geweest, die in 1917 in een fundamentele verhandeling over de stralingstheorie de idee van de spontane statistische stralingsovergangen in het atoom heeft geïntroduceerd naar analogie van de radioactieve desintegratie.

Dat hij niettemin als enig aanvaardbaar ideaal blijft stellen een fysische theorie, die op het beginsel der volledige gedetermineerdheid is gebaseerd, hangt, naar het mij voorkomt, samen met zijn Spinozistisch Godsgeloof, terwijl zijn vertrouwen in de mogelijkheid dit ideaal te realiseren is gegrond in zijn overtuiging, dat de fysische begrippen en concepties vrije scheppingen zijn van de menselijke geest ¹⁾.

1) P. A. Schilpp: *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, 1951, blz. 103; 665 e.v.

Ook al verschilt men op deze punten met Einstein van geloof en van opvatting, dan blijft er niettemin van zijn argumenten een suggestie uitgaan, waaraan men zich moeilijk geheel kan onttrekken. Een radioactieve desintegratie kan zich manifesteren door een waarneembare gebeurtenis — zeg bijv. een lichtflits op een fluorescentiescherm — die zich invoegt in de successie van andere waarneembare gebeurtenissen — zeg bijv. twee opeenvolgende tikken van een klok —. Het valt moeilijk te aanvaarden, dat de plaats die de lichtflits en dus ook de desintegratie zelf, inneemt in deze successie een aangelegenheid zou zijn, die men zich niet kan denken onafhankelijk van een aan het atoom verrichte meting. Dit is dunkt mij een vraag die wel te onderscheiden is van die naar de mogelijkheid deze plaats te voorspellen, welke mogelijkheid blijkens de inhoud van de desintegratiewet ons wordt ontzegd.

Het wil mij voorkomen, dat Einstein niet geheel ten onrechte in de argumenten, die tegen zijn bedenkingen worden aangevoerd, een positivistische tendens signaleert, die gevaar loopt zijn doel voorbij te schieten. Het is de tendens om te spoedig het oordeel „zinloos” te vellen over een begrip, waarvan de inhoud niet voor experimentele verificatie vatbaar is. De principiële onvoorspelbaarheid van het tijdstip van een desintegratie is nog niet hetzelfde als de „zinloosheid” van het begrip van dit tijdstip of als het „niet bestaan” van dit tijdstip. Men zal tegen Einstein terecht mogen aanvoeren dat het niet zinvol is de conceptie van dit tijdstip als *voorspelbaar* element in de fysische theorie te introduceren, wanneer de proeven de onvoorspelbaarheid hebben bevesten. Men zal anderzijds moeten erkennen, dat de localisatie van een gebeurtenis in een microstructuur binnen de successie der waarneembare gebeurtenissen een niet te ontkennen element der werkelijkheid is.

Zal men ten aanzien van de onvoorspelbaarheid van dit element misschien in acht moeten nemen, dat een microstructuur, ook wanneer zij door ons niet wordt waargenomen toch wel wordt „waargenomen” door de rest van het heelal, nl. in dien zin, dat de wisselwerking daarmede als een nooit afwezige storing moet worden beschouwd?

Of zal misschien eerst een diepere analyse en revisie van het fysische tijdsbegrip tot een geheel bevredigende interpretatie van de herziening van het causaliteitsbegrip kunnen leiden?

Er is reden deze vraag te stellen, omdat, terwijl de ruimtelijke coördinaten in de quantummechanica het karakter van operatoren hebben verkregen, waardoor met deze coördinaten een waarschijnlijkheids-distributie wordt verbonden, de tijd-coördinaat nog het karakter van een klassieke coördinaat met een numerieke waarde heeft behouden. Waar de fysische *tijdmeting* en *tijdschaal* zich toch altijd op macrogebeurtenissen betrekken, dringt zich de gedachte op, of het niet noodzakelijk zal blijken ook met de tijdcoördinaat een waarschijnlijkheids-distributie te verbinden.

Wanneer wij de geschetste ontwikkeling van het causaliteitsbeginsel

overzien, dan wil het mij voorkomen dat daarin een waarheid aan de dag treedt, die de mens bij het stellen van zijn kennisideaal licht geneigd blijkt te vergeten of zelfs te ontkennen. De waarheid, nl. dat alle echte kennis omtrent de kosmos steeds een interkosmische relatie zal blijven, een betrekking tussen de geschapen mens en de geschapen kosmos, waarvan de mens zelf deel is.

Dat deze betrekking mogelijk is, is een gegeven, waarover onze verwondering door geen wijsgerige theorie der kennis kan worden opgeheven, doch dat door het geloof, bij het licht van Gods Woordopenbaring als scheppingsgegeven kan worden gezien.

In zijn op kennisverwerving gericht wetenschappelijk onderzoek, is de mens, of hij het erkent of niet, bezig met de ontplooiing van een door God in de schepping gewilde betrekking tussen mens en kosmos.

Waar dit interkosmisch karakter der menselijke kennis uit het oog wordt verloren ontstaat een grensoverschrijding, die niet nalaat zich te wreken.

Van zulk een grensoverschrijding was zeker sprake in de uitdrukking die Holbach aan het causaliteitsbeginsel gaf in zijn in 1770 onder de schuilnaam Mirabeau verschenen werk *Système de la nature ou des lois du monde physique et du monde moral* (I, p. 51). Hetzelfde geldt van de meer algemeen bekende, maar met die van Holbach zeer overeenkomstige formulering van Laplace in zijn in 1812 uitgegeven *Théorie analytique des probabilités* (Oeuvres Complètes, VII, p. 6), welke laatste, na de rede van du Bois-Reymond *Ueber die Grenzen des Naturerkennens* (1872), in de litteratuur voortlevend als de idee van de Geest van Laplace, juist *buiten* het natuurwetenschappelijk gebied zo grote invloed op het denken heeft geoefend.

Die grensoverschrijding heeft zich gewroken in de negentiende eeuwse moderne theologie, die uit het dogma van de „onbepaalde heerschappij van de grote wet der causaliteit” de onmogelijkheid van het wonder meende te moeten deduceren. (K. H. Roessingh, *Het Modernisme in Nederland*, p. 100).

Alsof ooit de geschapen mens uit zijn waarneming van de geschapen wereld zou kunnen deduceren wat de Schepper *niet* zou vermogen.

Het getuigt echter ook van overschatting van de natuurwetenschappelijke kennis, wanneer, zoals bij de bespreking van de revisie van het causaliteitsbeginsel in christelijke kring soms geschiedt, uit het statistisch karakter der voorspelbaarheid tot de *mogelijkheid* van het wonder wordt besloten.

Uit de Woordopenbaring Gods weten wij, met de zekerheid van het *geloof*, dat achter *alles*, wat zich in de tijd-ruimtelijke samenhang der dingen aan de mens voordoet, hetzij als wetmatig geschieden hetzij als wondergebeuren, Gods Wil staat, en zulks niet als de laatste der natuurlijke oorzaken, maar als de alles omvattende bovencreatuurlijke oorsprong van alle zijn en worden.

Dat in de menselijke kennis omtrent de tijd-ruimtelijke samenhang

voorspelbaarheid begrepen is, zullen wij, in het geloof, mogen zien als Gods voorzienige vervulling van een der voorwaarden voor de uitvoering van de cultuurtaak, die God zelf de mens stelde.

Maar het zal altijd zijn een voorspelbaarheid bij de gratie van Gods Wil.

Ook wat de grenzen der voorspelbaarheid zijn in het wetmatig gebeuren zal de mens uit zijn denken alleen niet kunnen voortbrengen.

De ontvouwing der kennisrelatie tussen mens en kosmos zal slechts in stage wisselwerking tussen waarneming en denken kunnen geschieden.

Niettemin gaat het „zijn” waarop de kennis zich betreft niet op in het „waargenomen worden” en evenmin in het „gedacht worden”. Tegenover het raadsel van dit „zijn”, zal ook de proefondervindelijke wijsbegeerte slechts kunnen beginnen en eindigen met de belijdenis van het „*geschapen zijn*”.

Ik heb gezegd.





