

Over een kwantummechanische beschrijving van de werkelijkheid:  
een eigenaardige revolutie in de fysica.

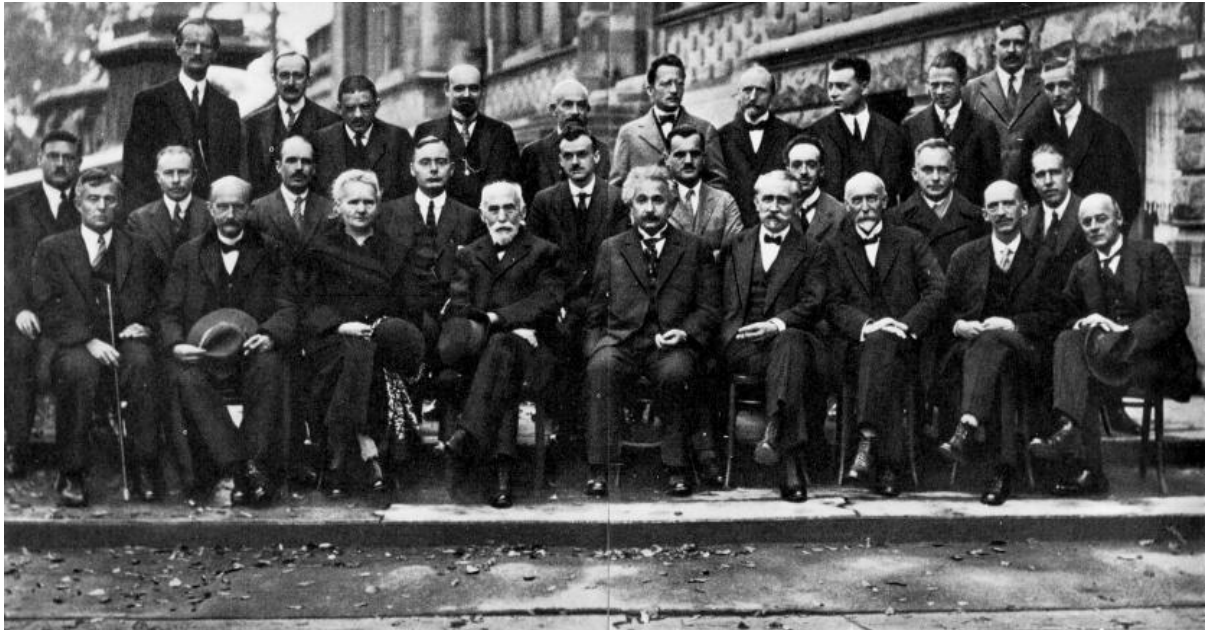
*De Bohr-Heisenberg dialoog*

Promotor: prof.dr. E. Myin

Verhandeling aangeboden tot het verkrijgen van de graad van  
Licentiaat in de Wijsbegeerte  
door:  
Stijn Muskala

Antwerpen, 2007

*'Iedereen die niet door de kwantumtheorie geshockeerd wordt, heeft er niets van begrepen.'* (Niels Bohr)



Photographie Benjamin Couprie

26, Avenue Louise, Bruxelles

A. PICCARD	E. HENRIOT	ED. HERZEN	TH. DE DONDER	E. SCHROEDINGER	W. PAULI	W. HEISENBERG	R. H. FOWLER	L. BRILLOUIN
	P. EHRENFEST			E. VERSCHAFFELT				
P. DEBYE	M. KNUDSEN	W. L. BRAGG	H. A. KRAMERS	P. A. M. DIRAC	A. H. COMPTON	L. V. DE BROGLIE	M. BORN	N. BOHR
I. LANGMEIR	M. PLANCK	MADAME CURIE	H. A. LORENTZ	A. EINSTEIN	P. LANGEVIN	CH. E. GUYE	C. T. R. WILSON	O. W. RICHARDSON

*'Wetenschap is óf fysica óf postzegels verzamelen.'* (Ernest Rutherford)

# Inhoudsopgave

Dankwoord .....	4
Algemene inleiding .....	5

## 1. Het ontstaan van de kwantumfysica vanuit historisch perspectief

1.0 Inleiding .....	11
1.1 Ingang van het lichtconcept in de fysica .....	13
1.2 De weg naar het atoomconcept .....	16
1.2.1 Atomen .....	17
1.2.2 Elektronen .....	20
1.3 Max Planck: zwart-lichaam straling, de ultraviolet-catastrofe en kwanta .....	22
1.3.1 Zwart-lichaam straling .....	23
1.3.2 De ultraviolet-catastrofe .....	24
1.3.3 Individuele energiekwanta en $h$ .....	25
1.4 Albert Einstein: elektronen-emissie, fotonen en het foto-elektrische effect .....	28
1.4.1 Foto-elektronen .....	28
1.4.2 Fotonen .....	30
1.5 De weg naar het atoommodel .....	32
1.6 Niels Bohr: spectroscopie, elektronenbanen en het atoommodel .....	36
1.6.1 Spectroscopie .....	36
1.6.2 Elektronenbanen en het atoommodel van Bohr .....	38
1.7 Golf-deeltje dualiteit van materie .....	41

## 2. De onbepaaldheidsrelatie en de kritiek van Einstein

2.0 Inleiding .....	44
2.1 Werner Heisenberg: de matrixmechanica .....	46

2.2 Erwin Schrödinger: de golfmechanica .....	48
2.2.1 Max Born en de probabilistische interpretatie .....	50
2.2.2 Verdere ontwikkelingen .....	53
2.3 De onbepaaldheidrelatie van Werner Heisenberg .....	54
2.3.1 Conceptuele voorstelling .....	54
2.3.2 Gammastralen microscoop .....	57
2.3.3 Filosofische beginselen en implicaties .....	60
2.3.3.1 Theoriegeladenheid van de waarneming .....	61
2.3.3.2 Operationalisme .....	63
2.4 Einstein en de foton-doos .....	64
2.4.1 De plaats en betekenis van Einsteins kritiek .....	69
<b>3. De Kopenhagen-interpretatie en de complementariteitstheze: een typisch kwantummechanische beschrijving</b>	
3.0 Inleiding .....	73
3.1 De kopenhagen-interpretatie .....	74
3.1.1 Heisenberg en Bohr over de betekenis van de onbepaaldheidrelatie .....	74
3.2 Complementariteit .....	77
3.3 Een kwantummechanische beschrijving .....	79
3.3.1 Discontinuïteit .....	80
3.3.2 Golf-deeltje dualisme .....	84
3.3.3 Probabiliteit .....	89
<b>4. Conclusie</b>	
<b>5. Slotbeschouwing</b>	
Referenties .....	103
Bibliografie .....	104

## Voorwoord

Deze historische weergave van de wortels van de kwantumtheorie zou nooit tot stand gekomen zijn zonder de steun van mijn ouders. De zorgzame bezorgdheid van mijn moeder en de meer diplomatieke aanpak van mijn vader hielden me op het juiste pad tussen in- en ontspanning. Eveneens mijn promotor Prof. Dr. Erik Myin zou ik hartelijk willen bedanken voor zijn coördinerende en professionele bijdrage; zonder zijn promotorschap, maar in de eerste plaats zijn geïnteresseerde en betrokken houding, was dit uiteraard niet mogelijk geweest. Voor de nodige afstanden en het nodige vervoer van de noodzakelijke literatuur kon ik steeds op mijn grootouders rekenen die steeds paraat stonden voor mij. Via deze weg wil ik ook hen bedanken.

Verder gaat mijn dank uit naar mijn oudste broer, Bart Muskala, omdat hij steeds weer actief deelnam aan het correctieve gedeelte van mijn thesis, en dit niet één keer maar enkele malen. Voor de meest informatieve en interessante gesprekken bedank ik met graagte mijn buur en tevens beste vriend Stef De Pooter. Omdat ook hij zijn thesis over kwantumtheorie schreef hebben we aan elkaar veel gehad; gedachten uitwisselen, kritische positie-inname bij de lectuur van elkaars thesis hebben zeker zijn vruchten afgeworpen.

Als allerlaatste betuig ik mijn dank eveneens aan alle professoren Wijsbegeerte aan de Universiteit Antwerpen. De afgelopen vier jaar hebben zij bijgedragen tot mijn vorming van licentiaat in de Wijsbegeerte, dus ook zij hebben ertoe bijgedragen dat dit eindwerk mogelijk werd gemaakt. Maar ook Prof. Dr. Herman Note van de Universiteit van Gent zou ik willen bedanken voor de hartelijke gesprekken.

## Algemene inleiding

Aan het begin van de vorige eeuw werden we overwelgdigd door de innovaties van het wetenschappelijke domein: natuurkunde. Deze vernieuwing was afkomstig van de alom bekende Albert Einstein en wordt de relativiteitstheorie genoemd. De implicaties zijn verstrekkend en spreken tot de verbeelding van iedereen die zich de moeite getroost om er kennis van te nemen. Met deze (algemene relativiteits)theorie stonden we aan de vooravond van de moderne kosmologie en geheel nieuwe opvattingen over gelijktijdigheid, ruimte en tijd in relatie tot materie. Vaak wordt iemand als Einstein vergeleken met personen als Newton en Copernicus omwille van de draagwijdte van hun werk en de daarmee gepaard gaande radicale herziening van concepties over de werkelijkheid.

De receptie van deze theorieën in de fysica hebben we te danken aan de elegante en consistente wijze waarop ze in wiskundige formuleringen kunnen worden uitgedrukt. Met de interpretatie van zulke theorieën is het echter anders gesteld. Vaak gebeurde het dat ze niet onmiddellijk werden aanvaard. En dit ondanks de logische uitwerking en coherentie met empirische gegevens. Doorslaggevend is uiteraard het wiskundige formalisme waarmee een theorie gepresenteerd wordt. De vraag die hier gesteld kan worden is of het intuïtieve gevoel dat we hebben als bepalende factor kan gelden in het proces van theorievorming. Bekend is dat bij de totstandkoming van de relativiteitstheorie Einstein zich voornamelijk op gedachte-experimenten baseerde. De resultaten waar hij uiteindelijk toe kwam dwongen hem het vertrouwde beeld van de wereld op te geven en plaats te maken voor een geheel nieuw universum; één waarvan de logica ons niet al te vertrouwd overkomt en zelfs tegen elk intuïtieve aanvoelen indruist. Niettemin werd deze verandering relatief snel ontvangen in de annalen van de fysica en verkreeg zo al snel het statuut van grootste wetenschappelijke ontdekking sinds Newton's wet van de gravitatie. Hoewel velen er de implicaties niet of nauwelijks van begrepen. In tegenstelling hiermee kende de kwantummechanica, een totaal andere theorie en onderwerp van deze thesis, een verschillend verloop.

Nog voor het 'annus mirabilis' (1905), het jaar waarin Einstein voor het eerst zijn bevindingen presenteerde, werd de grondslag gelegd voor deze andere theorie. In theoretisch opzicht deed de kwantumtheorie zeker niet onder voor de relativiteitstheorie, in die zin dat ze proefondervindelijk elke test in de laboratoria glansrijk heeft doorstaan. Met betrekking tot de interpretatie is het echter anders gesteld; vandaag de dag bestaat nog steeds grote onenigheid tussen de beoefenaars ervan. De bevindingen van deze laatste genoemden geven aanleiding tot een waaier van uiteenlopende benaderingen. Het vertrouwde beeld van onze werkelijkheid lijkt niet in het minst op de wereld zoals deze vanuit de kwantumtheorie wordt voorgesteld; dit wil zeggen, wanneer men naar de structuur van de werkelijkheid gaat kijken op (sub)atomair niveau. De redenen waarom deze theorie er na 100 jaar nog steeds niet in geslaagd is éénduidigheid te verlenen en waarom er bijvoorbeeld geen 'kwantumjaar' gehouden werd, in tegenstelling tot de faam die Einsteins theorie in 2005 wel genoot, hebben dus allen betrekking op het interpretatieve aspect. Een simpele vergelijking van naambekendheid tussen Max Planck en Albert Einstein volstaat hier. Maar was ook Einsteins theorie niet contra-intuïtief en veranderde ook dit niet het wereldbeeld van de fysica? Ongetwijfeld. Maar het onderscheid situeert zich op het niveau van welk type wetenschap men hanteert. Sinds de komst van de kwantummechanica kan er nog onmogelijk sprake zijn van één bepaald type, zodanig dat men alle fysica van voor de kwantummechanica *klassieke wetenschap* noemt en haar afzet tegen deze nieuwkomer. Wanneer Einstein zijn intrede maakt in de fysica presenteert hij zijn bevindingen in het conceptuele schema van de vertrouwde klassieke wetenschap: omdat de relativiteitstheorie in essentie klassiek van oorsprong is en begrippen hanteert die afkomstig zijn van de klassieke wetenschap. Het andere type wetenschap draagt de naam *kwantumfysica*, verwijzend naar het (sub)atomaire niveau waarover zij handelt. De gangbare concepten binnen dit domein liggen ver verwijderd van ons dagdagelijkse aanvoelen, misschien wel zo ver dat we op een tweede generatie fysici hebben moeten wachten vooraleer het algemeen aanvaard werd dat we hier wel degelijk met wetenschap te doen hadden. Het is echter niet zo dat de grondleggers ervan de bevindingen niet begrepen maar ze waren niet in staat deze te plaatsen binnen het

traditionele denkkader. Dit was omdat ze zo gewend waren aan het deterministische karakter van de klassieke wetenschap en deze nieuwe verschijnselen konden van hieruit niet verklaard worden.

Het boven aangehaalde onderscheid tussen klassieke- en kwantumwetenschap vormt de rode draad doorheen deze thesis. Dit wil echter niet zeggen dat ik op alle vlakken recht zal kunnen doen aan de distinctie tussen de beide: hoe ze in relatie tot elkaar staan, waar zich de breuklijn tussen deze beide bevindt en wat ze überhaupt te betekenen heeft is een doctoraatsthesis op zich waard. De bedoeling is om een beschrijving te bieden van waaruit we duidelijk het onderscheid kunnen aangeven tussen de traditionele fysica en de nieuwe fysica. Deze beschrijving zal voornamelijk gericht zijn op die ontwikkelingen waarin zich deze breuk onmiddellijk toont. De hoofdgedachte achter deze benaderingswijze houdt verband met wat het betekent een kwantummechanische beschrijving te bieden voor atomaire processen. Dit zal voornamelijk besproken worden in relatie tot de Kopenhagen-interpretatie dat ik in het laatste deel zal bespreken; concreet betekent dit dat we ons zullen wijden aan een onderzoek van de manier waarop een voorstelling van de subatomaire werkelijkheid tot stand komt vanuit de nieuwe bevindingen. In welke zin verschilt deze van een klassieke beschrijving? Is dit verschil louter conceptueel of situeert het verschil zich op een fundamenteel niveau? Wanneer dit laatste het geval is, moet men zich het volgende afvragen: is een klassieke benadering van atomaire processen wel adequaat, waaronder ik bedoel of een dergelijke beschrijving wel mogelijk is?

Omwille van praktische en theoretische beperkingen zal ik me dienen te beperken tot bepaalde aspecten in de theorie die van belang zijn voor de these. Het formalisme en de theoretische uiteenzetting zullen beperkt worden tot de meest fundamentele basisvergelijkingen. Deze doen hier enkel dienst als steun bij de conceptuele verheldering van het probleem.



De thesis zal bestaan uit drie delen: respectievelijk historisch-descriptief, inhoudelijk en epistemologisch-filosofisch. In het eerste historisch-descriptieve deel zal er voornamelijk worden ingegaan op de ontwikkelingen die hebben geleid tot het ontstaan van de kwantumtheorie. Hierbij zal ik voornamelijk de nadruk leggen op de bevindingen waarin de breuk met het klassieke wereldbeeld aan bod komt: de betekenis van het stralingsconcept en de wijze waarop discontinuïteit binnen Planck's fysische beschrijving van straling dringt, het dualistische principe van het lichtconcept doorheen de geschiedenis van de fysica vanaf Newton, de idee van atomisme en de hiermee gepaard gaande beschrijving van een atoommodel zijn de voornaamste thema's binnen deze historische uiteenzetting. Dit deel zal louter beschrijvend zijn en doet dienst als basis voor het verdere verloop van het verhaal, waarin de notie 'beschrijving' centraal staat. Naast het vermelden ervan zal er niet lang worden stilgestaan bij de paradoxale structuur van waaruit de kwantummechanica geboren wordt. Tenminste niet in dit eerste deel. In het tweede deel echter voer ik de lezer binnen in de wereld van de (sub)atomaire deeltjes en laat ik hem kennis maken met deze paradoxale structuren. Op enkele van de basisexperimenten en grondgedachten die de vinger leggen op de kern van een kwantummechanische beschrijving, zoals de onbepaaldheidsrelatie en de kritiek van Einstein daarop, zal wat dieper worden ingegaan. (voor de meer belezen lezer: De EPR-paradox laat ik bewust onbesproken. De initiële bedoeling was een populistische beschrijving voor de kwantummechanische ontdekkingen te vermijden. De EPR-paradox is van onschatbare wetenschappelijke waarde maar zeker niet onmiddellijk begrijpelijk en al te interessant mysterieus, zodat men er metafysische waarde aan toevoegd; iets wat men na Kant wel kan missen.) Bij Einstein vinden we duidelijk de vraag terug die verband houdt met de controverse tussen de twee typen van beschrijvingen. Hier staat voornamelijk de bezorgdheid rond de objectiviteit van een beschrijving centraal. De onbepaaldheidsrelatie stelt een gelijktijdige meting van positie en momentum van een deeltje, in dit geval een elektron, ter discussie. Hierdoor wordt duidelijk hoe een beschrijving van atomaire processen verschilt van een klassieke beschrijving. Hierin kan Heisenberg's houding ten aanzien van de interpretatie van informatie en theorievorming

echter niet genegeerd worden. Want voor niet iedereen hebben de consequenties die eruit worden getrokken dezelfde geldigheid. Hiervoor zal ik kort verwijzen naar de filosofische uitgangspunten van waaruit deze (interpretatie van de) relatie is ontstaan. De genoemde relatie was afkomstig van Werner Heisenberg, de Duitse wis- en natuurkundige van wie de samenwerking met Bohr had geleid tot de bewuste Kopenhagen-interpretatie, de meest vooraanstaande interpretatie uit die tijd. Dit brengt ons bij het derde en laatste deel waarin ik me laat leiden door een boek van Heisenberg<sup>1</sup> dat een beeld schetst van deze revolutionaire ideeën. In dit hoofdstuk zal de discrepantie tussen de twee typen van wetenschap(pelijke beschrijving) in verband worden gebracht met de notie 'complementariteit'; een sleutelbegrip uit de Kopenhagense interpretatie dat een indirect gevolg was van een interpretatie van de onbepaaldheidsrelatie. Hierbij wordt aan de hand van enkele basisconcepten verduidelijkt waarop een beschrijving van kwantumprocessen gebaseerd is en welke eigenaardige rol het epistemologische aspect (taal, conceptie, interactie, ...) binnen de theorie speelt. Er zal worden stilgestaan bij wat we in het verloop van deze thesis zullen ontmoeten als drie noodzakelijke elementen van deze theorie: discontinuïteit, probabiliteit en golf-deel dualisme. Dit laatste staat in rechtstreeks verband met de complementariteitsthese van Bohr; maar eveneens de twee voorgaande aspecten vinden er hun plaats. Zo monden we in dit derde deel uit in een typisch kwantummechanische beschrijving door aan te geven op welke wijze deze drie elementen samen een coherent beeld schetsten van deze nieuwe ontwikkeling. De correctie in conceptuele fundamenten waarop de onbepaaldheidsrelatie steunt en in het algemeen de interpretatie van de kwantumverschijnselen worden door Bohr op voortreffelijke wijze geïntegreerd in het geheel. In deze versie wordt meer recht gedaan aan de fundamentele factoren van een dergelijke beschrijving dan bij Heisenberg: omdat bij deze laatste louter de limitering in klassieke noties (ter verklaring van atomaire processen) ter discussie gesteld wordt daar waar Bohr de gehele klassieke conceptie verwerpt en bovendien weet

---

<sup>1</sup> Heisenbergh, W., 'Physics and philosophy: the revolution in modern science.', derde druk, New York, Harper&Row Publishers, 1966 : een boek uit 1958 dat het klimaat schetst van de kwantummechanica in de Kopenhagen-interpretatie.

te vervangen door een adequatere vorm van beschrijven. Eén dat men wezenlijk kwantummechanisch van oorsprong kan noemen.

# 1. Het ontstaan van de kwantumfysica vanuit historisch perspectief

## 1.0 Inleiding

Over het eigenlijke ontstaan van de kwantummechanica bestaat er geen éénduidigheid; niet onder fysici en al zeker niet onder filosofen. *A la limite* kan men stellen dat het één van de oude Griekse wijsgeren was die de idee van ‘atomen’ introduceerde. Demokritos van Abdera (ca. 460 v. Chr.) was de eerste die argumenteerde voor een atoommodel van de werkelijkheid waarin alle materie zou bestaan uit ondeelbare kleine deeltjes (atomos), die de bouwstenen van de kosmos voorstellen. De grondgedachte hiervan kunnen we terugvinden in de door hem geformuleerde propositie: ‘er is niets buiten atomen en [lege] ruimte, het overige is louter opinie’. (Demokritos van Abdera :ca. 400 v. Chr.)

Het is echter volstrekt onzinnig om hiermee de komst van de eigenlijke kwantumtheorie in te luiden maar tegelijkertijd is ook dit niet van ondergeschikt belang. Zoals we zullen zien gaat de opkomst van de moderne theorie over de kwanta<sup>2</sup> gepaard met wat door Demokritos werd voorondersteld, namelijk met atomen of meerbepaald met het atoommodel. Dit zal pas echt in de 19<sup>e</sup> eeuw en meer nog aan het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw, bij Einstein, theoretische ondersteuning krijgen. Het concept van ondeelbare entiteiten speelt binnen deze uiteenzetting een uitermate belangrijke rol: een eerste, triviale reden hiervoor is dat de kwantumtheorie een beschrijving beoogt van het atomaire niveau waarvoor atomen uiteraard het onderzoeksobject bij uitstek vormen. Een tweede reden houdt verband met het atoomconcept als heuristisch instrument, dat steeds verder door de wetenschap werd opgevolgd. In die zin vormt het de rode draad doorheen deze ontwikkelingen. Op deze wijze kreeg het betekenis voor andere domeinen van de wetenschap, zoals voor chemie en kinetische theorieën; en eveneens voor analytische technieken binnen het wetenschappelijke onderzoek, zoals de spectroscopie. Met de ontdekking van elektronen als noodzakelijk onderdeel van atomen, werd de deur

---

<sup>2</sup> Dit zijn de kleine, ondeelbare entiteiten van energie. Een foton bijvoorbeeld, als een eenheid licht, noemt men een licht-kwantum.

opengezet naar de beschrijving van een atoommodel, een benadering naar de ‘binnenzijde’ van het atoom toe. Bovendien bleek de intrede van een model uiterst vruchtbaar voor de ontwikkeling van de kwantumtheorie en de betekenis die men aan haar interpretatie toeschreef. Maar met het atoommodel is nog niet alles gezegd. Hoewel de weg naar de kwantummechanica zelf in grote mate schatplichtig is aan de ontwikkeling van een atoommodel kunnen we niet zonder meer stellen dat het hier om een pad zonder zijwegen gaat. Want de kwantummechanica behelst meer dan louter de interactie tussen elektronen van een atoom onderling en met elektronen van andere atomen. Dit laatste zal in verband worden gebracht met het fenomeen straling dat vanuit de spectroscopie betekenis kreeg voor de theorie, waarbij men voornamelijk de interactie met materie onderzoekt. Een gegeven dat hier voor het eerst zal besproken worden vanuit Planck’s benadering van een zwart-lichaam. Vervolgens zullen we zien hoe dit concept bij Einstein een andere invulling kreeg, waardoor het lichtconcept weer ter discussie gesteld werd. Tot slot vinden we in de beschrijving van Bohr’s atoommodel een beknopte weergave terug van de bevindingen van de laatste 25 jaar. Hier stond het concept van de zogezegde elektronenbanen centraal omdat in onze zoektocht naar een typisch kwantummechanische beschrijving dit laatste nog van belang zal blijken te zijn in de dialoog tussen Bohr en Heisenberg, wat zal besproken worden in het laatste deel. Deze nieuwe bevindingen werden door Bohr samengevoegd in een theoretisch raamwerk dat een beschrijving van de atoomstructuur weergeeft. Let wel, dit model weerspiegelt enkel de informatie dat er toen voorhanden was. Deze informatie werd reeds geïnterpreteerd vanuit een bepaald denkkader en geeft in deze hoedanigheid geen unieke positie weer.

Het selectieve karakter van deze beschrijving heeft als doel de zaak niet onnodig complex te maken. Het is namelijk zo dat er, wat ook in de algemene inleiding te lezen staat, geen éénduidigheid bestaat over de inhoud van de theorie; dit wil zeggen dat men dikwijls naar de term kwantummechanica verwijst zonder dat men daarvoor *a priori* dezelfde betekenisinhoud beoogt. De kwantumtheorie valt uiteen in verschillende interpretaties;

de twee meest bekende, maar ook meest controversiële, zijn de Kopenhagen-interpretatie en de meer recente Vele-Werelden-interpretatie van Hugh Everett.

Ik zal me echter beperken tot de eerste van de twee interpretaties ondanks de filosofisch, zelfs metafysisch grotere aantrekkingskracht van de tweede. Maar ook hier zal de weergave eerder beknopt en in een zeker opzicht beperkt blijven tot het descriptieve niveau. Gaandeweg zullen we kennis maken met de kwantumwereld, om vervolgens van daaruit, met de kennis die ons wordt aangereikt, door te dringen tot de kern van de theorie, zijnde het interpretatieve aspect van de theorie in connectie met de breuk tussen de oude en de nieuwe fysica. Hierbij zal in hoofdzaak aandacht worden besteed aan een beschrijving van kwantumsystemen en in welke mate deze beschrijving verschilt van een klassieke vorm. Laat ons keren naar het begin van deze wetenschappelijke Odyssee.

## **1.1 Ingang van het lichtconcept in de fysica**

In de zoektocht naar de wortels van de kwantumtheorie vertrekken we van een benadering van het lichtconcept zoals dit door Newton werd voorgesteld. Het is niet toevallig dat de aard van licht hier ter discussie staat omdat zich hierin een eerste aanleiding toont die van belang is voor de ontwikkelingen; zoals we spoedig zullen zien toont een analyse van dit concept ons de ambiguïteit waarvoor een klassieke beschrijving geen antwoord biedt. Een benadering van het lichtconcept staat in onmiddellijk contact met de materie waarmee de kwantummechanica zich inlaat en zal ons op deze wijze gaandeweg binnenleiden en gevoelig maken voor de problematiek van deze nieuwe opkomende fysica. Isaac Newton kan men zonder overdrijven de grondlegger van de fysica noemen. Zijn bewegingswetten lagen aan de basis van alle verdere takken van de wetenschap die ook maar enigszins verband houden met de beweging van materie: dynamica, kinematica en mechanica. Zijn ideeën over de aard van het licht hangen nauw samen met zijn opvattingen over de rest van het empirische universum. Zoals een bal

wordt teruggekaatst wanneer hij botst op een hard oppervlak zo zal ook licht terugkaatsen wanneer het op een spiegel wordt geprojecteerd. Uit verschillende experimenten was volgens Newton gebleken dat licht zich voortplant in rechte lijnen, wat er enkel kon op wijzen dat het uit een continue stroom van materiedeeltjes bestond, die hij *corpuscula* noemde. Dit was de vorm waaronder het lichtconcept ingang vond in het wetenschappelijke klimaat, als deeltjestheorie. Maar dat was nog maar het begin. Niet door de grootheid van Newton gehinderd werkte Christiaan Huygens, een Nederlandse natuurkundige, ongeveer tegelijkertijd de gedachte uit die zou leiden tot een theorie die haaks staat op deze deeltjestheorie. Hij deed beweringen waarin licht niet werd opgevat als deeltjes maar als een golfbeweging dat zich beweegt doorheen een onzichtbaar medium. De beweging vindt plaats in analogie met hoe water zich voortbeweegt. Hoewel hij op felle tegenstand zou stuiten, en men eerder geneigd was Newton te volgen, kende het begrip van een golfkarakter in het begin van de 19<sup>e</sup> eeuw, in 1801 om precies te zijn, een wederopleving bij de Engelsman Thomas Young. Deze bewerkstelligde aan de hand van nauwgezet onderzoek de doorslag in het voordeel van de golftheorie. Het opzet van het experiment was vrij eenvoudig maar de gevolgtrekkingen verstrekkend. Hij ging ervan uit dat licht, in analogie met water, zich inderdaad voortzet zoals een golf. Hierbij worden vanuit een bron cirkelvormige golfbewegingen geproduceerd, op dezelfde wijze waarop een object dat in het water wordt geworpen cirkelvormige watergolven rondom zich produceert. Welnu, beeld u in dat u uitzicht heeft op een bassin met water waar het wateroppervlak wordt gescheiden door een plaat met een kleine opening in het midden. Aan de éne kant wordt er een steen in het water gegooid waarna zich dan cirkelvormige golven vormen die doorheen het bassin 'voortrollen'. Wanneer nu deze golf de opening bereikt zal het aan de andere zijde van de plaat evengoed een nieuwe (half-)cirkelvormige beweging voortbrengen. Dit gat, indien het klein genoeg is, doet met andere woorden dienst als een nieuwe bron van golfbewegingen. Zo ver alles duidelijk; nu komen we bij de proefopstelling van Young. Hier bevinden zich niet één maar twee gaten in de plaat die het wateroppervlak van het bassin in tweeën deelt en aan de tegenovergestelde zijde van de bron (d.i. de plaats waar de cirkelvormige golfbewegingen worden geproduceerd),

achter de plaat, bevindt zich een scherm dat de inkomende golfslag laat zien. Omdat er zich nu twee gaten in de plaat bevinden, en er dus twee bronnen zijn, zullen deze golven elkaar overlappen en dit maakt de golfbewegingspatronen veel complexer. Een golf bestaat uit een piek en een trog (plooidal), de amplitude is de grootte of de sterkte van de golf die wordt gemeten van nul tot aan het hoogste punt van de golf. Wanneer nu een dergelijke piek van de ene golf (geproduceerd door het bovenste gat) een trog van de andere golf (geproduceerd door het onderste gat) ontmoet, heffen ze elkaar op. Wanneer echter twee pieken of twee dalen van de golven met elkaar in contact komen vormen ze een hogere of een lagere golf. Indien de eerste situatie van opheffing zich voordoet noemt men dit destructieve interferentie, want geen resultaat wordt gecreëerd waar eerst wel sprake was van een golf. Indien de tweede situatie zich voordoet, spreken we van constructieve interferentie. Op het scherm in het bassin zal er een interferentiepatroon tevoorschijn komen dat we kunnen verklaren aan de hand van deze constructieve en destructieve interferenties die elkaar afwisselen. Een weergave hiervan vindt u in de onderstaande figuur.

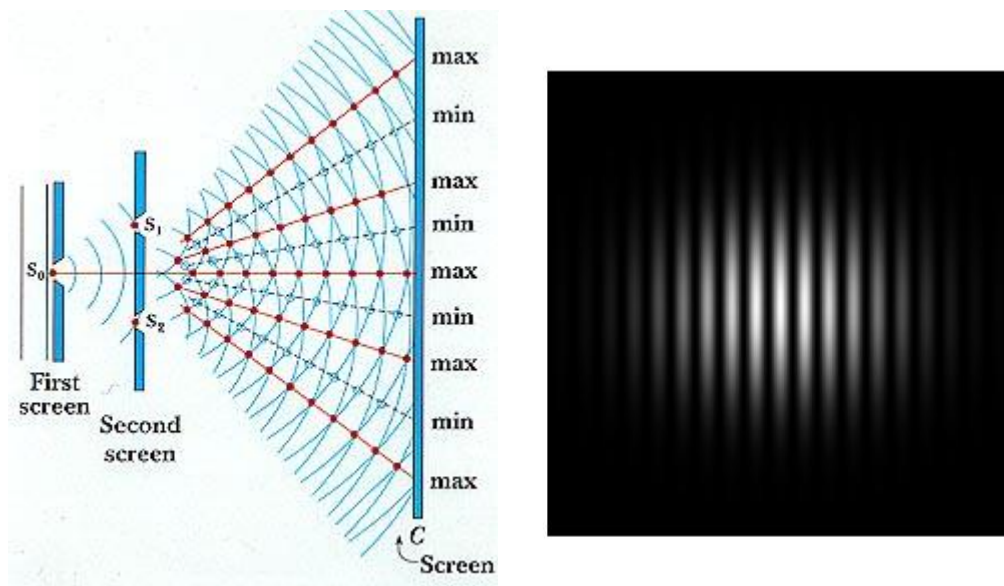


Fig. 1. : Kringvormige golven produceren vanuit  $S_1$  en  $S_2$  een dubbel golfpatroon dat elkaar overlapt. Constructieve- en destructieve interferentie wordt aangeduid als respectievelijk max. en min.. De figuur ernaast staat voor het interferentiepatroon dat verschijnt op het scherm. De witte lijnen vormen de constructieve interferenties (max.), de zwarte lijnen de destructieve interferenties (min.).



Indien licht uit golven bestaat zou men dit moeten waarnemen, en dit is precies wat Young vond wanneer hij licht liet schijnen tegen een lichtdicht scherm met twee nauwe spleten met daarachter een scherm dat het invallende licht registreerde. Een interferentiepatroon ontstond, derhalve was het golfkarakter van licht aangetoond. Dit was een opmerkelijke prestatie en deze benadering van het lichtconcept, nl. als golfverschijnsel, zou minstens tot aan het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw gangbaar blijven.

Aan het einde van de negentiende eeuw ging men ervan uit dat licht zich voortplant zoals beschreven vanuit de golftheorie omdat men interferentie vaststelde en dit is onmogelijk indien licht uit de *corpuscula* van Newton zou bestaan. Rond deze tijd voerde het concept van golfkarakter hoogtij en durfde men het niet in twijfel trekken omdat vrijwel alle waargenomen verschijnselen konden verklaard worden vanuit dit kader. Het was dus absoluut niet nodig op zoek te gaan naar een lichtdeeltje *tenzij* er andere aanleidingen zouden zijn geweest die hiervoor pleiten. En deze werden gevonden in de nieuwe kwantumverschijnselen. Hier zijn we aanbeland bij de grondleggers van de bewuste kwantumtheorie, waaronder Einstein en Planck. Einstein zal er zich heel zijn leven tegen verzetten omdat het beeld van de natuur dat hier geschetst wordt een probabilistisch, tegen-inuïtief en schijnbaar onvolledig beeld is. Ook Planck wist geen raad met wat zich voltrok binnen deze context, ook hij zal er zich aanvankelijk nog tegen verzetten. Maar vooraleer we de eigenlijke wereld van de kwanta betreden, dient vooraf nog een toelichting gegeven te worden van hoe de stap tussen de klassieke- en de nieuwe wetenschap in wezen voorbereid werd door de analyse van het atoomconcept.

## 1.2 De weg naar het atoomconcept

Met de ontwikkeling van een fysische theorie over het lichtconcept werd een eerste, concrete stap gezet in de richting van een nieuw soort wetenschap. De analyse van deze nieuwe onderzoeksobjecten onthullen een dieperliggende structuur waarvoor een

beschrijving dient te worden gegeven. Tot deze beschrijving behoort eveneens het eeuwenoude concept van 'atomen'. Deze notie van ondeelbare entiteiten bleek een uiterst vruchtbare invloed te hebben in het ontstaan van de theorie. De nieuwe onderzoeksgebieden die werden ontsloten vormen een integraal onderdeel van het ontstaan van de theorie in die zin dat een beschrijving vanuit de theorie zinvol de verwijzing naar deze nieuwe concepten (atomen, elektronen) in zich moet dragen.

### **1.2.1 Atomen**

In navolging van Demokritos waren er nog verscheidene anderen die eveneens het atoomconcept hanteerden, zij het dan als hermeneutisch begrip. Dit was het begin van een lange zoektocht naar theoretische ondersteuning voor het concept. Antoine Lavoisier en John Dalton liggen aan het begin van een traditie dat het atoomconcept trachtte uit te diepen en in te passen in wetenschappelijke verklaringen, zoals voor de chemie. Er wordt hier dus een beeld geschetst van de werkelijkheid waarin alles bestaat uit bouwstenen die het meest fundamentele niveau van deze werkelijkheid vormen. Anders dan bij Demokritos hebben we hier te maken met een beschrijving van atomen die het speculatieve niveau overstijgen doordat ze het resultaat zijn van een experimentele calculus en daardoor konden rekenen op theoretische ondersteuning. Bovendien bleek men met dit concept in staat te zijn voorspellingen te maken en vooruitgang te boeken in de analyse van materie. Maar van een echt atoommodel is er nog geen sprake indien men louter het concept 'atoom' introduceert en operationeel maakt. Hiervoor zal eerst een nauwkeurige beschrijving van de interactiewetten, waaraan atomen onderhevig zijn, dienen te worden gegeven.

Door de intrede van een onderzoek naar het gedrag van gassen, waarbij het gas werd voorgesteld als samengesteld uit een chaotische wolk van atomen, kwam er schot in de zaak. James Clerk Maxwell was de man die hier verantwoordelijk voor was. Hij argumenteerde in zijn onderzoek uit 1859 naar de gedragswetten van een aggregaat van moleculen dat het gedrag van gassen kan worden verklaard vanuit statistische

toepassingen van de klassieke, Newtoniaanse bewegingswetten op grote aantallen moleculen en atomen. Hiervoor postuleerde hij vier stellingen die allen betrekking hebben op het verband tussen bewegende atomen en gassen: 'moleculen zijn als kleine, harde, bolvormige objecten met een diameter die kleiner is dan de onderlinge afstand; bij botsing tussen de moleculen treedt er geen energieverlies op; afgezien van deze botsingen bewegen moleculen zich zonder interactie met een constante snelheid in een rechte lijn en tenslotte zijn de posities en snelheden van de moleculen in eerste instantie willekeurig' (McEvoy&Zarate 1999:21). Het feit dat hier wordt gesproken over moleculen in plaats van atomen zou geen hindernis mogen zijn omdat moleculen figuraties van atomen zijn en dus als representatief voor atomen staan. Nu, in plaats van één molecuul te volgen, spreekt Maxwell over de statistische gemiddelden van de moleculen in een gas; omdat het bijzonder moeilijk is, maar theoretisch niet onmogelijk, om uit de gigantische veelheid van atomen er één te volgen. Hierdoor kwam hij tot de idee van een bepaling van statistische gemiddelden. Aan de start van de thermodynamica leerde James Joule ons dat warmte gelijk is aan mechanische arbeid (hier voorgesteld als de willekeurige beweging van moleculen). Dit, in combinatie met de wetten van Newton, dewelke stellen dat temperatuur evenredig is met het gemiddelde kwadraat van de snelheden, leidt tot het resultaat volgens welk we nauwkeurige voorspellingen van de snelheidsverdeling van moleculen kunnen maken. Deze verbinding tussen snelheid en temperatuur is gerechtvaardigd door de verwijzing naar de thermodynamica: de warmte van het gas is een uitdrukking van de mechanische arbeid die door de moleculen geleverd wordt. De statistische bepaling is een gevolg van de chaotische beweging van de moleculen: doordat ze telkens ongeordend botsen met elkaar bewegen ze nu eens snel, dan weer traag. Dit komt in de plaats van de moeilijk te verkrijgen informatie over de effectieve beweging van elke molecule afzonderlijk.

Het belang van Maxwell's theorie voor ons ligt in de voorspellingen die slechts mogelijk werden gemaakt door de introductie van het atoomconcept. Door de voorstelling van een gas, als samengesteld uit individuele deeltjes, kon men via statistische toepassingen

voorspellingen doen. Dit verschafte hem de nodige praktische informatie omtrent de atoomhypothese waardoor de operationaliteit van dit begrip bewerkstelligd werd. Deze laatste eigenschap is van cruciaal belang in de wetenschap: reproductie, deterministische vooruitgang (nomologisch verband) en predictie; waarover ook nu het atoomconcept meer en meer leek te beschikken. Van belang is hier dat we inzien hoe een nieuwe invalshoek ingang vond in de wetenschap, namelijk die van *waarschijnlijkheid en statistiek* van microscopische systemen en hoe deze gebruikt wordt om macroscopische eigenschappen, zoals temperatuur en druk, te voorspellen. En met succes! De introductie van deze klassieke notie ‘waarschijnlijkheid’ zal nog van belang zijn voor het verdere verloop, wanneer we de theorie van Schrödinger bekijken in het volgende deel en haar vergelijken met een andere vorm van waarschijnlijkheid.

De voorstelling van een verzameling atomen die samen een gas vormen werd een vaststaand, praktisch gegeven. Het vertoonde coherentie met allerlei empirische gegevens uit andere dan fysische disciplines, zoals in de chemie. Maar het bestaan van atomen werd hierdoor gepostuleerd als zijnde zeer waarschijnlijk, maar deze opvatting had niet de graad van zekerheid die men doorgaans verwacht van theorieën in de wetenschap. Einstein was diegene die hier definitief verandering in bracht. Onder zijn publicaties in de *annalen der physik*, een serie van vier wonderbaarlijke artikels die het aanschijn van de fysica totaal veranderden, bevond zich een artikel over de Brownse beweging<sup>3</sup>. De botanicus Brown kwam in 1827 tot de vaststelling dat stuifmeelkorrels in een vloeistof lukrake bewegingen vertonen die microscopisch zijn vast te stellen. Ongeveer vijftig jaar later was het de Belgische fysicus Joseph Delsaulx die een moleculaire verklaring bedacht voor dit wanordelijke gedrag van de moleculen: de beweging van de korrels is een gevolg van de botsingen van de stuifmeelkorrels met de moleculen van de vloeistof. Op zich zijn deze bewegingen minuscuul en te verwaarlozen. Wanneer men echter het geheel als zodanig beschouwt, ziet men de gevolgen van deze botsingen die resulteren in een effectieve beweging van de stuifmeelkorrels. Einstein vertaalde deze mechanismen in

---

<sup>3</sup> Einstein, Albert. ‘Zur theorie der Brownschen Bewegung’. *Annalen der Physik*, 19 (1906), pp. 371-382

fysisch kwantitatieve formules. Dit was een historische ontdekking. De schijnbaar willekeurige bewegingen van de korreltjes zijn dus op dieper niveau te beschrijven door statistische wetmatigheden (nomologisch verband). Dit was de doorslag die Einstein in staat stelde de atoomhypothese te verheffen tot een volwaardige, fysische theorie.

### 1.2.2 Elektronen

Vanaf Demokritos werd er reeds gespeculeerd over atomen en sindsdien zijn er steeds meer aanwijzingen in de richting gegeven die de plausibiliteit van het concept ondersteunen. Tot deze ontwikkelingen mag men ook de bevindingen van de Engelse natuurkundige rekenen die in het Cavendish-Laboratory op negatief geladen deeltjes was gestoten. Joseph John Thomson stelde binnen het onderzoek naar de aard van materie zichzelf de vraag wat de aard was van kathodestrallen<sup>4</sup>? Hij ontwikkelde een experiment dat hem uitsluitel moest bieden op deze vraag.

“De baan van een dergelijk deeltje kan door zowel magnetische als elektrische velden worden afgebogen en Thomson’s apparatuur was zo afgesteld dat de beide krachten elkaar ophieven [...]. Deze truc gaat alleen op voor elektrisch geladen deeltjes, dus concludeerde Thomson dat kathodestrallen inderdaad negatief geladen deeltjes zijn (die we tegenwoordig elektronen noemen). Hij bleek in staat te zijn het evenwicht tussen elektrische en magnetische krachten te gebruiken om de verhouding te berekenen tussen de elektrische lading en de massa van een elektron ( $e/m$ ). [...] hij kreeg altijd hetzelfde resultaat, en op grond daarvan concludeerde hij dat elektronen delen van atomen zijn.” (Gribbin 1984:36)

Dankzij de verkregen informatie (negatieve lading) kwam Thomson tot de bevinding dat elektronen deeltjes moeten zijn die noodzakelijk deel uitmaken van een beschrijving van het atoomconcept. Door zijn ondervindingen nogmaals te testen met verschillende typen van metaal, waarbij hij steeds hetzelfde resultaat bekwam (reproductie), concludeerde hij

---

<sup>4</sup> Kathodestrallen verkrijgt men door in een buis met gas en twee metalen draadjes onder elektrische spanning bijna al het aanwezige gas weg te pompen. Vervolgens zie je hoe het gas tussen de draden oplicht ten gevolge van de elektrische stroom die ontstaat tussen de twee metalen draden. Er ontstaat dus een vorm van straling die van de negatief (kathode) geladen draad naar de positief (anode) geladen draad ‘springt’. Deze straling noemt men kathodestraling.

dat alle elektronen identiek zijn. Hieruit blijkt dat men reeds voor de tijd van Einstein ervan uitging dat het begrip van atomen een bruikbare idee was als leidraad in een onderzoek naar de aard van materie. Hierin toont zich overigens ook de sterke heuristische waarde van (filosofische) concepten waarvan de fysica, evenals elke andere discipline in de wetenschap, zich bedient. De taak van de filosofie kenmerkt zich binnen deze context primair als heuristisch apparaat. Vanaf de speculatieve idee van ondeelbare entiteiten, die we bij Demokritos terugvinden, tot de kwantitatieve beschrijvingen bij Einstein, wordt de idee van atomisme gehanteerd, met uiterst vruchtbare gevolgen. Het zijn de filosofische beschouwingen over dit begrip en de consequenties van deze zienswijze die in grote mate de evolutie van de fysica bepaalt hebben.

De aandacht die hier wordt gevestigd op het concept straling (hier: kathodestralen) heeft als doel ons vertrouwd te maken met de wijze waarop de wetenschap is gekomen tot een eigen beschrijving van de werkelijkheid en zal in wat volgt nog uitvoerig worden behandeld. Vooreerst, wat is straling? Algemeen gesproken verstaat men onder straling het uitzenden van energie onder de vorm van golven (bv. elektromagnetische) of deeltjes. In de bespreking van Thompson's experiment met kathodestralen werd straling benaderd in de hoedanigheid van deeltjes; maar eveneens het golfkarakter werd bevestigd. Het stralingsconcept dat hier beknopt gehanteerd wordt dient men te verstaan als een analytische methode aan de hand waarvan men eigenschappen betreffende het atoom kan deduceren. Deze kathodestralen bleken in het verleden vruchtbaar te zijn voor een verdere beschouwing in de analyse van partikels; in het vervolg zien we hoe ook andere vormen van straling ertoe zullen bijdragen dat het concept van een atoom(model) aanvaardbaar wordt. Hier zal eveneens aandacht worden besteed aan het stralingsconcept als meer dan een louter analytische methode; zo vormt het een noodzakelijk onderdeel in de beschrijving van atomaire processen, zoals we weldra zullen opmerken. De manier waarop men de verschijnselen verklaarde, resulteerde in een nieuwe wetenschap.

### 1.3 Max planck: Zwart-lichaam straling, de ultraviolet-catastrofe en kwanta

Aan het einde van de negentiende eeuw ging men uit van een dualisme in de fysica. Bekende verschijnselen als licht werden verklaard aan de hand van golven (straling), terwijl materie bestond uit deeltjes (atomen). Het concept van straling was reeds bekend maar de betekenis ervan voor deze nieuwe theorie was nog niet duidelijk. Men was enkel op de hoogte van het feit dat materie over het vermogen beschikt energie uit te zenden, zoals de elektronen rond de kern doen. Dit gegeven was een uiterst vruchtbare gedachte. Wanneer men een voorwerp verhit, produceert het elektromagnetische straling, dit wil zeggen: licht<sup>5</sup>, met een breed spectrum van frequenties. De golflengte drukt de afstand tussen de twee opeenvolgende punten van een golf uit (in de voortplantingsrichting), de frequentie is een tijdsmeting dat in Hertz uitgedrukt wordt, betreffende het aantal malen de top van een golf (verstoringfunctie) per seconde voorbij een bepaald punt passeert. De trog en de piek van een golf samen noemt men een cyclus. We kunnen de frequentie ook uitdrukken als de hoeveelheid cycli die per seconde plaats hebben. In figuur twee vindt u een index van dit spectrum.

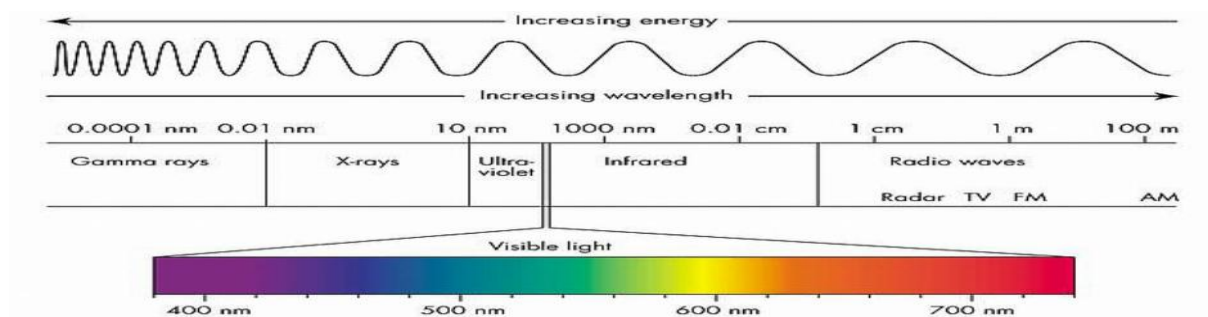


Fig. 2. : Hierboven ziet u de verdeling van energie en frequentie. Hoe korter de golflengten, d.w.z. hoe sneller de oscillaties (trillingen), hoe hoger de frequentie. Van links naar rechts in dit schema betekent dit dat de golflengte toeneemt maar de frequentie afneemt. Hoge frequenties kennen verhoudingsgewijs hoge energie.

<sup>5</sup> Niet enkel licht is een vorm van elektromagnetische straling. Ook radiogolven en microgolven, magnetische en elektrische golven zijn elektromagnetische straling.

Er bestaat dus een theoretisch verband tussen materie en straling, in die zin dat hoe sneller de atomen van de materie trillen, wat een gevolg is van de verhitting van het object, des te intenser de gemeten straling zal zijn. Deze straling is telkens van een andere frequentie. Maar er bestaat geen oneindig spectrum, terwijl men wel een praktisch oneindige hitte kan bereiken. Dit noemde men de ultraviolet-catastrofe en deze zal weldra besproken worden. Laat ons eerst kijken wat er gebeurde wanneer Planck een zwart-lichaam verhitte.

### **1.3.1 Zwart-lichaam straling**

Een zwart lichaam wordt in de natuurkunde gekarakteriseerd als een voorwerp dat het invallende licht absorbeert en opnieuw uitstraalt, en dus niet reflecteert zoals men doorgaans zou verwachten. De uitgezonden straling (spectrum: de hoeveelheid straling van verschillende golflengten) is enkel afhankelijk van de temperatuur. Een benadering van het zwarte lichaam is in feite niets anders dan een hol lichaam met een klein gaatje erin. Wanneer men het gaat verwarmen, zal elektromagnetische straling uitgezonden worden. Dit is een opeenhoping van de straling die zichzelf in het lichaam opstapelt ten gevolge van de verwarming, omdat het op geen enkele wijze het lichaam kan verlaten tenzij dan doorheen het gat. Deze opstelling toont ons op duidelijke wijze het verband tussen temperatuur en frequentie. Metingen verricht op deze straling wijzen uit dat bij een hogere temperatuur de totale hoeveelheid uitgezonden energie toeneemt en de golflengte van de straling steeds korter wordt, wat resulteert in een verband tussen temperatuur, energie en golflengte. De onderstaande grafiek toont dit verband. De aandachtzame lezer zal reeds gemerkt hebben dat deze weergave in de onderstaande grafiek eigenlijk niets meer is dan figuur 2, behalve dan dat hier de correlatie met de temperatuur wordt weergegeven.



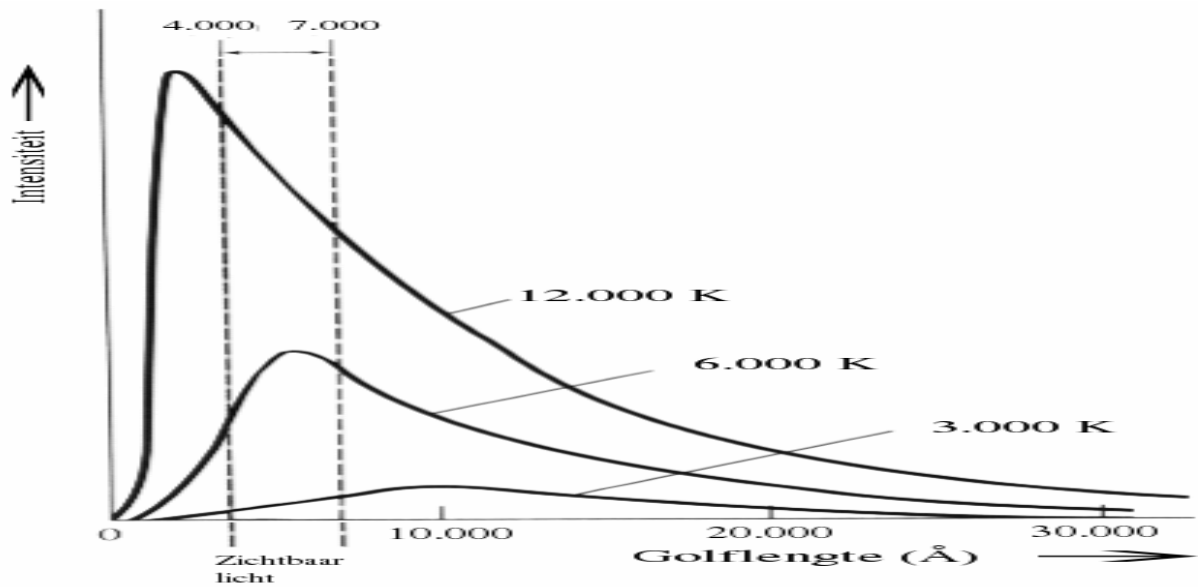


Fig. 3. : Deze grafiek drukt het verband uit tussen temperatuur en eigenschappen van licht. Ook de frequentie laat zich vertalen aan de hand van de temperatuur, want een grote golflengte betekent een lage frequentie.

### 1.3.2 De ultraviolet-catastrofe

Tot op dit punt is alles nog duidelijk te verklaren vanuit de klassieke wetenschap. Maar denken we even terug aan Maxwell's vergelijkingen van moleculen in een gas. Kon men het probleem van de zwarte straling op soortgelijke wijze oplossen? Waarmee we bedoelen of het niet mogelijk zou zijn, naar analogie met Maxwell's wetten voor moleculen in een gas, de totale energie van de opgestapelde en uitgezonden elektromagnetische straling te berekenen als zijnde afkomstig van de som van de energie van de verschillende individuele (licht)golven. Dit is vanuit praktisch oogpunt dezelfde idee, door Maxwell toegepast in zijn voorstelling van een gas als de optelsom van de moleculen. Door steeds hogere temperaturen zou de uitgezonden energie eveneens steeds stijgen, ten gevolge van de steeds groter wordende hoeveelheid verzamelde straling in het zwart-lichaam. In dit verband wordt er vaak verwezen naar Wilhelm Wien en de wet van Rayleigh en Jeans. Zonder al teveel in detail te treden zou ik kort willen wijzen op hun bijdragen: Wien, Lord Rayleigh en Jeans hadden theoretische voorstellen gedaan voor wat betreft het verband tussen energie en frequentie van de uitgezonden straling uit het zwart-lichaam. Maar ze slaagden er niet in een algemeen wetmatig verband te vinden voor het gehele frequentiegebied (hoog en laag). Aangezien ze beiden dezelfde curve

beschrijven, hiermee bedoel ik hetzelfde verschijnsel (elektromagnetische straling), moeten hun bevindingen kunnen samengevoegd worden tot één geheel: een algemene stralingsformule. Maar wanneer men de formule voor de beschrijving van de curve voor lage frequenties (door Rayleigh en Jeans beschreven) trachtte toe te passen op de hoge frequenties (door Wien beschreven) gaf dit paradoxale resultaten. De klassieke wetenschap voorspelt een onbegrensd energiegehalte voor het ultraviolette gebied en daarboven. Dit laatste is het deel van het spectrum weergegeven door kortere golflengten dan het voor ons zichtbare spectrum. Maar dit is absurd. Wat ging er mis? Rayleigh en Jeans hadden de statistische methode, *naar analogie met Maxwell's theorie over deeltjes*, toegepast op de golven van de straling. Hierbij vertrokken ze van het gegeven dat de totale energie binnenin het lichaam gelijk was verdeeld over alle mogelijke stralingsfrequenties. Maar er is een belangrijk verschil tussen golven en deeltjes. *De deeltjes in een gas zijn eindig terwijl het aantal trillingsfrequenties van een golf oneindig is*; een golf kan op een oneindig aantal wijzen trillen en doordat er steeds meer golven in het zwart lichaam passen naarmate de frequentie toeneemt (en dus de golflengte afneemt) komt men tot een oneindig aantal. Een oneindige frequentie (oneindig aantal trillingsmogelijkheden) zou dan gepaard gaan met een oneindig hoge energie van de straling. Dit noemt men de ultraviolet-catastrofe. Deze werd echter nooit experimenteel bevestigd hoewel ze in theorie wel plaats heeft, of nog: de ultraviolet-catastrofe wijst hier dus op de incompatibiliteit van de stralingsformule van een zwart lichaam voor de hoge frequenties met de wet van Rayleigh en Jeans, dit zijn de lage frequenties. De empirie kwam in conflict met de theorie. Dit is het moment waarop Max Planck zijn intrede doet.

### 1.3.3 Individuele energiekwanta (discontinuïteitsthese) en $h$ <sup>6</sup>

Planck was een lid van de Pruisische academie die zich voornamelijk bezighield met problemen uit de klassieke fysica, in het bijzonder met thermodynamica. Dat een oneindige intensiteit theoretisch voorspeld wordt maar experimenteel niet bevestigd

---

<sup>6</sup>  $h = (6,626\ 069\ 3 \pm 0,000\ 001\ 1) \times 10^{-34}$  Js. Ze wordt uitgedrukt in Joule seconden; omdat ze het verband uitdrukt tussen energie, waarvan de uitdrukkingseenheid Joule is, en frequentie, dat wordt uitgedrukt in aantal golflengten per seconde (1 Hertz =  $s^{-1}$ ).

werd, vormde zijn hoofdbekommernis. Op zoek naar een algemene stralingsformule ontdekte hij hoe de wet van Wien en Rayleigh-Jeans samen te voegen in een wiskundige formule die de gehele curve, voor lage en hoge frequenties, beschrijft. Hiervoor volgde hij Ludwig Boltzmann's theorie over entropie en energieverdeling. Om de uiteenzetting niet zonnodig complexer voor te stellen, kunnen we deze bijdragen van Boltzmann aan Planck reduceren tot de idee van opsplitsing van de totale energie in delen. Planck volgde deze methode voor zijn verdeling van de totale energie over de oscillatoren<sup>7</sup> in willekeurige maar *eindige* pakketjes. De totale energie werd gedefinieerd als  $E = Ne$  waarbij  $N$  een willekeurig natuurlijk getal is en  $e$  staat voor een willekeurige hoeveelheid energie. Omdat  $E$  de totale energie voorstelt wil dit zeggen dat  $e$  oneindig klein wordt naarmate de hoeveelheid pakketjes ( $N$ ) toeneemt. Indien men de correcte formule voor de totale energie wenste te verkrijgen diende de energie-eenheden zorgvuldig gekozen te worden, evenredig met de oscillatorfrequenties zodanig dat  $e$  (energie) =  $h\nu$ , waarbij  $\nu$  staat voor de frequentie en  $h$  een constante is die hij, voor de bepaling van haar waarde, bij wijze van *'trial and error'* liet afnemen tot nul. Deze  $h$  wordt de constante van Planck genoemd en wijst op de relatie tussen uitgestoten energie en (oscillator)frequentie. Indien hij  $h$  laat afnemen tot nul verloor de vergelijking haar geldigheid, maar, en dit is van het allergrootste belang, indien hij  $h$  niet tot nul liet afnemen en integendeel een bepaalde waarde koos, kwam hij uit op zijn eigen stralingsformule. Dit wou zeggen dat Planck gekomen was tot een theoretische onderbouw van zijn stralingsformule in het geval dat *energie discontinu is*. Dit wil zeggen, wanneer  $e = h\nu$  eindig is. Dit wees erop dat *niets energie kon absorberen of uitstralen in een continu bereik maar enkel in een discontinu patroon van ondeelbare, eindige pakketjes van energie* die door Planck *energiekwanta* werden genoemd. Doordat energie slechts in veelvoud van  $h$  voorkwam en dit laatste in verband stond met de frequentie, kon men verklaren waarom de ultraviolet-catastrofe nooit bevestigd werd. Energie wordt uitgedrukt in eenheden van frequentie maal  $h$ . Wanneer energie echter eindig is, betekent dit dat frequentie ook begrensd moet zijn

---

<sup>7</sup> Planck werkte feitelijk met een verzameling elektrische oscillatoren. Deze stonden als representatief voor atomen. Ze werden in de wanden van een cilinder geplaatst en trillen onder invloed van warmte. Hoe hoger de temperatuur, des te hoger de gemiddelde frequentie. Dit is opnieuw vanuit praktische zijde dezelfde gedachte als de idee van zwart-lichaam straling en Maxwell's verzameling van moleculen in een gas.

want de totale energie is eindig. De idee van energie-eenheden maakt met andere woorden een reductie mogelijk van de hoeveelheid energie bij hoge frequenties (aantal trillingsmogelijkheden in een zwart lichaam), en dus van de gemiddelde energie op deze frequenties. De consequenties hiervan waren moeilijk in te schatten in 1900 (hij zou pas 18 jaar later hiervoor de Nobelprijs worden toegekend). In de tijd dat Planck zijn bevindingen presenteerde (eigenlijk het gehele tijdperk van de fysica voor 1900) kon men deze discontinuïteit nog niet plaatsen omdat men toen nog van de gedachte vertrok dat de natuur geleidelijk en vloeiend is in haar overgangen tussen verschillende stadia van progressie of regressie: *'Natura non facit saltus'*.<sup>8</sup> Binnen deze context betekende dit dat er tussen twee verschillende energie-eenheden een oneindige tussenverdeling mogelijk was dat een oneindig aantal tussenniveaus toeliet, elk corresponderend met een overeenkomstig energiegehalte. Maar dit bleek niet in overeenstemming te zijn met de bevindingen van Planck. Deze gedachte van discontinuïteit luidde de komst van de kwantumtheorie in en vormt meteen de hoofdgedachte van waaruit men iedere wezenlijk kwantummechanische ontwikkeling kan begrijpen. Deze idee vormt mede de hoeksteen van deze thesis: in het verloop van de historische ontwikkeling en eveneens in de bespreking van de onbepaaldheidsrelatie krijgt het vorm als een indicator van typisch atomaire processen. Dit was de eerste noemenswaardige breuk met het klassieke denkkader. Omdat  $h$  niet gelijk kan worden gesteld met nul en na toevoeging van deze waarde, een minimale uitdrukkingseenheid van energie, overeenstemming van de wet van Lord Rayleigh met die van Wien gevonden werd, werd langzaamaan duidelijk waar dit nieuwe type fysica zich mee inlaat: microscopische fenomenen als straling en atomen die ogenschijnlijk enkel via deze nieuwe interactiewetten beschreven konden worden.

---

<sup>8</sup> 'De natuur maakt geen sprongen'. Een gedachte vanuit de oudheid die stelt dat alles in de natuur een continu, in de zin van opeenvolgend, proces volgt. Een wezenlijk klassieke notie.

## 1.4 Albert Einstein: elektronen-emissie, fotonen en het foto-elektrische effect

In de tijd dat Planck zijn bevindingen presenteerde, was men nog niet in staat deze een plaats te geven binnen het fysische denkkader. Dit kwam doordat zich hierin de eerste, fundamenteel kwantummechanische ontdekking voltrok die vanuit een klassieke beschrijving niet begrepen kan worden. Uiteraard waren er voordien ontdekkingen gedaan die wezen in de richting van een diepgaande theorie over de subatomaire natuur, maar deze waren slechts aanleidingen en behoren als zodanig niet tot de eigenlijke inhoud ervan. Dit laatste ontstond pas met de ontdekking van Planck. Een eerste duiding van de betekenis van de constante van Planck staat op naam van Einstein. Zijn formulering van licht als deeltjesvormige substantie kan in contact worden gebracht met de ontdekking van Planck op zodanige wijze dat Bohr later in staat zal zijn ook van hieruit zijn beschrijving van een atoommodel te ontwikkelen.

### 1.4.1 Foto-elektronen

Philipp Lenard, een assistent van Heinrich Hertz, kwam tot de vaststelling dat bij het schijnen van monochromatisch licht (licht van éénzelfde golflengte) op metaal elektronen worden afgegeven door het metaal: de invallende elektromagnetische straling leek met andere woorden emissie van elektronen uit het metaal te veroorzaken. Dit was echter niets nieuws want Hertz had dit reeds aangetoond, enkele jaren tevoren. Maar Lenard was in staat enkele eigenschappen van deze *foto-elektronen* te deduceren uit zijn proefopstelling. In zijn eenvoudigste vorm kan men dit uitdrukken zoals weergegeven in figuur vier.

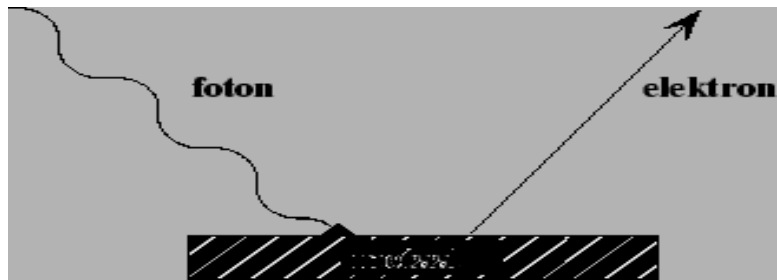


Fig.4. : Een metalen plaat wordt beschenen met monochromatisch licht (fotonen), waardoor elektronen van het metaal loskomen en het metaal verlaten. De energie van de elektronen is afhankelijk van het licht dat op het metaal valt.

De uitstraling van elektronen treedt op bij verlichting van een metalen plaat die de straler wordt genoemd. De elektronen worden opgevangen door de ontvanger die in verbinding staat met een ampèremeter dat de totale foto-elektrische stroom meet. Tussen de emissor (metalen plaat) en de collector (ontvanger) wordt een variabel elektrisch potentiaal of voltage bewerkstelligd dat een invloed uitoefent op de gemeten stroom. In praktijk wil dit zeggen dat men een remmend voltage toepast op de inkomende stroom elektronen naar de ontvanger door de collector negatief in te stellen ten opzichte van de inkomende elektronenstroom. Omdat elektronen negatief geladen zijn en de collector negatief wordt ingesteld zullen ze elkaar afstoten en zal bij een bepaalde negatieve waarde van de collector het foto-elektrische effect totaal verdwijnen. Elektronen die ondanks de negatieve lading van de collector deze toch bereiken en bijdragen tot het totaal van de gemeten stroom beschikken dus over een minimum aan energie. Maar wat betekende dit? Volgens het klassieke standpunt verkrijgen de elektronen hun energie doordat de lichtgolven op het metaal botsen en op deze wijze elektronen loswringen om ze dan mee te voeren met de (licht)stroom. Hierbij vertrok men van de veronderstelling dat de intensiteit van de lichtstraal in verband kan worden gebracht met de energie van de foto-elektronen: hoe intenser de lichtstraal, hoe meer energie de foto-elektronen bezitten. Dit was echter niet wat Lenard ontdekte toen hij de lichtbron dichter tegen de metalen plaat hield en hierdoor de intensiteit verhoogde, integendeel. Hij kwam erachter dat de energie van de weggeschoten elektronen uit het metaal enkel afhankelijk was van de frequentie

van het invallende licht, en dus vreemd genoeg onafhankelijk van de lichtintensiteit<sup>9</sup>. Er werd een bepaalde drempelwaarde gevonden waaronder geen foto-elektronen meer werden uitgestraald, wat eveneens een bevestiging was voor het discrete, individuele karakter van energie. Wederom een probleem dat vanuit klassiek perspectief niet kon worden verklaard.

### 1.4.2 Fotonen

Het was de jonge Einstein die een verklaring bood voor de relatie tussen de frequentie van de invallende elektromagnetische straling en de energie van de foto-elektronen. Tussen zijn publicaties uit 1905, waarvan we de Brownse beweging reeds beknopt besproken hebben, bevond zich een artikel<sup>10</sup> dat handelt over de aard van licht. Door simpelweg de vergelijking  $e = hv$  op de reële elektromagnetische straling toe te passen in plaats van op de oscillatoren uit Planck's experiment kon hij het verband tussen de frequentie en het energiegehalte beschrijven. Dit wil zeggen: waarom elk elektron uit het experiment dat door dezelfde frequentie werd losgewrikt over dezelfde energie beschikt. Alle licht van éénzelfde frequentie bezit dezelfde energie, de verhoging van de intensiteit zal louter meer elektronen loswringen uit het metaal maar heeft geen invloed op de energie en de snelheid waarmee ze het metaal verlaten. Maar is deze analogie tussen het aantal moleculen in een gas en het aantal trillingsmogelijkheden van de straling in het zwart-lichaam gerechtvaardigd? Indien dit zo is, dan kan men inderdaad het stralingsconcept opvatten als samengesteld uit een aggregaat van moleculen (atomen). In navolging van Maxwell en Planck weten we dat deze analogie het atoom praktisch bruikbaar voorstelde maar geldt dit evenzeer voor de vermeende relatie tussen de beide? Hiermee wordt de vraag gesteld of de relatie tussen elektromagnetische straling als een aggregaat van atomen en de frequentie van het invallende licht een wetmatig en kwantitatief verband kent.

---

<sup>9</sup> Lichtintensiteit wordt uitgedrukt in de hoeveelheid licht dat per oppervlakte-eenheid wordt uitgestraald of weerkaatst. Haar uitdrukkingseenheid is candela per vierkante meter. Lichtintensiteit is een wezenlijk klassiek concept.

<sup>10</sup> Einstein, Albert. 'Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt'. *Annalen der Physik*, 17 (1905), pp. 132-149

Hiervoor dienen Boltzmann en Wien weer even in herinnering te worden gebracht. Boltzmann werkte een statistische theorie uit over de verdeling van deeltjes die zich vrij en willekeurig gedragen binnen een verzameling (bv. gas). Hij verwees ernaar als de entropiewet die inhoudt dat een systeem gekenmerkt wordt door een graad van wanorde. Hier is van belang dat we inzien hoe de verandering van entropie optreedt wanneer het systeem wordt samen gedrukt tot een klein subvolume van zijn totale volume. Einstein bemerkte dat de entropieafname van monochromatische straling, wanneer het wordt samengeperst tot een subvolume van het totale volume, een gelijkenis vertoont met de entropieafname die optreedt bij een volumevermindering van een gas. Hieruit leidde hij af dat binnen het gebied van de hoge frequenties *straling zich als vele onafhankelijke energiekwanta laat beschrijven*, net zoals een gas uit individuele moleculen bestaat. Uit deze benadering van het foto-elektrische effect volgt dat de energie van straling gelijk is aan het aantal deeltjes vermenigvuldigd met de hoeveelheid  $h\nu$ . Einstein introduceert hier het postulaat van de lichtkwanta, met name *fotonen* (voetnoot 2). Volgens deze beschrijving zou alle elektromagnetische straling zich in discrete energiekwanta, ter grootte van  $h\nu$ , voortplanten. Dit was een opmerkelijk resultaat want hierdoor verkreeg de deeltjeshypothese van het lichtconcept opnieuw status. Het is steeds van belang dat we inzien hoe discontinuïteit telkens weer ten tonele verschijnt daar waar de klassieke wetenschap faalde. Anderzijds betekende dit dat het klassieke denkkader opnieuw problematisch werd, ditmaal in haar benadering van het lichtconcept. Want een klassieke verklaringwijze staat niet in voor de geldigheid van *zowel* de deeltjesbeschrijving als de golfbeschrijving. Naar het einde van dit historische deel, en zeker voor de aanloop naar het tweede en derde deel toe is deze dualistische idee van groot belang. We zullen bemerken hoe een beschrijving van atomaire processen zonder deze idee slechts klassiek blijft en als zodanig inadequaaf blijkt te zijn voor een kwantummechanische weergave. Hoe Einstein het begrip van fotonen verklaarde en op welke wijze dit bevestigd zou kunnen worden, zal ik in wat volgt kort behandelen.



Einstein verklaarde dat de uitgestoten elektronen hun energie afkomstig is van deze fotonen. Zij geven hun energie door aan de elektronen, dit wordt (deels) omgezet in kinetische energie, wat hen in staat stelt het metaaloppervlak te verlaten. Aan de hand van de spanning die nodig is om de elektronenemissie volledig halt toe te roepen (het elektrisch potentiaal waarover sprake) kon Einstein een verklaring bieden voor het verband tussen de frequentie van de fotonen en de energie van de foto-elektronen. De interactie tussen de invallende fotonen en de elektronen van het metaal leidt tot een energieoverdracht van telkens dezelfde grootte. Naarmate de frequentie steeg, steeg ook de waarde van het remmende voltage (elektrisch potentiaal). Nog anders gezegd: het volledig remmende potentiaal is een lineaire functie van de frequentie van het invallende licht. Verhoogt men deze frequentie, dan dient men eveneens de spanning van het remmende instrument op te voeren opdat men steeds dezelfde vergelijking behoudt. Deze verhouding is rechtevenredig en vormt de kern van een lineaire functie. Deze lineariteitsvergelijking bevestigt het deeltjesvormige karakter van licht, evenals de energie die aan de verschillende frequenties beantwoordt. De betekenis van deze correlatie tussen frequentie en energie van het foto-elektron kan worden uitgebreid tot daar waar ze betekenis krijgt voor het atoommodel dat door Bohr werd geïntroduceerd in het jaar 1912. Maar hiervoor dienen eerst Rutherford's atoommodel en het stralingsconcept geïntroduceerd te worden. Hierbij is het gegeven van stabiele elektronenbanen en de emissie van energie onder de vorm van elektromagnetische straling, zoals weergegeven in het spectrum op pagina 20, door de atomen (elektronen in hun omwenteling rondom de kern) cruciaal. Laat ons even van naderbij bekijken hoe dit alles betekenis kreeg in de aanloop naar de ontwikkeling van een atoommodel.

## 1.5 De weg naar het atoommodel

Na de introductie van het atoomconcept en de fundamenteel kwantummechanische ontdekkingen is het noodzakelijk stil te staan hoe dit tot een consistent geheel werd

samengevoegd. Hiervoor verwijs ik in de eerste plaats naar het atoommodel, omdat binnen dit model de logische plaats wordt toegewezen aan de bevindingen van de laatste eeuwen; en ook de interactiewetten worden er beschreven. Ernest Rutherford, een natuurkundige uit Nieuw Zeeland, wist aan het eind van de 19<sup>e</sup> eeuw een voorstel te doen voor wat het atoommodel betrof. Rond die tijd werden er experimenten gedaan waarbij alfadeeltjes (positieve lading) naar een dunne metaalfolie werden geleid. Sommigen gingen recht doorheen de folie, maar anderen weerkaatsten gewoonweg. Nog anderen werden afgebogen onder een hoek die afweek van de initiële invalstraling, maar ze gingen er niettemin doorheen. Deze afbuiging was te wijten aan het feit dat de alfadeeltjes met een enorme snelheid doorheen de folie vlogen en daarbij op de positief geladen deeltjes van de atomen in de folie botsten. Maar dit waren verschijnselen die vanuit het toen gangbare atoommodel niet konden verklaard worden. In die tijd ging men ervan uit dat een atoom kon worden voorgesteld als een model waarin de negatieve ladingen lagen ingebed in een positief geladen bol zodat de positieve alfadeeltjes er ongehinderd doorheen konden vliegen. Het reflectie- en diffractiepatroon (terugkaatsing en afbuiging) kon echter niet binnen dit atoommodel geplaatst worden. Tenzij de positieve ladingen in hun geheel gecentreerd lagen ergens in de kern van het atoom, kon men niet verklaren waarom bepaalde alfadeeltjes werden teruggekaatst en anderen afweken van hun baan. Dit was Rutherford's conclusie dat hem ertoe dreef zijn oude atoommodel te verlaten en plaats te maken voor een model waarin alle positieve ladingen gecentreerd liggen in het midden van het atoom (de kern) en omgeven worden door een wolk van elektronen (schillen van het atoom, met aan de buitenzijde de valentie-elektronen).

Maar steeds meer en meer theoretische en intuïtieve vragen rezen op en deze stelde de geldigheid van het kernachtige-model in het gedrang. Zoals: op welke wijze zijn de elektronen rond de kern gerangschikt? Als de kern uit een uiterst massief maar klein gedeelte bestaat waarin zich de positieve ladingen bevinden, waarom valt deze dan niet uiteen door de elkaar wederzijds afstotende ladingen? En waarom gebeurt er niet het tegenovergestelde, waarom trekken ze elkaar namelijk niet aan? Deze bedenkingen

werden door Rutherford opgevangen door te stellen dat de elektronen als in een planetair model rond de kern heen cirkelden. De elektrische ladingen doen hier dienst als de centripetale kracht die nodig is om ze in hun baan rond de kern te houden. Opvallend is dat we hier te maken hebben met de concepten uit de klassieke mechanica, want de baan van een elektron kon volledig beschreven worden aan de hand van de Newtoniaanse mechanica en de uitgezonden straling door Maxwell's wetten van de elektrodynamica. De baan die het elektron beschrijft zal nog van belang zijn voor het verdere verloop van deze thesis. In het volgende deel zal ik me wijden aan een onderzoek van positie- en energiebepaling van het elektron. De relatie tussen deze laatste twee variabelen vormt het punt van controverse in het tweede en, aansluitend hierbij, derde deel, in die zin dat een exacte, gelijktijdige bepaling van deze waarden de baan van het elektron beschrijft en in deze hoedanigheid de essentie van een klassieke beschrijving weerspiegelt. Maar zoals we onmiddellijk zullen opmerken vormt deze 'baan' een hachelijke hindernis in het vraagstuk rondom atomaire stabiliteit en is een simultane meting niet zonder gevolgen. Dit laatste zal aanleiding geven tot een eigenaardige wending in het fysische denken; meerbepaald in onze beschrijving van fysische systemen.

Laat ons nog even stilstaan bij deze klassieke conceptie van het atoom om vervolgens aan te geven waar zich de gebreken ervan bevinden en op welke wijze een kwantummechanische benadering weet af te rekenen met deze onvolkomendheden. Volgens Newton's model, door Rutherford gehanteerd in zijn verklaring voor de 'stabiele' elektronenbanen, blijven de elektronen in hun baan rondom de kern omdat twee nabije objecten (massa's) elkaar aantrekken (met een kracht die omgekeerd evenredig is met het kwadraat van hun onderlinge afstand). Dit wordt de *gravitatiewet* van Newton genoemd. De centripetale kracht zorgt voor de kracht die werkt op het middelpunt van de cirkelbaan. Deze zorgt voor de versnelling die nodig is om het elektron voortdurend in zijn baan rondom de kern te behouden. Dit is een belangrijk gegeven voor de overgang van het atoommodel naar dat model voorgesteld door Bohr. Daar zullen we het belang van deze versnelling snel uiteenzetten en een verklaring bieden voor de hiermee gepaard

gaande verandering in energie/straling. Bohr zelf spreekt echter over 'kwantumsprongen'. In de reeds besproken eerste wet van de thermodynamica zagen we hoe warmte het equivalent vormt van mechanische arbeid. Maar dit kan ook geformuleerd worden in verband met wat we hier aantreffen; niet enkel warmte en mechanische arbeid vormen de keerzijde van dezelfde medaille, ook energie behoort hiertoe. Maar in welke zin kan dit Rutherford's atoommodel optimaliseren? Hier wordt het concept straling geïntroduceerd als meer dan een analytische methode. Het geeft invulling aan het analytische aspect doordat het in een experimentele context dienst deed als instrument waardoor de atoomstructuur zichtbaar werd gemaakt. Anderzijds vormt het, zoals we spoedig zullen opmerken, in de hoedanigheid van energie (elektromagnetische straling) een noodzakelijk onderdeel van een beschrijving van atomaire processen.

Het kern-achtige model dat aan ons werd voorgesteld blijkt nog steeds incoherent te zijn met de klassieke wetenschap wanneer we de uitgezonden straling van naderbij bekijken. Waarom de elektronen in hun baan rondom de kern niet voortdurend elektromagnetische straling uitzenden, zoals door de klassieke theorie voorspeld wordt, kon Rutherford's model niet verklaren. Omdat de elektronen in deze configuratie steeds versnellen is het noodzakelijk dat ze in een kort tijdsbestek al hun energie zouden uitstralen en dus bijna ogenblikkelijk naar de positieve kern zouden vallen (p. 20-21: zie Thomson). Hierdoor zouden dus nooit stabiele configuraties van chemische elementen kunnen tot stand komen. De modificaties hiervoor waren geen simpele aangelegenheid: ze beschrijven de detailstructuur van het atoom en staan in relatie tot de kwantummechanica. Het is in dit verband dat we met één van de grote figuren uit de eigenlijke kwantumtheorie zullen kennis maken: Niels Bohr. Hij stelde dat de beperkingen in Rutherford's model geen betrekking hadden op de vermeende foutieve toepassing van de klassieke bewegingswetten op de inwendige structuur van het atoom. De klassieke wetten waren überhaupt niet van toepassing op de subatomaire wereld, aldus Bohr.

## 1.6 Niels Bohr: spectroscopie, elektronenbanen en het atoommodel

Niels Bohr werd geboren in Kopenhagen in het jaar 1885. Hij studeerde er natuurkunde en in 1911 zette hij zijn loopbaan verder in Cavendish (Cambridge) waar hij zich aansloot bij Thomson's laboratorium. Na een ontmoeting met Rutherford verhuisde hij naar Manchester. Zijn ambitie bestond erin een logische verklaring te bieden voor de verscheidenheid aan elementen in het periodieke systeem van Mendeljev door middel van de atoomstructuur. Al gauw maakte hij kennis met de spectroscopie en haar betekenis voor de inwendige structuur van atomen. Spectroscopie bleek niet enkel een handig middel te zijn voor de astronomie maar eveneens voor de fysica en primair voor de scheikunde. Alvorens de draad weer op te pikken, die ons verder leidt in de genealogie van het atoommodel, dienen we vooraf nog deze ontwikkeling te vermelden. Een ontwikkeling die reeds jaren aan de gang was maar waarvan de betekenis en draagwijdte voor de kwantumtheorie nog niet bekend was. Beter nog, spectroscopie werd ontwikkeld lang voordat Planck en Einstein geboren werden.

### 1.6.1 Spectroscopie

De spectroscopie is niet zozeer een wetenschappelijke discipline maar eerder een verzameling van analytische technieken en methoden voor de analyse van de samenstelling waaruit chemische en fysische bestanddelen zijn opgebouwd. Hierin doet men onderzoek naar de emissie van elektromagnetische straling door verhitte gassen of voorwerpen. Reeds in de achttiende eeuw ontdekte de Schotse natuurkundige Thomas Melvill dat het lichtspectrum van een heet *gas* dat door een prisma gaat compleet verschilt met dat van een gloeiend *voorwerp*. Elk gas beschikt bovendien over een specifiek patroon. Maar wat gebeurt er indien we een gloeilamp (voorwerp) licht van alle frequenties laten schijnen doorheen datzelfde gas, maar ditmaal in zijn *koel*e vorm? Een spectrum van donkere lijnen verschijnt, dat exact correspondeert met de heldere lijnen van het spectrum van het verhitte gas. Hieruit kunnen we concluderen dat het koude gas

licht absorbeert bij precies dezelfde frequentie als waarbij het licht uitstraalt tijdens verhitting. Deze benaderingswijze toont ons dat een gas zowel het vermogen bezit energie te absorberen als uit te stoten. De onderstaande figuur toont ons hoe dit in zijn werk gaat.

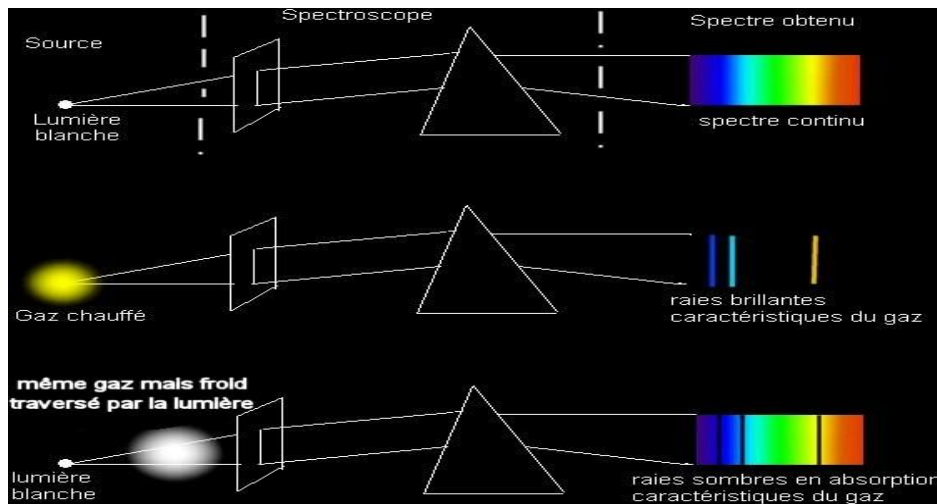


Fig. 5. : Drie proefopstellingen van boven naar beneden: een vast, gloeiend voorwerp zendt licht doorheen de prisma; een heet gas zendt licht doorheen de prisma; een vast, gloeiend voorwerp zendt licht doorheen een koud gas alvorens de prisma te bereiken.

De eerste proefopstelling uit figuur 5 toont het continue spectrum van elektromagnetische straling dat wordt uitgezonden door een vast, gloeiend voorwerp, bijvoorbeeld een gloeilamp. De tweede vervolgens toont ons dat het spectrum van een heet gas bestaat uit heldere lijnen die karakteristiek zijn voor de kleur van dat gebied in het spectrum. Dit laatste is een aanwijzing voor de chemische samenstelling van het gas. De derde proefopstelling is de meest interessante van de drie. Hierin toont zich hoe datzelfde gas, wanneer het koud is, licht van dezelfde frequentie als de uitgezonden straling van het verhitte gas, absorbeert. De lege plekken in het spectrum, de donkere lijnen, verwijzen naar de bouwstenen van het koude gas: omdat de vaste lichtbron, zonder doorheen dit gas te gaan, een continu spectrum toont (bovenste fig.) wil dit zeggen dat, door invoering van een koud gas, het spectrum onderbroken wordt doordat licht van een bepaalde frequentie het scherm niet bereikt. Dit 'niet bereiken van het licht op het scherm' betekende volgens de spectroscopie dat het onderweg geabsorbeerd werd door dit gas. De tweede opstelling toont ons eveneens dat een verhit gas heldere lijnen produceert in het spectrum die van dezelfde frequentie zijn als de donkere lijnen in opstelling drie. Hieruit concludeerde men

dat gas de mogelijkheid bezit energie te absorberen of uit te stoten, afhankelijk van de temperatuur en de samenstelling van het gas. Op deze wijze was men bijvoorbeeld in staat het zonnenspectrum te analyseren. De donkere lijnen hierin tonen aan welke elementen we in de atmosfeer rondom de zon kunnen terugvinden.

De meest simpele wijze waarop men het verband tussen deze lijnenspectra en de eigenschappen van een atoom kon onderzoeken, hield verband met een onderzoek van het waterstofatoom. Niet toevallig waterstof, want dit bleek het eenvoudigste element te zijn. Waterstof leverde vooreerst vier prominente lijnen op, allen in het zichtbare gebied. Toen verscheen Johann Balmer op het toneel. Als wiskundeleraar hield hij zich bezig met de ordening van de numerieke gegevens betreffende de frequenties van de zichtbare lijnen van het waterstofatoom. Tot zijn grote verbazing ontdekte hij een mathematisch verband dat vrijwel exact de frequenties van de vier zichtbare lijnen van het waterstofatoom kon voorspellen, dit werd de Balmer-formule genoemd. Andere frequenties en spectrale lijnen, die pas later bevestigd werden, konden evengoed accuraat voorspeld worden. Hij bleek een fundamenteel verband te hebben ontdekt tussen de verschillende emissiespectra van elektromagnetische straling bij atomen. Dit verband kon bovendien in een wiskundige vergelijking worden uitgedrukt. In deze zin zou een atoomtheorie op zinnvolle wijze de formule van Balmer in zich moet bevatten of zou deze minstens eruit afgeleid moeten kunnen worden.

## 1.6.2 Elektronenbanen en het atoommodel van Bohr

Het vraagstuk van de atomaire stabiliteit, zoals het door Rutherford werd voorgesteld, vormde in 1912 Bohr's hoofdbekommernis. Elektronen die in een baan rond de kern cirkelen, zoals in een miniatuurzonnestelsel, zouden volgens de klassieke wetten bijna onmiddellijk vervallen. En toch zijn bijna alle atomen stabiel. Waaraan ontleent het atoom deze stabiliteit? Hier speelt de relatie die door Einstein en Planck onderzocht en beschreven werd, de kwantumrelatie tussen de energie van een foton en de frequentie ( $e = hv$ ) een cruciale rol. Met andere woorden: de kwantisering van energie. Dat materie slechts in discrete hoeveelheden energie kan uitzenden of absorberen vormt de basis voor

Bohr's atoommodel dat op deze wijze zowel schatplichtig is aan Rutherford's model als aan de ontdekkingen van Planck en Einstein. Bohr's beschrijving van het elektron mondt steeds uit in dezelfde vergelijking, waarin de constante van Planck een cruciale factor is. In zijn zoektocht naar de oplossing omtrent de stabiliteit van atomen vertrok Bohr van twee postulaten<sup>11</sup>: stabiele elektronenbanen en de overgang van een elektron van de ene naar de andere baan gaat gepaard met een energieverschil (spectrale verschuiving).

Het *eerste postulaat* heeft betrekking op de baan dat een elektron beschrijft in zijn omwenteling rondom de kern. Deze zouden volgens Bohr stabiel moeten zijn, omdat ze anders onmiddellijk zouden vervallen. Hij noemt ze stationaire toestanden omdat hier geen emissie of absorptie wordt vastgesteld; m.a.w. er vindt hier geen overdracht van energie plaats maar een loutere kwantumtoestand van een elektronenschil met een bepaald impulsmoment<sup>12</sup>. Dit impulsmoment kan niet hoegenaamd eender welke waarde aannemen maar is altijd een veelvoud van een bepaalde waarde die wordt uitgedrukt in eenheden van de constante van Planck! We hebben hier te doen met een gegeven dat onmogelijk verklaard kan worden door de klassieke wetenschap, want waarom is het impulsmoment gekwantiseerd en kan het niet een willekeurige waarde aannemen? Vanuit deze beschrijving van het atoom volgt dat de stabiele banen rondom de kern de enige mogelijke zijn, zonder tussenbanen toe te laten, want deze veronderstellen andere waarden dan diegene die door een optimale beschrijving van het model worden gehanteerd.  $h$  verklaart eens te meer waarom atomen niet vervallen: energie kan niet in een continu patroon veranderen. Maar er is meer nodig ter verklaring want men kan met recht stellen dat ook in een discontinu patroon energie geheel kan vervallen. Indien het atoom bijna praktisch al zijn energie zou uitstoten zou het vooralsnog niet in staat zijn *al* zijn energie uit te zenden. Bohr spreekt hier van de grondtoestand van het atoom: een limitering in minimumenergie dat een atoom in zijn grondtoestand bezit. Een atoom bezit steeds energie, ook in de minst energierijke vorm; d.i. de grondtoestand. Het zou dan niet

---

<sup>11</sup> McEvoy, J.P., Zarate, O., 'Quantummechanica voor beginners', uitgeverij Elmar, Rijswijk, 1999, pp. 85-88

<sup>12</sup> Een impuls(moment) is een term die gebruikt wordt voor een speciaal soort beweging te beschrijven. Eenmaal een voorwerp in beweging is zal er een uitwendige kracht op moeten inwerken vooraleer het deze beweging onderbreekt. Een impuls kan lineair zijn of plaats hebben in een roterend systeem.



meer in staat zijn nog energie af te geven maar wel te absorberen, waardoor het opnieuw in een hogere toestand verkeert. Deze grondtoestand wordt uitgedrukt in eenheden van de constante van Planck.

Het *tweede postulaat* geeft een beschrijving van hoe de elektronen zich in de verschillende banen gedragen. Een overgang van de ene toestand naar de andere wordt beschreven als een opname of een afname van de energie van het atoom. Om een hogere toestand te bereiken dient het elektron de juiste hoeveelheid energie te absorberen, naar een lagere toestand kan het enkel gaan door die hoeveelheid uit te stoten. Deze uitgestoten of opgenomen hoeveelheid energie wordt eveneens uitgedrukt in eenheden van de constante van Planck! Dit waren de voorwaarden voor de 'kwantumsprongen' van de elektronen, zoals ze door Bohr genoemd werden. Vreemd genoeg zijn er geen concrete aanwijzingen gevonden die de oorzaak van een dergelijke sprong van het elektron inzichtelijk kunnen maken. Het tijdstip en een causale verklaring voor deze energieveranderingen werden door Bohr's atoommodel nooit geleverd. Er wordt wel eens naar verwezen dat dit te maken heeft met meer of minder waarschijnlijke toestanden waarin een elektron terecht kan komen. Maar een verklaring dat dit proces ondersteunt, heeft men er nooit voor gevonden. Dit werd vaak in verband gebracht met het verval van radioactieve elementen: hierbij zou men ook nooit het exacte moment kunnen aangeven wanneer een atoom juist vervalft. Maar dit is een andere kwestie.

Achteraf kon Bohr met behulp van zijn atoommodel succesvol de Balmer-reeks, dat het voor ons zichtbare spectrum omvat, afleiden. De verschillende wijzen waarop elektronen rond de kern bewegen in de voorziene stationaire banen en de elektromagnetische straling die ze hierdoor uitzenden gaven een verklaring aan empirische gegevens omtrent licht.

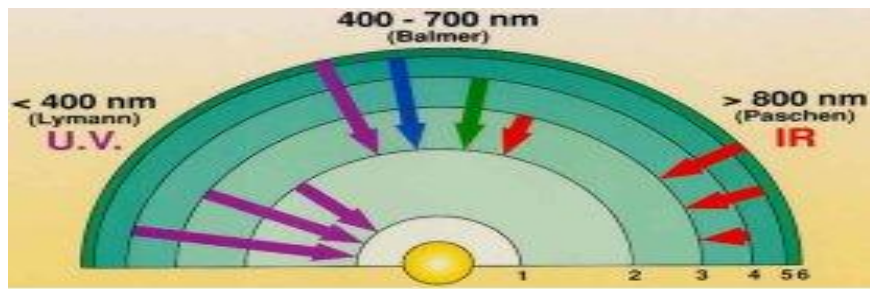


Fig. 6. : In bovenstaande figuur vindt u Bohr's atoommodel. Het geeft een uitdrukking aan zowel het eerste als het tweede postulaat. De getallen 1 tem. 6 verwijzen naar de verschillende stationaire toestanden, de zogenaamde stabiele elektronenschillen/banen. De pijlen geven aan welke kwantumsprongen van het elektron overeenkomen met de spectrale lijnen, dit is de uitgezonden (elektromagnetische) energie, of fotonen, die wordt afgegeven door het elektron bij een kwantumsprong naar een lagere toestand. Let wel, deze sprong is arbitrair in tijd. Het verband met de frequentie staat uitgedrukt in nanometer (nm).

Was hiermee het vraagstuk betreffende het atoommodel en de te verklaren spectrale lijnen afgerond? Zoals zo vaak in de fysica roepen nieuwe ontdekkingen tevens nieuwe vragen op. En uiteraard was ook dit niet het einde, want er werden nog andere spectrale lijnen ontdekt die men niet onmiddellijk aan de hand van Bohr's model kon verklaren. Maar dit doet niet in het minste afbreuk aan de bijdrage die door hem geleverd werd in de ontwikkeling van een atoommodel. Integendeel, deze nieuwe vragen konden slechts opgeroepen worden met behulp van dit model. De diepgang in onze kennis van de natuur wordt steeds verzekerd door dit soort werkwijzen; soms is het noodzakelijk één stap vooruit te zetten en twee stappen terug alvorens de volgende stap vooruit begrepen of gezet kan worden.

## 1.7 Golf-deeltje dualiteit van materie

Vooraleer we aan het einde komen van deze historische uiteenzetting over de wortels van de kwantummechanica dient als laatste het dualisme in de fysica nog te worden besproken; het dualisme omtrent de golf-deeltje dualiteit van zowel straling als materie. Dit laatste zal van belang blijken te zijn voor het vervolg van de uiteenzetting. In het laatste deel zullen we ingaan op de Kopenhagen-interpretatie van de theorie en deze stelt dat een adequate beschrijving van atomaire processen slechts mogelijk wordt door deze dualiteit, met als gevolg dat een klassieke benadering juist inadequaat blijkt te zijn voor dergelijke beschrijving. Deze dualiteit vormt een noodzakelijk onderdeel van een

wezenlijk kwantummechanische beschrijving. De vraag die nu centraal staat luidt als volgt: kan men straling slechts optimaal benaderen zoals de *corpusculi en fotonen* vanuit Newton en Einsteins beschrijving of eerder zoals de golftheorie van Huygens en Young beoogt, als golfverschijnsel? Want we weten dat beide hypothesen in de loop van deze geschiedenis onderzocht en onderbouwd werden, maar kunnen beide verklaringen simultaan aangehangen worden? Dit is uitgesloten, althans in een klassieke benadering. Dit laatste was iets dat enkel Einstein in die tijd geloofde. Enkel een beschrijving van licht als golf *en* als deeltje kan ons vooruit helpen in de fysica. Ondanks het ongeloof van velen kreeg Einstein in 1924 een sprankje hoop. Een Franse prins, Louis de Broglie, kwam met een theorie aandragen waarin hij het golfkarakter van alle materie poneerde. Geïnspireerd door Einsteins idee over onze dualistische beschrijving van het lichtconcept trachtte hij aan te tonen dat niet alleen licht maar eveneens elke vorm van materie verklaard kan worden vanuit *zowel* een deeltjesbeschrijving als een golfbeschrijving. Hij vertrok van de idee dat aan elke afzonderlijke hoeveelheid energie, zoals bij Planck en Einstein te lezen staat, een bepaalde frequentie moet worden toegekend, overeenkomstig  $e = hv$ . Volgens de Broglie ging de voortplanting van een golf gepaard met de beweging van gelijk welk deeltje dat aan deze golf gebonden was. Hij noemde deze golven *geleidingsgolven* of *pilootgolven* omdat ze met het deeltje in ruimte en tijd verbonden zijn en dit als het ware begeleiden. Kon men deze golven ook daadwerkelijk in verband brengen met de beweging van deeltjes en kan men enigszins beschrijven hoe? Volgens deze Franse prins wel. Bekijk even figuur 7.

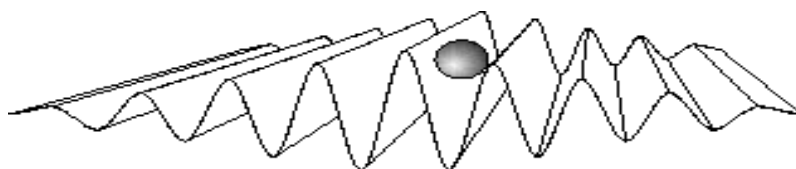


Fig. 7. : Hier vind u de weergave van een pilootgolf dat een deeltje begeleidt doorheen de wiskundige beschrijving van de ruimte-tijd. De frequentie wordt niet rechtstreeks toegekend aan het gedrag van dat deeltje maar aan een golf die met dat deeltje verbonden is zodanig dat het steeds 'in fase' is met het inwendige proces.

Hier ziet u hoe een pilootgolf het deeltje begeleidt. Hij vertrok van de idee dat er twee snelheden van deze golf kunnen beschreven worden: de fasesnelheid van de golf en de

snelheid van de golfgroep. Het eerste type van snelheid houdt verband met de piek van een golf, meer bepaald met de snelheid van zo één afzonderlijke piek doorheen de mathematische beschrijving van de ruimte-tijd. De tweede snelheid is de belangrijkste en van belang voor de Broglie's bewering. Dit is de snelheid van de golfgroep; de snelheid van de totale golf die samengesteld is uit de pieken en dalen van de afzonderlijke golven. In de voorgaande figuur wordt de golfgroep gevormd door de hele figuur. De Broglie verbond de snelheid van de golfgroep met de snelheid van het deeltje. Hij merkte op dat in deze beschrijving het versterkte gebied, waarin zich het deeltje bevindt, dezelfde mechanische eigenschappen vertoont als deeltjes, zoals energie en impuls. Hij toonde het verband aan tussen de golflengte van licht en de impuls van de afzonderlijke lichtfotonen. Hiermee opende hij de deur naar experimenteel onderzoek met betrekking tot de golfdeeltje dualiteit in de fysica. Ironisch genoeg zal het de zoon van Thomson zijn die de golfbeschrijving van elektronen experimenteel zal bevestigen, ongeveer dertig jaar nadat zijn vader hetzelfde had gedaan voor het deeltjeskarakter van elektronen. Is dit niet onvoorstelbaar hoe twee tegenstrijdige visies complementair blijken te zijn, iets wat zich nooit voordeed in de klassieke wetenschap.

Hiermee zijn we aan het bewuste einde gekomen van de historische weergave van het klimaat waaruit de vroege kwantumtheorie geboren werd. Hoewel velen haar reeds op het spoor waren, was het Planck die ze voor het eerst kon grijpen met zijn ontdekking van de constante dat een verband aangeeft tussen frequentie en energie. Het zou jaren duren vooraleer hij zelf van haar geldigheid overtuigd raakte. Vierentwintig jaar later, bij de Broglie, is de informatie rond het kwantumthema reeds toegenomen in complexiteit en is de constante van Planck al meerdere malen opgedoken in vergelijkingen als die van de atomen uit Bohr's atoommodel en de elektronen uit Einsteins foto-elektrische effect. Hoe onbeduidend klein  $h$  ook moge zijn, het feit dat ze niet gelijkgesteld kan worden met nul is een opmerkelijke ontdekking dat een onherleidbare breuk markeerde met het klassieke: dat energie zich enkel *discontinu* kan voordoen onder de vorm van discrete eenheden kon men niet vanuit de oude fysica verklaren. Na de Broglie wordt het kwantumlandschap

gedomineerd door tenminste drie interpretaties. Werner Heisenbergh, Erwin Schrödinger en Paul Dirac voorzagen alle drie afzonderlijk de theorie van een mathematisch formalisme. Dit bleek bovendien onderling compatibel en evenwaardig te zijn. In het volgende deel zullen we ingaan op de versie van Werner Heisenberg en zijn onbepaaldheidsrelatie, die onlosmakelijk samenhangt met de kritiek van Einstein die door Bohr op interessante wijze zal worden weerlegd.

## 2. De onbepaaldheidsrelatie en de kritiek van Einstein

In wat voorafging werd het klimaat geschetst waaraan de kwantumtheorie haar ontstaan te danken heeft. In het eerste kwartaal van de vorige eeuw waren we getuige van hoe de breuk met het klassieke denken ontstond en hoe dit hoegenaamd mogelijk werd gemaakt. Met de komst van discontinuïteit, fotonen en dergelijke meer stonden we aan het begin van een nieuw tijdperk in de fysica. Maar hoe revolutionair deze beginjaren ook moeten geweest zijn, van een echte theorie was hier nog geen sprake. Louter een verzameling van opzienbare ontdekkingen en nieuwe concepten domineerden het landschap maar men kon er de betekenis niet van achterhalen. Maar omdat de bevindingen van deze revolutie steeds weer gemathematiseerd en experimenteel bevestigd konden worden, vormden ze, niettegenstaande de incompatibiliteit met het klassieke, daardoor het beginsel voor een nieuwe wetenschap.

### 2.0 Inleiding

De geschiedenis van de kwantummechanica toont ons allesbehalve een éénduidige visie op het ontstaan ervan. Zo werden er in de jaren 1925-1926 maar liefst drie volwaardige interpretaties gegeven aan de inhoud van de informatie die er voorhanden was. Drie afzonderlijke kwantumtheorieën, die onafhankelijk van elkaar werden ontwikkeld en elk over hun eigen formalisme beschikten voor de verklaring van empirische gegevens; dat van Heisenberg, die we de matrixmechanica noemen; Schrödinger's golfmechanica en Dirac's kwantumalgebra, dat de twee voorgaande overigens in zich bevat als bijzonder geval. Achteraf werd aangetoond dat deze verschillende benaderingswijzen elkaars equivalent bleken te zijn. Dit wil zeggen dat de mathematica die aan één van deze theorieën ten grondslag ligt vertaald kon worden in een ander, maar gelijkwaardig, type van mathematische beschrijving. Omwille van deze complexiteit ben ik genoodzaakt slechts één van deze ontwikkelingen exhaustief te benaderen. De matrixmechanica van

Werner Heisenberg ligt aan de basis van zijn ‘onbepaaldheidsrelatie’ en het is dit laatste dat zal besproken worden. We zullen zien hoe deze relatie de specificiteit van een kwantummechanische beschrijving op de spits drijft waardoor het voor ons duidelijk wordt waarin ze verschilt van een klassieke vorm van beschrijven. Vandaar dat het noodzakelijk is de historische uiteenzetting kort te vervolledigen alvorens deze relatie te behandelen. De matrixmechanica is eerder dan de onbepaaldheidsrelatie en zal vooraf besproken dienen te worden. Dit eerste vormt het achterliggende mathematisch formalisme van de eerste formulering van de kwantumtheorie; het tweede echter, de onbepaaldheidsrelatie, is geen mathematisch construct maar eerder een gevolg van het mathematisch raamwerk van de kwantumtheorie. Ik zal me echter dienen te beperken tot een conceptuele analyse van deze relatie: wat betekent onbepaaldheid binnen deze relatie en op welke wijze wordt ze door Heisenberg voorgesteld? Dit brengt ons onmiddellijk bij de kern van zijn betoog, dat zijn uitdrukking vindt in het inzichtelijke gedachte-experiment van de gammastralen-microscoop. Hier worden noties als positie en momentum binnen een kwantummechanische context besproken. Dit hangt nauw samen met de filosofische houding van waaruit men vertrekt om naar deze concepten te kijken. Concreet wil dit zeggen dat ook het achterliggende denkkader van Heisenberg, zijn houding ten aanzien van wetenschap en realiteit, een belangrijke rol speelt in de vorming van de onbepaaldheidsrelatie. Dit is een indicatie voor de reeds zichtbaar wordende specificiteit van de epistemologische moeilijkheid binnen de kwantummechanische theorie. Na afloop bekijken we hoe Einstein in zijn repliek op de onbepaaldheidsrelatie zichzelf ondergraaft doordat hij zijn eigen relativiteitstheorie vergat in te brengen in zijn betoog tegen Heisenberg en Bohr. De kritiek van Einstein vormt een integraal onderdeel van deze uiteenzetting omdat hierdoor de vraag van een objectieve beschrijving van de werkelijkheid aan de orde is. Dit laatste verwijst naar het thema van deze thesis dat ik tracht te behandelen, namelijk de beschrijving van atomaire processen in termen van de kwantumtheorie en de vraag of deze in staat is objectiviteit te waarborgen zoals men ze in een klassieke beschrijving tracht te waarborgen en wat dit überhaupt te betekenen heeft.

## 2.1 Werner Heisenberg: de matrixmechanica

In het najaar van 1925 werd er een einde gesteld aan de onduidelijkheid van de steeds groter wordende berg informatie omtrent de kwantumverschijnselen. Tot dan toe bestond deze informatie louter uit een opeenhoping van bevindingen en verschijnselen, waarbij dit alles steeds moeilijker tot een consistent beeld kon worden samengevoegd. Werner Heisenberg was de eerste die hierin verandering bracht. In tegenstelling tot Bohr nam hij geen dingen in acht die niet konden worden waargenomen of experimenteel worden bevestigd; dit wil zeggen, beschrijvingen die niet konden worden uitgedrukt binnen het mathematische schema, noch falsifieerbare resultaten konden opleveren. Concreet wou dit zeggen dat de onzichtbare elektronenbanen uit Bohr's model weinig waarde hadden in Heisenberg's redenering; hoewel:

“One had to give up the concept of the electronic orbit but still had to maintain it in the limit of high quantum numbers, i.e., for the large orbits. In this latter case the emitted radiation, by means of its frequencies and intensities, gives a picture of the electronic orbit [...] one hope to come to relations for those quantities which correspond to the frequencies and intensities of the emitted radiation, even for the small orbits and the ground state of the atom. [...] Later the investigations of Born, Jordan and Dirac showed that the matrices representing position and momentum of the electron do not commute. This latter fact demonstrated clearly the essential difference between quantum mechanics and classical mechanics.” (Heisenberg 1966:38-39)

Het was Heisenberg's bedoeling een formule te ontwikkelen waarin de kwantumgetallen (hier: positie en lineaire impuls/momentum) konden worden gekoppeld aan de energietoestanden om zo de spectrale lijnen te verklaren. De lineaire impuls ( $p$ ) en de positie ( $q$ ) van een deeltje werden gehanteerd (beide als vector binnen de Hilbert-ruimte) en maakten het mogelijk de verschillende bewegingen van het elektron te beschrijven en de overeenkomstige energietoestanden te berekenen. Achteraf bleek hij met deze werkwijze inderdaad in staat de waargenomen spectrale lijnen af te leiden en hij ontdekte het theoretische verband hiervoor. Opvallend hier is de wijze waarop hij tot een



verklaring van de spectrale lijnen kwam, en dit zonder een verwijzing naar de zogenaamde kwantumsprongen. In plaats daarvan voldeed een numerieke beschrijving van het verband tussen de twee kwantumgetallen ( $q$  en  $p$ ) ter verklaring van het emissiespectrum (uitgezonden elektromagnetische straling). Maar opdat zijn formule de juiste waarden aangaf diende hij echter een eigenaardige toevoeging aan te brengen. Indien hij ( $p \times q$ ) aftrok van ( $q \times p$ ) bekwam hij steeds een waarde die niet gelijk kon gesteld worden aan nul! De waarde die hij in tegenstelling daarmee verkreeg werd eveneens uitgedrukt in eenheden van de constante van Planck ( $h/2\pi$ ). Dit betekende dat hij op iets fundamenteels kwantummechanisch was gestoten. Volgens dit formalisme was de *volgorde waarmee men de variabelen bepaalt van belang voor de uitkomst van de procedure*. Deze eigenschap wordt *niet-commutativiteit* van de matrix<sup>13</sup> genoemd en was reeds bekend, maar de betekenis ervan voor de kwantumtheorie was nog onduidelijk. De vraag of men geen simultane meting kan verrichten op  $p$  (positie) en  $q$  (momentum) zal behandeld worden in het thema van de onbepaaldheidsrelatie. Het belang van een dergelijke simultane meting is zeer groot aangezien een simultane meting impliceert dat een chronologie niets ter zake doet. Een gelijktijdige meting zorgt er met andere woorden voor dat het niet-commutatieve aspect gereduceerd wordt. Hierdoor behoudt de vergelijking haar klassieke karakter. In het vervolg zullen we zien dat juist dit tijdsaspect het punt van controversen vormt tussen de twee typen van wetenschap. Dit laatste wordt besproken in relatie tot de onbepaaldheidsrelatie en het gammastralen experiment.

Deze numerieke beschrijvingen van atoomtoestanden en energie van de zogenaamde elektronenbanen aan de hand van kwantumgetallen was een opmerkelijke ontdekking. Voortaan kon men verder zonder de speculatieve beschrijving van Bohr. Heisenberg had een mathematische beschrijving gevonden waarin energie en positie van het elektron konden bepaald worden. Hierin zat eveneens een verklaring voor het emissiespectrum besloten. Zijn calculus kon enkel uitgedrukt worden in reeksen van cijfers omdat ze

---

<sup>13</sup> Een matrix is een mathematisch schema waarin de getallen geordend zijn in rijen en kolommen. Deze staan voor de samenhangende gegevens omtrent informatie en maken het mogelijk op een systematische en eenvoudige wijze bewerkingen uit te voeren met deze complexe informatie.

telkens betrekking hadden op twee toestanden en hun onderlinge reciprociteit. Door de energietoestanden in verband te brengen met de abstracte kwantumgetallen kon hij vervolgens ook de 'kwantumsprongen' van hieruit verklaren.

## 2.2 Erwin Schrödinger: de golfmechanica

In de zonet besproken beschrijving van Heisenberg wordt er van de veronderstelling vertrokken dat fysische systemen (het onderzoeksobject) zijn opgebouwd uit deeltjes waarvan het momentum en de positie enkele eigenschappen zijn. Maar verkondigde de Broglie niet eveneens het golfkarakter van materie? Niet door het abstracte, mathematische formalisme van Heisenberg overtuigd ontwikkelde Erwin Schrödinger een compleet andere theorie. Bovenal was hij uit op een terugkeer naar het klassieke, aanschouwelijke beeld van de werkelijkheid. Hij werkte een golftheorie uit die de werkelijkheid beschreef in termen van golf functies, waarbij de analogie met de werkelijkheid letterlijk kan genomen worden, dit wil zeggen: zoals golven in een reëel wateroppervlak. Elk fysisch systeem en de kwantumtoestand ervan kan hier worden uitgedrukt in een golfvergelijking.

De grondregel om Schrödinger's theorie te kunnen begrijpen houdt verband met het bekende feit dat fysische systemen kunnen worden beschreven in mathematische vergelijkingen. In zijn zoektocht naar een algemene golfvergelijking ( $\Psi$ ) voor de beschrijving van eender welk systeem vertrok hij van de bevindingen van Fourier. Deze houden in dat een mathematische functie altijd gelijk kan worden gesteld aan de som van een oneindige reeks periodieke functies. De som representeert opnieuw de oorspronkelijke functie. De onderstaande figuur toont ons hoe deze opsplitsing van een golf functie inzichtelijk kan worden gemaakt.

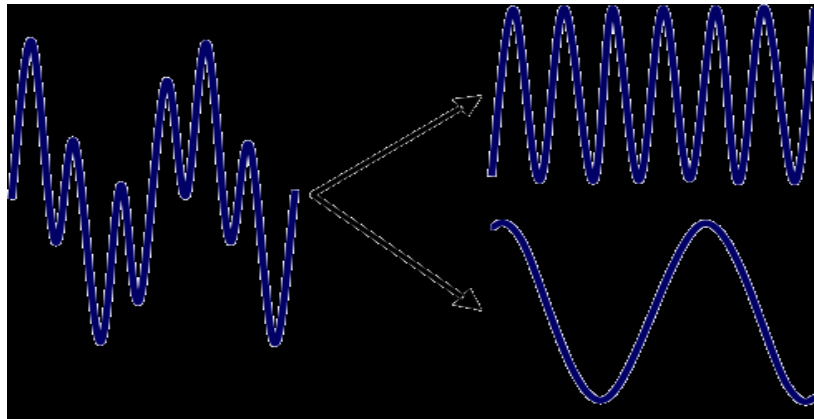


Fig. 8. : Hier wordt op rudimentaire wijze een golf functie voorgesteld die kan worden samengesteld uit twee andere golf functies. Deze golf functies aan de rechter zijde van de peilen staan steeds in harmonisch verband tot elkaar met betrekking tot hun frequenties.

Deze ‘nevenfuncties’ staan steeds in relatie tot elkaar wat betreft hun frequenties. Nu was het Schrödinger’s bezorgdheid de juiste golf functies<sup>14</sup> te vinden waarvan de som gelijk is aan zijn algemene golf vergelijking van het gehele systeem. Omdat hij hierdoor informatie zou verkrijgen betreffende de verschillende kwantumtoestanden van het systeem. Bovendien zou dit een bevestiging inhouden van wat hij trachtte te bewijzen: nl. dat fysische systemen kunnen worden beschreven aan de hand van golf vergelijkingen. Tijdens het zoeken naar de exacte golf functies toonde zich iets wat niet besloten lag in de Fourier-analyse: deze ‘nevenfuncties’ konden in verband gebracht worden met de individuele toestanden van het kwantumsysteem, waarbij de amplitudes het belang aangeven van deze concrete toestand voor het gehele systeem. Zijn golfmechanica bood, net als de matrixmechanica, een verklaring waaruit informatie betreffende de kwantumtoestanden kon worden afgeleid. Dit laatste wees erop dat ook deze ontdekking terecht een positie verdiende binnen de kwantumrevolutie. Vooral het mathematisch formalisme dat aanleiding gaf tot correcte voorspellingen omtrent kwantumverschijnselen verleende de golfmechanica dezelfde status als de matrixmechanica. Meer nog, Schrödinger’s theorie genoot meer succes omwille van de conceptuele inzichtelijkheid. De terugkeer naar de klassieke conceptie van de werkelijkheid wordt volgens hem bewerkstelligd door het lucide en reeds gehanteerde begrip ‘golf functie’. Dit zou de kwantumsprongen overbodig moeten maken door te verwijzen naar energiefluctuaties als

<sup>14</sup> Deze noemt men de eigenwaarden van de functies.

afkomstig van een *continue* overgang van de ene trillingsfrequentie naar de andere. Schrödinger begon zelfs te twijfelen aan het bestaan van deeltjes. Toch was geen van beide het geval en was er van een terugkeer naar de klassieke verklaring geen sprake.

### 2.2.1 Max Born en de probabilistische interpretatie

De zwart-lichaam straling, evenals het foto-elektrische effect konden echter niet verklaard worden vanuit de vermeende continuïteit waarnaar Schrödinger wilde terugkeren. Maar wat was de betekenis van fysische systemen in termen van een algemene golffunctie? De persoon die tevens ook Heisenberg's bevindingen in verband wist te brengen met de methode van de matrixmechanica bood een mogelijke verklaring voor deze vraag. Hiervoor introduceerde Max Born de opmerkelijke notie van *kwantummechanische waarschijnlijkheid*, die hij afzet tegenover de statistische of stochastische waarschijnlijkheidsinterpretatie. Deze laatste vorm van waarschijnlijkheid vinden we onder meer terug in Maxwell's kinematische theorie van moleculen in een gas en heeft louter betrekking op gemiddelden die men invoert door een gebrek aan kennis. Zo is het namelijk praktisch onmogelijk de snelheid en positie te bepalen van *alle* moleculen in een gas, maar met de introductie van statistiek wordt het aggregaat van moleculen een praktisch bruikbaar gegeven. De kwantummechanische interpretatie van waarschijnlijkheid werd door Born geïntroduceerd om de mate van (on)zekerheid in een kwantumsysteem uit te drukken. Deze vorm van waarschijnlijkheid werd geïnterpreteerd als de 'natuurlijke' limiet waarmee we uitspraken kunnen doen over atomaire verschijnselen. Ze is onderdeel van een dergelijke beschrijving. Dit is, nog anders gezegd, strikt genomen geen gebrek aan onwetendheid over het systeem maar juist een inherente eigenschap van dit bewuste systeem dat ons een grens oplegt aan de mate van zekerheid dat we kunnen bereiken omtrent systemen van dien aard. Een eerste moeilijkheid wat betreft de scheiding tussen ontologie en epistemologie. Want de idee van waarschijnlijkheid op zuiver fysisch niveau vormt een controversieel thema binnen de kwantumtheorie; vaak verdenkt men sommige voorvechters van de theorie ervan epistemologische consequenties onterecht te extrapoleren naar het ontologische niveau.

Maar hoe drukte men deze waarschijnlijkheid dan uit in Schrödinger's theorie? Hiervoor werd de term 'probabiliteitsgolf' geïntroduceerd. Volgens Born was deze golf een beschrijving van een 'uitgesmeerde waarschijnlijkheid':  $\Psi$  is de amplitude die aangeeft hoe waarschijnlijk het is dat bijvoorbeeld een elektron zich in richting  $x$  begeeft en in toestand  $y$  verkeert en het kwadraat hiervan duidt op de waarschijnlijkheid waarmee we het eraan verbonden elektron kunnen vinden op een dergelijke plaats, in een dergelijke toestand. Dit was een geheel nieuw concept binnen de theorie; de *waarschijnlijkheid van een kwantumtoestand* werd beschreven door wat in Schrödinger's theorie wordt weergegeven in een golfvergelijking. 'It was a quantitative version of the old concept of 'potentia' in Aristotelian philosophy. [...] It was not a three-dimensional wave like elastic or radio waves, but a wave in the many-dimensional configuration space, and therefore a rather mathematical quantity.' (Heisenberg 1966:41) De idee achter deze weergave is de volgende: een fysisch systeem kan beschreven worden in een golffunctie. Maar dit is slechts mathematisch zo. Born beweerde dat wanneer men een meting verricht op deze probabiliteitsfunctie, men haar letterlijk doet 'instorten' tot één van de vele mogelijkheden die door de functie werden voorgesteld. Strikt genomen is niet de probabiliteitsgolf maar enkel het deeltje een reële, fysische entiteit. De golfvergelijking echter wordt beschreven binnen een multidimensionale, mathematisch geconstrueerde ruimte. Dit wil zeggen: als formele en puur theoretische 'entiteit'.

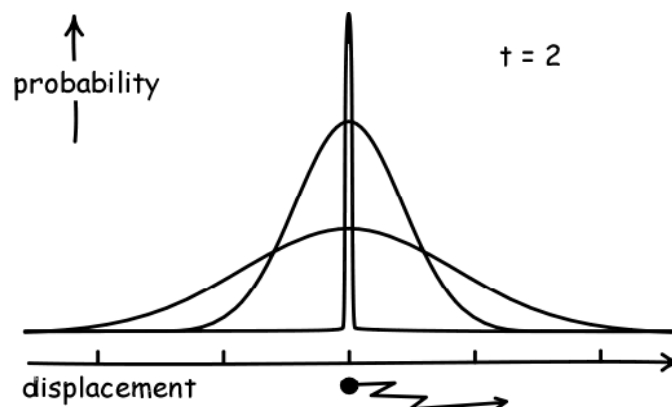


Fig. 9. : De bovenstaande figuur toont aan hoe men de waarschijnlijkheids-verdeling van atomaire bestanddelen kan aflezen uit de golfvergelijking. Daar waar de amplitude van de probabiliteitsgolf het hoogst is, heeft men de grootste kans het deeltje aan te treffen.

Schrödinger zelf was niet erg opgezet met deze probabilistische interpretatie van Born. Hij ontwikkelde een gedachte-experiment<sup>15</sup> dat uitsluitel moest bieden omtrent de wazige situatie die werd ingeluid door de komst van de probabiliteitsinterpretatie. Maar tot op de dag van vandaag is men er niet in geslaagd een bevredigend antwoord te bieden en wordt deze notie nog steeds gebruikt om het concept van kwantummechanische waarschijnlijkheid in atomaire processen te verduidelijken. In het algemeen kan men deze vorm van probabiliteit onderscheiden van een statistische vorm door deze eerste te situeren op het niveau van het fysische systeem in kwestie, daar waar de tweede vorm zich uitsluitend toont in de verhouding van de waarnemer tot een systeem: in het bijzonder in onze gebrekkige kennis over dat systeem. In een klassieke beschrijving komt deze gebrekkigheid tot uiting in de onnauwkeurigheid van de meetinstrumenten, door de praktische onmogelijkheid over alle informatie te beschikken en tal van andere factoren. Binnen de kwantumtheorie is deze waarschijnlijkheid, die men vaak in verband brengt met onzekerheid, een onderdeel dat inherent in de beschrijving van dat systeem besloten zit. Dit punt zal sterk naar voren worden gebracht wanneer we de onbepaaldheidsrelatie bespreken. Hier wordt een typisch kwantummechanische beschrijving behandeld waarin de probabiliteitstheorie in haar zuiverste vorm aan de dag treedt; hetzij dan onder de vorm van onbepaaldheid dat oprijst ten gevolge van de interactie met het klassieke domein (meetinstrument). In tegenstelling tot Schrödinger's visie was het volgens Born eveneens onjuist de golfvergelijking te beschouwen als een voorstelling van het reële, fysische systeem. Volgens hem was deze louter een representatie van onze kennis over dat systeem (d.i. de uitgesmeerde waarschijnlijkheid). Het instorten van de golfvergelijking, de discontinue verandering in de toestand van het systeem, zou dan niet meer betekenen dan een wijziging in onze kennis over dat systeem.

## 2.2.2 Verdere ontwikkelingen

Naast de interpretaties van Schrödinger en Heisenberg ontstond er nog een derde interpretatie, die van Paul Dirac. Hierbij zou ik slechts één enkele toelichting willen

---

<sup>15</sup> Het befaamde gedachte-experiment over de kat van Schrödinger.

geven. Dirac was erin geslaagd de deeltjes- en de golftheorie samen te voegen in een geünificeerde theorie waarin de matrix- en de golfmechanica oprezen als een bijzonder geval van zijn theorie. Deze nieuwe benadering kon zowel de juiste resultaten opleveren voor een theorie die elektromagnetische straling benaderde als deeltjes *of* als golven. In 1944 toonde de Hongaars-Amerikaans wiskundige John Von Neumann eveneens aan dat deze twee typen van mechanica mathematisch equivalent zijn zodat bewerkingen van de eerste eveneens accuraat kunnen worden voorspeld vanuit het formalisme van de tweede. Deze gelijkwaardigheid had verstrekkende gevolgen want deze schijnbaar tegenstrijdige benaderingen bleken uiteindelijk binnen éénzelfde raamwerk te passen. Volgens de Kopenhagen-interpretatie is het noodzakelijk dat ze (golf- en deeltjesbenadering) elkaar complementeren in een volledige beschrijving van atomaire processen. Dit complementariteitbegrip is een hoofdproduct van deze interpretatie en houdt in dat men voor de volledige beschrijving van fysische systemen zowel het deeltjesaspect als het golfaspect in rekening moet brengen; deze worden op een afzonderlijke wijze tot stand gebracht en sluiten elkaar wederzijds uit maar zijn niettemin beide vereist in deze weergave. Maar dit is voor het laatste deel. Laat ons eerst keren naar de introductie van de onbepaaldheidsrelatie.

### **2.3 De onbepaaldheidsrelatie van Werner Heisenberg**

In 1927, twee jaar na de ontwikkeling van de matrixmechanica, publiceerde Heisenberg een artikel over de inhoud van de kwantummechanica waarin de gelijktijdige meting van bepaalde variabelen aan de orde is. Hierin wordt duidelijk wat het niet-commutatieve aspect van de getallen in de matrix te betekenen heeft. Deze ontwikkeling wordt de *onbepaaldheidsrelatie* genoemd en duidt in het algemeen op de (on)zekerheid waarmee we informatie kunnen verwerven over bepaalde elementaire deeltjes en hun eigenschappen. Deze relatie wordt door Max Jammer in zijn historische analyse van de

kwantummechanica omschreven als een gevolg van de mathematische beschrijving van de theorie en staat als zodanig wel in relatie tot de matrixmechanica maar ze vormt er niet het (conceptuele) fundament van, zoals velen verkeerdelijk menen. Het omgekeerde is echter waar; deze relatie, zoals beschreven binnen het gedachte-experiment, doet louter dienst als heuristisch middel in de benadering en interpretatie van de matrixmechanica. Het formalisme van deze laatste ontstond eerder dan de interpretatie, vandaar dat een wijziging in deze interpretatie geen afbreuk doet aan de geldigheid van de theorie. Laat ons keren naar de inhoud van deze voorstelling.

### 2.3.1 Conceptuele voorstelling

In zijn originele artikel<sup>16</sup> over de fysische beginselen van de kwantummechanica vertrok Heisenberg van de vooronderstelling dat de positie en het momentum (massa maal snelheid)<sup>17</sup> van bijvoorbeeld een elektron niet onderhevig kan zijn aan een gelijktijdige *en* precieze meting. De klemtoon wordt hier gelegd op de term precisie. Dit houdt in dat een simultane meting van beide variabelen wel degelijk mogelijk is maar deze zal nooit een accurate beschrijving voor de twee opleveren. Het lijkt te zijn alsof een gelijktijdige meting gelimiteerd wordt door een inherent werkzaam principe dat verantwoordelijk is voor deze mate van onzekerheid. Hoewel dit laatste een simplistische voorstelling vormt van wat we dadelijk zullen bespreken zou ik ervoor willen pleiten deze term van inherentie in het achterhoofd te houden bij de uiteenzetting van Heisenberg's redenering.

Maar eerst nog een woordje uitleg over metingen en de totstandkoming van de bepaling van variabelen. In de klassieke wetenschap domineerde de gedachte dat een theorie

---

<sup>16</sup> Heisenberg, Werner. 'Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik'. *Zeitschrift für Physik*, 43 (1927), pp. 172-198

<sup>17</sup> Dit zijn canonisch geconjugeerde variabelen (canonic conjugate variables). Deze staan voor mathematisch gedefiniëerde grootheden die in de wereld van de fysica paren vormen. Naast positie en momentum zijn ook tijd en energie/frequentie variabelen van deze soort. Deze dualiteitsrelatie impliceert echter altijd de onbepaaldheid-relatie van Heisenberg.



universeel diende te gelden. De valwet van Newton is evengoed geldig ook indien niemand de appel zou zien vallen. In de kwantummechanica bestaat hierover grote onenigheid. Hier spelen de noties van waarneming en meting een cruciale rol zonder dewelke het niet mogelijk is de onbepaaldheidsrelatie te begrijpen. In de beschrijving van atomaire processen is het namelijk zo dat indien we een meting willen verrichten op een elektron we hierdoor genoodzaakt zijn in interactie te treden met dit elektron. Deze causale interactie houdt onvermijdelijk een wijziging in in de initiële staat van het onderzoeksobject waardoor de meting aan precisie inboet. Op de vraag of er nog alternatieven bestaan die de staat van het elektron niet aantasten en toch in staat zijn de exacte waarden van de variabelen aan te geven antwoordde Heisenberg negatief. Ongeacht de aard van de experimentele proefopstelling zal men steeds tot de bevinding komen dat een bepaling van eigenschappen van het onderzoeksobject steeds een wijziging in het gedrag van deze laatste zal vertonen. Dientengevolge is het onmogelijk informatie te verwerven over de initiële staat van het elektron *voor* de meting actueel heeft plaatsgevonden. De resultaten die men bekomt na het onderzoek geven dan weliswaar uitdrukking aan de toestand van het systeem op dat ogenblik maar van echte objectiviteit is hier nauwelijks sprake. Nu het tegendeel echter zou ook niet zonder meer aangehangen mogen worden omdat dit vooropstelt dat de waarden louter afhankelijk zijn van de waarnemer en zijn apparaat, wat zeker niet het geval is.

De basisidee dat deze relatie kernachtig omvat omschreef hij als volgt: ‘Hoe preciezer de positie bepaald is, des te impreciezer is de impuls bekend en omgekeerd.’<sup>18</sup> (Heisenberg 1927:175). Hierbij doelt hij op de boven aangehaalde discrepantie tussen simultane metingen en de precisie waarmee ze geschieden. Hoe exacter men de positie van een deeltje meet, hoe groter de onbepaaldheid in de impuls (momentum) van datzelfde deeltje zal zijn en omgekeerd. Hierbij relateert men doorgaans deze onbepaaldheid aan de informatie die we over dat systeem kunnen bezitten. Concreet wil dit zeggen dat wanneer men een meting verricht op een deeltje met als doel er de exacte positie van te

---

<sup>18</sup> ‘Also je genauer der Ort bestimmt is, desto ungenauer ist der Impuls bekannt und umgekehrt.’

achterhalen, dan zal men hierdoor onvermijdelijk de accuraatheid van de momentumbepaling doen dalen. Deze daling staat in proportie tot de precisie waarmee men de positie bepaald heeft. Deze verhouding is echter omgekeerd evenredig van aard waardoor onmiddellijk duidelijk wordt waarom een simultane meting nooit de exacte waarden van beide variabelen kan onthullen. De precisie waarmee men het ene meet, gaat ten koste van de precisie waarmee men het andere bepaalt, althans in het geval van gelijktijdige metingen. De wiskundige relatie wordt als volgt uitgedrukt:

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

waarbij  $x$  staat voor de kwantitatieve uitdrukking van de onzekerheid in de positiebepaling en  $p$  voor de onzekerheid in de bepaling van momentum. Het product van deze beiden is steeds groter aan  $h$ -streep/2 of  $h/4\pi$  en dit verwijst naar een marge in de werkelijkheid waarover we hoegenaamd niets zinnig kunnen zeggen. Het enige dat ons hierover bekend is, is dat zich hierin de onbepaaldheid afspeelt, dit wil zeggen, ons onvermogen tot een gelijktijdige *en* precieze bepaling. Dit is een rechtstreeks gevolg van de discontinuïteitstheorie. Deze onbepaaldheid sluipt de vergelijking binnen via de interactie met de meetinstrumenten. Dit laatste wordt echter steeds beschreven aan de hand van een klassieke notatie. Deze interactie is verantwoordelijk voor het feit dat de waarden niet exact kunnen bepaald worden en dit wordt door Heisenberg zelf verhelderd in een gedachte-experiment. Laat ons dus overgaan tot de minder abstracte versie van het verhaal en ons wenden naar de concrete aanpak waarmee Heisenberg de uiteindelijke geldigheid van deze relatie wou aantonen. Let hierbij vooral op de wijze waarop de onbepaaldheid tot stand komt.

### 2.3.2 Gammastralen microscoop

De vraag of men aan de hand van een grondige studie van onderzoeksinstrumenten kan komen tot een situatie die deze onbepaaldheidsrelatie zou schenden, is hier aan de orde. Indien we in staat zouden zijn een apparaat te ontwikkelen dat de positie van een elektron kan bepalen zonder het momentum ervan te verstoren en vice versa, dan zou hieruit de ongeldigheid van Heisenberg's redenering volgen. Dit zou betekenen dat we opnieuw met

een klassiek type van beschrijving te doen hebben. Men is er echter tot op heden nog niet in geslaagd een dergelijk instrument te ontwikkelen binnen een kwantummechanische context. Dit is vooral te wijten aan de volgende restricties waaraan metingen altijd gebonden zijn. Voor de positiebepaling van een deeltje, hier dat van een elektron, is het noodzakelijk dat we het verlichten met behulp van elektromagnetische straling (interactie). In navolging van de optische wetten voor resolutie geldt dat hoe kleiner de golflengte van het licht is, des te preciezer de positie kan bepaald worden; dit betekent dat licht van het voor ons zichtbare spectrum niet volstaat 'want de imprecisie in de meting van de positie kan nimmer minder zijn dan de golflengte van het licht'<sup>19</sup> (Heisenberg 1966:47). Maar omdat de golflengte in verband staat met de frequentie, zal overeenkomstig straling van hoge frequenties de energie van de lichtkwanta toenemen. Deze toename in energie van de fotonen zal op het moment van collisione onvermijdelijk leiden tot een proportionele verandering (alternatie in gedrag) in momentum van het elektron<sup>20</sup>. Want het is nodig voor de bepaling van het momentum dat we het elektron benaderen met licht van een lage frequentie, waarbij we onze aandacht richten op de weerkaatsing van de echo. 'If the electron is moving towards us the echo will have a higher frequency than the original signal; if it is moving away, it will have a lower frequency.' (Powers 1982:140) Samengevat: het gebruik van gammastralen, dit is elektromagnetische straling van zeer korte golflengte, stelt ons in staat de positie zeer accuraat te bepalen maar dit komt tegen de prijs van een limitering in de zekerheid van de bepaling van momentum. Wanneer we nu in tegenstelling hiermee het elektron belichten met elektromagnetische straling van lange golflengten, dan zal de wijziging in impuls eerder gering zijn maar hierdoor vervaagt voor ons de zekerheid met betrekking tot de positie. In de onderstaande figuur ziet u een illustratie van Heisenberg's onbepaaldheidsrelatie met betrekking tot de gammastralen microscoop.

---

<sup>19</sup> 'since the inaccuracy of the measurement of the position can never be smaller than the wave length of the light'.

<sup>20</sup> Dit is het welbekende Compton-effect (toename in golflengte) dat stelt dat fotonen van welbepaalde energie in interactie treden met de elektronen in een materiaal. De energie van de fotonen moet derhalve groot zijn dat het de elektronen uit hun baan kan stoten, dwz. groter dan deze laatste zijn bindingsenergie. Het effect is eigenlijk niets anders dan de collisione tussen een foton en een elektron.

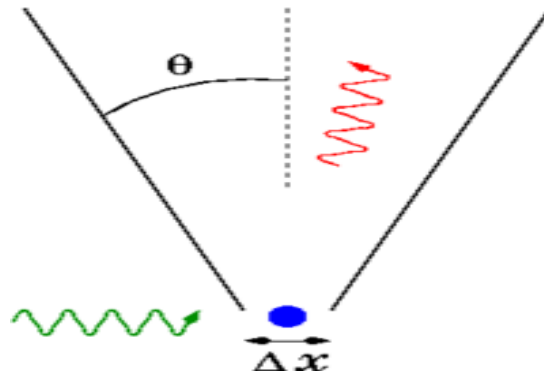


Fig. 10. : het elektron wordt aan de hand van elektromagnetische straling van korte golflengte belicht teneinde diens positie te bepalen. Het gebruik van gamma-stralen zorgt echter voor een discontinue verandering in het momentum van het elektron.

In de voorgaande figuur kunnen we drie componenten onderscheiden die van belang zijn: de gammastraal (groen), het elektron (blauw) en de verspreiding van de gammastraal na collision met het elektron (rood). Deze relatie vereist dat licht gekwantiseerd wordt in fotonen en dat er een correlatie bestaat tussen de frequentie en de energie van het foton (p.27-32). Dit wijst op het feit dat we zowel de golf- als de deeltjesbeschrijving nodig hebben voor een complete omschrijving van de proefopstelling: frequentie verwijst naar een golfbeschrijving, fotonen en energie(kwanta) naar een deeltjesbeschrijving. In het voorbeeld zien we hoe het elektron wordt belicht met gammastralen. Volgens de wetten van de optica kan de positie van het elektron maar bepaald worden binnen een bepaalde marge van precisie. Deze staat in verband met de kracht van de microscoop<sup>21</sup>. De mate van zekerheid baseert zich dus rechtstreeks op de aard van het licht. Dienovereenkomstig kunnen we stellen dat indien elektromagnetische straling een continu bereik zou hebben, dit wil zeggen niet gekwantiseerd is, we in staat zijn de positie van het elektron tot in een oneindige exactheid te bepalen, aangezien we de golflengte evenzo tot in het oneindige kunnen verkleinen. Herinner het verband tussen energie en golflengte enerzijds en tussen golflengte en positiebepaling anderzijds. Maar deze discrete vorm (discontinuïteitstheorie) waaruit alle elektromagnetische energie is opgebouwd zorgt er eveneens voor dat ook het momentum niet met nauwkeurige zekerheid kan worden voorspeld. Doordat we niet in

---

<sup>21</sup>  $\Delta x \sim \frac{\lambda}{\sin \theta}$  ; hier zien we de relatie tussen de precisie in positiebepaling en de gebruikte golflengte of frequentie: dit is een afhankelijkheidsrelatie. De precisie in positiebepaling is afhankelijk van de golflengte.

staat zijn de energie van het licht te minimaliseren totdat het geen invloed meer uitoefent op het onderzoeksobject, zal er steeds een energieoverdracht plaatsvinden 'op het moment van de plaatsbepaling'<sup>22</sup> (Jammer 1974:63). Dit is het moment van collisie, dat resulteert in een discontinue verandering in het momentum van het elektron. De kleinst mogelijke hoeveelheid energie die voorkomt in de natuur, dit wil zeggen: het allerkleinste energiepakketje (in één- of veelvoud van  $h$ ), is zelfs niet in staat het onderzoeksobject onaangeroerd te laten. Dit is opnieuw, maar in een andere vorm, de essentie van de discontinuïteitstheorie. In de figuur wordt deze bovenstaande verklaring beschreven aan de hand van de gammastraal dat op het moment van collisie met het elektron zich verspreid onder een hoek van  $2\theta$ . Deze verspreiding is niet exact te bepalen omwille van de wijziging in momentum ten gevolge van de interactie met het meetinstrument. De simpele weergave van een foton als een kwantum van energie heeft ervoor gezorgd dat de moderne fysica, anders dan verwacht, nog grotere geheimen zou prijsgeven over de werkelijkheid. In de laatste jaren van de 19<sup>e</sup> eeuw dacht men dat de klassieke wetenschap op haar einde liep en dat alles nog slechts neerkwam op het invullen van het zesde cijfer na de komma.<sup>23</sup>

Binnen deze benadering komen de waarden van de gecorreleerde variabele pas tot stand na de meting van de andere variabele eenheid. Dit hebben we eerder het niet-commutatieve aspect genoemd. Het krijgt hier vorm in een conceptuele weergave. Zoals we zullen zien behelst deze voorstelling een uitermate paradoxaal beeld van de werkelijkheid. Dit paradoxale aspect vormt echter een weergave dat in onmiddellijk verband staat met Heisenberg's filosofische beginselen van waaruit hij vertrok en wordt als zodanig niet door iedereen aangehangen. De beschrijving van atomaire processen vanuit zijn onbepaaldheidsrelatie is als zodanig reeds een interpretatie die de vooropgestelde filosofie als uitgangspunt heeft. Laat ons even stilstaan bij deze beginselen om van daaruit de implicaties op zijn interpretatie van deze relatie en de kwantumtheorie te schetsen.

---

<sup>22</sup> 'im Augenblick der Ortsbestimmung'

<sup>23</sup> Een uitspraak van Albert Michelson in een lezing uit 1894.

### 2.3.3 Filosofische beginselen en implicaties

In zijn voorstelling van de onbepaaldheidsrelatie stelde Heisenberg dat de meetprocedure altijd gebonden is aan de aard van de straling die gebruikt wordt tijdens het onderzoek. Dit bepaalde op zijn beurt de mate van precisie waarmee men de andere, gecorreleerde variabele kan omschrijven. Het is in dit verband dat men het niet-commutatieve aspect van de matrix moet begrijpen: de volgorde waarin men de positie en momentum bepaalt is bepalend voor de waarden die men zal verkrijgen. Vandaar dat het product  $(p \times q)$  een andere uitkomst zal geven dan  $(q \times p)$ . Opvallend is hier de verwijzing naar het operationaliseren van termen die voorkomen in zijn onbepaaldheidsrelatie. In zijn werkstuk uit 1927, waar hij deze relatie voor het eerst introduceerde, opent hij zelfzeker met de stelling dat 'indien men wil verhelderen wat bedoeld wordt met de bepaling van 'de positie van een object', voor bijvoorbeeld een elektron, dan moet men een experiment kunnen beschrijven waardoor deze positie van het elektron kan gemeten worden; zoniet heeft deze term geen betekenis' (Heisenberg 1927:172). Heisenberg geeft hier blijk van een zeer positivistisch ingestelde houding ten aanzien van theorievorming. Enkel termen die men kan verifiëren aan de hand van experimenten of een mathematische beschrijving verdienen een plaats binnen zijn denkschema. Vandaar dat hij Bohr's atoommodel zo verafschuwde want wat stelden deze elektronenbanen voor? Het concept van deze zogenaamde banen was een overbodig begrip aangezien het geen plaats had binnen Heisenberg's matrixmechanica. Enkel de voorstelling van kwantumtoestanden in numerieke gegevens werden door hem gehanteerd. Van hieruit kon het 'pad van een elektron' op geen enkele wijze worden beschreven. Nu zou het echter verkeerd zijn hem bij de schare van operationalisten te plaatsen omdat dit in grote mate afbreuk zou doen aan zijn andere houding die hij eveneens deelt met Einstein, namelijk dat de theorie de observatie bepaald. Ook volgens Heisenberg zijn observaties theorie-geladen. Volgens deze voorstelling zijn bepaalde observaties die men doet afhankelijk van de theorie waarmee men naar de fenomenen kijkt. In sommige mate bepaalt zelfs het hele paradigma van een samenleving de wijze van omgaan met de waarnemingen. Hoewel dit laatste een

uitdrukking is van een uitermate simplistische voorstelling kan men niet ontkennen dat zich hierin tevens iets fundamenteel afspeelt.

### 2.3.3.1 Theoriegeladenheid van de waarneming

Deze laatstgenoemde stelling resulteerde uit een gesprek met Einstein<sup>24</sup> en lag mee aan de basis van waaruit Heisenberg zijn interpretatie van de kwantumtheorie formuleerde. De uitspraak van Einstein: ‘de theorie beslist vooreerst dat wat wij erover kunnen waarnemen’ (Heisenberg 1971:63)<sup>25</sup> betekende voor hem dat een revisie van het probleem noodzakelijk was. In de context van hun zoektocht naar de zogezegde elektronenbanen van Bohr kwamen Heisenberg, Schrödinger en Bohr zelf steeds op dezelfde impasse uit: enerzijds is de kwantummechanica een formalisme dat een consistent en mathematisch raamwerk vormt dat de fenomenen zeer accuraat kan voorspellen (predictie). Hierdoor kan men het niet zomaar verwerpen wanneer er zich conceptuele moeilijkheden voordoen. Anderzijds bood ditzelfde formalisme geen verklaring voor de problematische beschrijving van het pad dat elektronen in hun ‘baan’ rondom de kern volgen, zoals voorgesteld door Bohr. Er bestond geen klassieke beschrijving van waaruit men de configuratie van de elektronen rond de kern inzichtelijk kon maken. Het is op dit punt dat Heisenberg een voorstel deed dat zal leiden tot de interpretatie van de fenomenen in termen van *onbepaaldheid*. Het probleem van deze elektronenbanen lag verborgen in het onvermogen van zowel de matrix- als de golfmechanica een analyse te bieden van waaruit men deze banen kan deduceren. In een historische analyse van de interpretatie van de kwantummechanica omschrijft Max Jammer deze impasse als volgt:

“In matrix mechanics the concept of ‘path’ or ‘orbit’ of an electron is not immediately defined, whereas in wave mechanics any wave packet would soon disperse in its motion to an extent incompatible with the lateral dimensions of such a ‘path’. [...] On the one hand he found the mathematical formalism of quantum mechanics too successful to be revoked, and on the other hand he observed the ‘path’ of the particle [...]” (Jammer 1974:57)

---

<sup>24</sup> Heisenberg, W., ‘Die Quantenmechanik und ein Gespräch mit Einstein’ in *Der Teil und das Ganze*, Munich, Piper, 1969, pp. 90-100

<sup>25</sup> ‘erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann’

In connectie met zijn opvatting over de rol van de theorie bij de verklaring van de waargenomen fenomenen betekende dit dat Heisenberg, wiens vertrouwen in Einsteins intellectuele raadgeving ontzettend groot moest zijn geweest, afstand deed van wat het betekent dergelijke elektronenbanen te beschrijven in termen van klassieke noties. In deze interpretatie kwam men tot de vaststelling dat de gelijktijdige bepaling van canonisch geconjugeerde variabelen<sup>26</sup> onvermijdelijk de onbepaaldheidsrelatie impliceert. Dit resulteert steeds in een onbepaaldheid van de variabelen, met als gevolg dat strikt genomen de theorie niet instaat voor een verklaring van de elektronenbanen. Want dit laatstgenoemde vereist dat men *gelijktijdig* over de *exacte* waarden beschikt die noodzakelijk zijn voor de beschrijving van de banen, dit wil zeggen die van positie *en* momentum. Zoniet heeft deze beschrijving geen zin en leidt ze nergens toe, althans voor wat een klassieke beschrijving betreft. Dit is het punt waarop de theorie de observaties niet ondersteunt, integendeel. Vandaar dat Heisenberg's interpretatie van de onbepaaldheidsrelatie de vreemde consequenties inhoudt die door hem, volgens sommigen onterecht, worden geëxtrapoleerd naar de relatie tussen de fenomenen en de beschrijving ervan. Want:

“For if it can be shown that the theory denies the strict observability of the trajectory of the particle (position and momentum) and instead regards the ‘observed’ phenomenon [ d.i. het traject van het electron zoals het wordt waargenomen] [...] as only a discrete sequence of imprecisely defined positions, [...] a consistent connection between the mathematical formalism and the observational experience may be established.” (Jammer 1974:57)

### 2.3.3.2 Operationalisme

Het principe van operationaliteit duidt aan dat Heisenberg hiermee reeds een bepaalde interpretatieve weg was ingeslagen. Een gevolg van deze visie volgens Heisenberg is dat de klassieke noties inadequaet zijn voor een volledige beschrijving van atomaire

---

<sup>26</sup> Canonic conjugate variables: dit zijn de variabelenparen tijd-energie, positie-momentum, ... waarop de onbepaaldheidsrelatie van toepassing is.



processen. Binnen de klassieke wetenschap geldt eveneens dat men metingen kan verrichten waarbij rekening dient te worden gehouden met een bepaalde maat van onbepaaldheid maar deze kan gereduceerd worden, zover dit praktisch mogelijk is. Deze reductie van de onzekerheid houdt verband met de precisie waarmee men zijn onderzoeksobject benadert. Men kan bij wijze van spreken *ad infinitum* blijven doorgaan na de komma, zoals men dit bij de bepaling van het getal  $\pi$  beoogt. Maar dit heeft niets te maken met de onbepaaldheid zoals ze in kwantumsystemen voorkomt. Waar de onzekerheid in het klassieke domein oprijst ten gevolge van de onnauwkeurigheid van de meetinstrumenten en betrekking heeft op onze gebrekkige kennis omtrent de fysische processen, is ze binnen de kwantummechanica onderdeel van een beschrijving van de natuur zelf. Hieruit besloot Heisenberg dat de onbepaaldheid in kwantumrelaties een limiet aangeeft voor de toepasbaarheid van klassieke noties, zoals positie en momentum, op microscopische fenomenen. Als gevolg van zijn positivistische visie betekende dit dat indien de termen niet, zoals in de klassieke wetenschap, met een enorme precisie kunnen bepaald worden, het weinig zin maakt ze toe te passen in een klassieke beschrijving. Het is vanuit deze context dat we zijn bezorgdheid betreffende de elektronenbanen dienen te begrijpen. Maar er is meer. In onze klassieke conceptie van de werkelijkheid verwachten we dat een elektron bepaald wordt door zowel een exacte positie als een strikt te definiëren momentum, en dit gelijktijdig. In de kwantummechanische benadering van Heisenberg gaat dit beeld echter verloren. In zijn beschrijving beschikken deze paren van geconjugeerde variabelen nooit gelijktijdig over exact te bepalen waarden. Hier wordt het moeilijk aan te duiden of hij hier op de epistemologische relatie tussen het formalisme en de fenomenen doelt of op de ontologische regio. Deze visie is een gevolg van zijn houding ten aanzien van theorie- en wetenschapsvorming.

Men stelde terecht de vraag of de onbepaaldheidsrelatie aan de basis lag van de probabilistische verschijnselen die voorkomen binnen kwantumsystemen of dat ze eerder het gevolg ervan was. Maar laat ons keren naar de visie van Einstein op de relatie van Heisenberg en wat het uiteindelijke resultaat ons over een beschrijving van de

subatomaire natuur leert. Hier zullen we tevens Einstein opvoeren als de verdediger van een klassieke houding.

## 2.4 Einstein en de foton-doos

Einstein was nooit erg opgezet met het hele kwantumgebeuren. Hij keurde het nooit helemaal af maar ging uitermate kritisch en doordacht tekeer tegen denkbeelden die de kwantumtheorie voorstelden als de laatste stap in een wetenschappelijke ontwikkeling. Het feit dat men meer dan heuristische waarde zou toekennen aan de probabilistische wetten van het formalisme betekent voor Einstein een stap té ver gaan. Heel wat verschijnselen kunnen verklaard worden aan de hand van dit formalisme maar de beschrijving in termen van probabilliteit is slechts van voorlopige aard en is volkomen te wijten aan ons gebrek aan breder besef van de dingen. ‘God dobbelt niet’<sup>27</sup>, de bekende uitspraak van Einstein heeft betrekking op de scheiding tussen ontologie en epistemologie, op de statistische waarden in de kwantummechanische vergelijkingen. Op een dieper niveau bestaat de realiteit hoegenaamd niet uit waarschijnlijkheden, het is enkel doorheen onze beperkte kennisname ervan dat de dingen zo verschijnen. Het is vanuit deze denktrant dat hij zijn kritische positie ten aanzien van de relatie zal uiten. Met het besef van onze zijde dat zich hierin niet louter een controverser voordoet die betrekking heeft op het mathematische karakter maar dat hier een exhaustief verankerd beeld, een eeuwenoud vraagstuk op het spel staat: toeval en determinisme, maar ditmaal in strikt theoretisch-fysische zin! De wijze waarop hij de ongeldigheid van de relatie trachtte aan te tonen wordt opnieuw weergegeven door een gedachte-experiment. Bekijk de proefopstelling uit de illustratie. Let wel dat het hier om een conceptuele voorstelling gaat die in werkelijkheid niet werd uitgevoerd door de betrokkenen. Dit hoeft echter geen belemmering te zijn voor de geldigheid van het experiment omdat het *in principe* kan worden aangetoond, iets wat niet vreemd was voor een wetenschapper als Einstein.

---

<sup>27</sup> ‘Gott würfelt nicht’

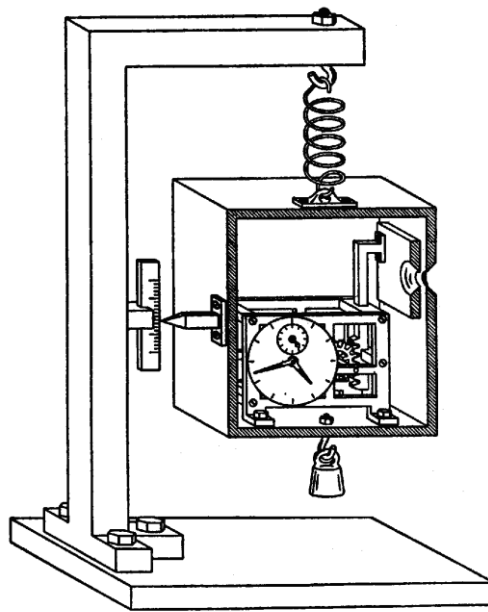


Fig. 11. : In de figuur staat een doos afgebeeld waarin zich een klok bevindt, een foton-emissor en een klep dat een opening in de doos vormt. Deze opening gaat slechts open om het foton uit de emissor buiten te laten. Verder hangt de doos aan een veer en wordt de relatieve hoogte van de doos tov. de aarde gemeten, evenals het gewicht ervan.

De redenering van Einstein luidt als volgt: de onbepaaldheid van canonisch geconjugeerde variabelen is een absurde consequentie die terzijde geschoven dient te worden omdat het beeld van de werkelijkheid dat de onbepaaldheidsrelatie oproept onlogisch en probabilistisch van aard is. Dit is iets wat men het minst zou verwachten in een fysische benadering van de werkelijkheid. De wetenschap wil repetitie met steeds dezelfde resultaten waarbij ze kan vertrouwen op het universele karakter van haar wetmatigheden. Vandaar dat een nauwgezet onderzoek zou moeten uitwijzen dat twee gecorreleerde variabelen wel degelijk simultaan gemeten kunnen worden met een precisie gelijk aan die van in een klassieke beschrijving. De vraag die men hier echter kan opwerpen is of de notie van probabiliteit echt zó ongeschikt is om wetenschap op te baseren als Einstein wel meent.

In deze hypothetische proefopstelling wordt ervan uitgegaan dat de tijd en energie<sup>28</sup> van een foton, in tegenstelling tot wat Heisenberg's relatie doet suggereren, gelijktijdig met grote nauwkeurigheid bepaald kunnen worden. Dit wordt verkregen doordat men een foton-emissor in een doos plaatst die wordt opgehangen aan een veer, waarbij de relatieve afstand van de doos tot de aarde in rekening wordt gebracht. (Dit laatste is van belang voor de subtiele repliek die Bohr op Einsteins kritiek zal leveren.) De foton-emissor zal op een vooraf bepaald moment één foton uitzenden waardoor de klep van de doos zal openen om het foton door te voeren, waarna het zich opnieuw sluit. Hierin toont zich volgens Einstein een schending van de onbepaaldheidsrelatie omdat we perfect in staat zijn het tijdstip waarop het foton de doos verlaat te bepalen, evenals de energie van het foton. Doordat we op een vooraf bepaald tijdstip de klep openen weten we op welke tijd het foton gemeten wordt. Voor de energiebepaling doet Einstein beroep op zijn speciale relativiteitstheorie. De foton-emissor zal vooraf gewogen worden, vervolgens zendt het één foton uit en naderhand zal het opnieuw gewogen worden. Welnu, volgens zijn theorie kunnen we aan de hand van het verschil in massa, doordat de foton-emissor een relatief kleine hoeveelheid massa verloren heeft bij het wegvuren van het foton, de waarde van de energie exact bepalen overeenkomstig de vergelijking uit Einsteins speciale relativiteitstheorie<sup>29</sup>. En aangezien het verschil in massa optreedt op een vooraf bepaald moment, doordat de foton-emissor en de klep gesynchroniseerd zijn en men dus beschikt over het juiste tijdstip waarop de energie gemeten wordt, betekent dit dat de onbepaaldheidsrelatie wel moet geschonden zijn aangezien we simultaan exacte metingen hebben verricht op de canonisch geconjugeerde variabelen. Dit was volgens Einstein de doorslag dat een objectieve beschrijving van de werkelijkheid veilig stelt. Maar ditmaal had Einstein ongelijk. Toen Bohr erover had gehoord dat Einstein door middel van een gedachte-experiment de onbepaaldheidsrelatie wou weerleggen, en daarmee de ganse kwantumtheorie op haar geldigheid poogde te testen, begon voor hen een lange weg van

---

<sup>28</sup> Dit is een ander paar van geconjugeerde variabelen waarop de onbepaaldheidsrelatie betrekking heeft, zoals weergegeven in de volgende wiskundige relatie:  $\Delta E \Delta t \geq h/4\pi$ .

<sup>29</sup>  $E = mc^2$  drukt de vergelijking uit tussen energie en massa. In het voorbeeld kunnen we het verschil in massa eenvoudig omzetten in energie van het foton, gezien de snelheid van het licht een bekende constante is.

discussie die tot aan Einsteins dood voortwoedde. Algemeen beschouwd beziet men Bohr nog steeds als de overwinnaar van hen beide.

In de voorgaande proefopstelling wordt duidelijk hoe Einstein met behulp van zijn eigen theorie de ongeldigheid van de relatie poogde aan te tonen. Bohr zal door middel van de algemene relativiteitstheorie het tegengestelde beweren en juist aan de hand hiervan de geldigheid van de redenering aantonen. Het is namelijk zo, en dit is wat Einstein vergat in te brengen in zijn gedachtegang, dat op het moment van emissie er een kleine terugslag optreedt, ten gevolge van de verandering in massa. Dit resulteert in een relatieve afwijking van de initiële positie van de doos waardoor deze een verandering ondergaat in afstand tot de aarde. De snelheid waarmee de klok tikt is afhankelijk van de hoogte in het gravitationele veld van de aarde, overeenkomstig de algemene relativiteitstheorie. De bepaling van het momentum zal onvermijdelijk een onzekerheid in de bepaling van de positie teweegbrengen. Dit laatste is uiterst relevant aangezien deze positie invloed uitoefent op het tijdstip waarop de interactie plaatsheeft. Indien de positie- en momentumbevestiging onderhevig zijn aan de onbepaaldheidsrelatie, dan ook energie en tijd. Een meer gedetailleerde beschrijving van dit probleem vinden we terug in een lezing<sup>30</sup> die Bohr gaf de dag nadat hij Einsteins kritiek had gehoord, waarbij de act van het weegproces een cruciale rol speelt. Om zijn punt te verduidelijken vertrok hij van de gedachte dat de doos wordt opgehangen aan een veer zoals geïllustreerd in figuur 11. Aan de zijde van de doos bevindt zich eveneens een indicator dat de positie aanduidt op een meter, links van de doos. Bohr redeneerde als volgt:

“The weighing of the box may thus be performed with any given accuracy  $\Delta m$  by adjusting the balance to its zero position by means of suitable loads. The essential point is now that any determination of this position with a given accuracy  $\Delta q$  will involve a minimum latitude  $\Delta p$  in the control of the momentum of the box connected with  $\Delta q$  by the relation  $[\Delta q \Delta p \approx h]$ . This latitude must obviously again be smaller than the total impulse which, during the whole interval

---

<sup>30</sup> Een lezing gegeven op de zesde Solvay conventie in Brussel. Dit was een bijeenkomst van allerhande fysici waarbij oorspronkelijk de facetten van de klassieke fysica zouden besproken worden maar dit werd overschaduwd door de zoektocht naar de fundamenteën van de nieuwe wetenschap.

T of the *balancing procedure* [mijn cursivering], can be given by the gravitational field to a body with a mass  $\Delta m$  [...]. The greater the accuracy of the reading  $q$  of the pointer, the longer must be the balancing interval T, if a given accuracy  $\Delta m$  of the weighing of the box with its content shall be obtained. Now, according to general relativity, a clock, when displaced in the direction of the gravitational force by an amount of  $\Delta q$ , will change its rate in such a way that its reading in the course of a time interval T will differ by an amount  $\Delta T$  [...] we see, therefore, that after the weighing procedure there will in our knowledge of the adjustment of the clock be a latitude [...]. Together with the formula  $E=mc^2$  this relation [de onzekerheid in de afstelling van de klok] again leads to  $\Delta E \Delta t > h$ , in accordance with the indeterminacy principle. Consequently, a use of the apparatus as a means of accurately measuring the energy of the photon will prevent us from controlling the moment of its escape.” (Bohr 1949:226-228)

Hij was erin geslaagd Einsteins argument de kop in te drukken door een verwijzing naar de ideeën van relativiteit. Hiermee toonde hij eveneens aan dat de terugkeer naar een klassieke beschrijving van de werkelijkheid, wat Einstein tot aan zijn dood zal pogen te bewerkstelligen, onmogelijk wordt in een beschrijving van het subatomaire niveau van de werkelijkheid. De probabilistische beschrijving, de onzekerheid in de bepaling van variabelen en eveneens onze onbepaalde kennis van deze variabelen *op zich*, voorafgaand aan de meetprocedure, blijken inherent te zijn aan onze beschrijving van de natuur. Dit voor wat Bohr, Heisenberg en de andere voorvechters van de kwantumtheorie betreft althans. Bohr heeft Einstein nooit kunnen overtuigen tot een gelijkaardige mening ten aanzien van de theorie want ondanks het feit dat Einstein de kritiek van Bohr aanvaardde als tegenbewijs voor zijn stelling, had dit geen invloed op zijn houding ten aanzien van de kwantummechanica maar enkel op de wijze waarop hij haar bekritiseerde. ‘Not the inconsistency but rather the incompleteness of Bohr’s approach became the object of Einsteins criticisms.’ (Jammer 1974:156) Hoewel Einstein nooit de geldigheid ervan in vraag stelde, bleef hij er steeds van overtuigd dat dit niet de laatste stap was op de nieuwe weg die voor het eerst werd ingeslagen door Planck.

### 2.4.1 De plaats en betekenis van Einsteins kritiek

De houding die hier door Einstein wordt verdedigd is geen alleenstaand geval van kritiek. In het algemeen kan men het merendeel van kritische posities ten aanzien van de kwantumtheorie met deze houding vergelijken, waarbij doorgaans niet het geldigheidsaspect wordt aangevochten maar eerder het vermeende complete karakter van deze ontwikkeling. Laat ons even stilstaan bij wat dit toevoegt aan het algemene debat rond het kwantumthema. Dit laatste zal voornamelijk gericht zijn op wat er in deze laatste theorie naar voren wordt gebracht en niet strookt met het eerdere type van verklaring, de klassieke benadering. Hier zullen we kort enkele karakteristieke eigenschappen van de traditionele wetenschap bespreken die in Einsteins houding doorklinken en waarvoor hij pleitte dat ze eveneens deel zouden uitmaken van dit nieuwe type wetenschap.

Einstein was een wetenschapper van klassieke allure. Waarom hij niet éénduidig de kwantummechanica verwerpt houdt verband met wat het betekent wetenschap te ontwikkelen en te aanvaarden. Zowel in het oude als in het nieuwe type staan predictie, reproductie en nomologisch verband centraal. In het eerste deel werd uitvoerig besproken hoe het atoomconcept en  $\psi$ -model geleidelijk aan algemene aanvaarding verwierf. Het nomologische verband dat zijn uitdrukking vindt bij Maxwell en de kwantitatieve beschrijvingen van Einstein hebben bijgedragen tot het predictieve karakter van deze hypothesen. Hierdoor werd eveneens de mogelijkheid tot reproductie bewerkstelligd. Maar vanwaar al deze ophef van Einstein dan? Is ook de kwantumtheorie op deze wijze niet deterministisch en zodoende geldig als wetenschappelijke verklaring? Dit zal men niet gauw ontkennen. Maar laat ons even dieper ingaan op deze kwestie van beschrijven. Hierdoor wordt eveneens de overstap naar het derde deel, waar een typisch kwantummechanische beschrijving ter discussie staat, duidelijk en logisch aanvaardbaar.

Binnen de klassieke natuurkunde geldt de gedachte dat het universum in zijn geheel kan worden opgevat als één grote machine die een wetmatig verloop kent. Dit verloop kan worden uitgedrukt in deterministische wetten. Dit laatste impliceert causaliteit: elk gevolg

wordt voorafgegaan door een oorzaak dat een verklaring geeft aan dat gevolg. Binnen deze context betekent het deterministische verloop van de verschijnselen dat we praktisch in staat moeten zijn om uit de kennis van de oorzaken het pad te deduceren dat leidt tot het gevolg en vice versa. Dit pad (de weg tussen oorzaak en gevolg) moet kunnen omschreven worden op zodanige wijze dat ook de onderdelen (eigenschappen) en de tussenstappen (continue patroon van verandering) met grote nauwkeurigheid kunnen beschreven worden, en dit voor gelijk welke eigenschap of tussenstap. Karakteristiek voor de klassieke natuurkunde is de willekeurige nauwkeurigheid waarmee men deze eigenschappen of pad van een systeem kan bepalen. Deze precisie kan tot in willekeurige mate gerealiseerd worden, en dit voor zover het maar praktisch mogelijk is. Dit laatste wil zeggen: voor zover onze meetapparatuur en ons menselijk kennisvermogen het toelaat. De onnauwkeurigheid of onvolledigheid van de beschrijving is dan louter het gevolg van de wetenschappelijke relatie tussen het onderzoeksobject en de kennisweergave ervan en vormt als zodanig geen intrinsieke eigenschap van de natuur zelf, zoals eerder wel beschreven werd. Dit laatste vormt integendeel wel één van de beginselen van de kwantumtheorie: probabiliteit of onbepaaldheid<sup>31</sup>. Het is op dit punt dat we de kritiek van Einstein moeten situeren.

Volgens Einstein getuigt de interpretatie van de kwantumverschijnselen van een incompleet karakter doordat het geen rekenschap geeft van de voorgenoemde factoren in haar beschrijving van atomaire processen. Einstein was een wetenschappelijke realist<sup>32</sup> voor wie beschrijvingen een verklaring diende te bieden aan de termen en interacties die in het formalisme voorkomen. Ook Heisenberg deelde deze houding maar het verschil tussen hen laat zich vertalen vanuit de houding die ze koesterden tegenover de theorie.

---

<sup>31</sup> De noties probabiliteit, onbepaaldheid en onzekerheid liggen zeer dicht bij elkaar. Het subtiele verschil tussen de drie vergt echter een uitwijding waarvoor hier nauwelijks plaats is. Op pagina 75 verwijs ik kort naar het verschil tussen twee van deze termen. Binnen deze uiteenzetting mag men echter 'onbepaaldheid' steeds in relatie tot Heisenberg's onbepaaldheidsrelatie zien en 'probabiliteit' in relatie met Schrödingers golfmechanica.

<sup>32</sup> Wetenschappelijk realisme gaat ervan uit dat het bestaan van de werkelijkheid onafhankelijk is van het proces van kennisverwerving. Tevens gaat het ervan uit dat concrete natuurwetenschappelijke uitspraken of theorieën betrokken zijn op deze werkelijkheid.



De onbepaaldheidsrelatie toont ons deze ambiguïteit: de theorie staat niet in voor een verklaring van de elektronenbaan omdat positie en momentum niet gelijktijdig kunnen bepaald worden. In een klassieke benadering is dit noodzakelijk; herinner de voorgenoemde omschrijving van klassieke wetenschap. Welnu, daar waar Heisenberg stelt dat dit wijst op een limiet van de toepasbaarheid van klassieke noties op atomaire processen geeft Einstein te kennen dat een dergelijke verklaring de ware oorzaak van de onbepaaldheid verhuult. Het is niet de inadequaatheid van klassieke noties maar de onkunde van een kwantummechanische verklaring in haar beschrijving van deze processen, die verantwoordelijk is voor het probabilistische en onbepaalde karakter. Met andere woorden: Einstein kon de wijze waarop de natuur werd voorgesteld binnen deze theorie niet aanvaarden. Tenminste niet als laatste stap in een fysische theorie. Want waar vinden we de objectiviteit terug indien zelfs de eigenschappen slechts tot op zekere hoogte vanuit de theorie kunnen bepaald worden. Indien een theorie strikt genomen niet instaat voor een (complete en precieze) beschrijving wil dit zeggen dat ze ófwel onvolledig ófwel onjuist is. Voor Heisenberg was het achterliggende formalisme moeilijk te verwerpen omwille van het predictieve- en mathematisch logische karakter. Vandaar dat hij argumenteerde voor de juistheid ervan en eraan vasthield. Wel diende hij hiervoor zijn klassieke verklaringswijze op te geven en dit was het punt waarop Einstein afhaakte. De onbepaaldheidsrelatie, evenals het probabilistische fundament van Born werden door Einstein toegeschreven aan de tijd: zoals de Newtoniaanse mechanica nog geen 300 jaar later gecorrigeerd wordt door een relativistische beschrijving van de ruimte-tijd, zo zal ook de kwantumtheorie gecorrigeerd dienen te worden na een lange traditie van vorsers en kwantumfysici, aldus Einstein. Sommige ontdekkingen vergen tijd en tussenstadia die niet noodzakelijk verkeerd zijn maar als zodanig niet het meest fundamentele aspect van een theorie vormen. Men kan echter terecht de vraag stellen of Einstein niet wat te ver gaat. Is deze notie van probabiliteit wel zo ongeschikt om een beschrijving van atomaire processen op te baseren? Wanneer we in het volgende deel deze notie bespreken zal duidelijk worden waarom dit niet zo is; omdat ook de kwantumtheorie in staat is nauwkeurige voorspellingen te doen, ondanks de probabilistisch onbepaalde aard ervan.

In hoeverre we hiermee een objectieve omschrijving van de werkelijkheid benaderen laat ik in het midden; dit is mede afhankelijk van wat men hieronder verstaat. Maar doorgaans verwacht men van een theorie die nauwkeurige voorspellingen kan doen dat ze evenzeer vrij nauwkeurig de werkelijkheid kan beschrijven. De correctheid van deze houding wordt eveneens in het midden gelaten.

### **3. De Kopenhagen-interpretatie en de complementariteitstheorie: een typisch kwantummechanische beschrijving**

#### **3.0 Inleiding**

Nadat Heisenberg in 1927 zijn originele artikel publiceerde over de onbepaaldheidsrelatie kwam Bohr niet veel later met een alternatieve interpretatie die mede het gevolg was van zijn reactie op dit artikel. Deze repliek hield geen verband met de validiteit van de relatie, noch met de conclusies die Heisenberg eruit trok 'maar met de conceptuele gronden waarop ze gebaseerd was' (Jammer 1974:65). Dit zal later tot het begrip 'complementariteit' leiden, een belangrijke notie uit de Kopenhagense interpretatie. In dit laatste deel bekijken we hoe deze interpretatie omgaat met een beschrijving van atomaire processen en in welke zin deze weergave verschilt van een klassieke beschrijving. De onbepaaldheidsrelatie zal, in combinatie met de nuancerings van Bohr, aanleiding geven tot de meest omvattende beschrijving van de theorie uit die tijd. Hieruit zal eveneens blijken dat een klassieke benadering van atomaire processen inadequaat is voor de volledige beschrijving van de fenomenen. Dit laatste wordt slechts bereikt wanneer men concepten als discontinuïteit en probabiliteit in rekening brengt, wat voor een klassieke benadering niet erg gewoon was. Hier wordt eveneens de eigenaardigheid van de epistemologische factor duidelijk: een beschrijving van atomaire processen zoals Bohr dit beoogt vertrekt noodzakelijk van het dualiteitsprincipe, zoals beschreven door de Broglie. Dit is, zoals we weldra zullen opmerken, nog een stap voorbij de interpretatie van Heisenberg, want Bohr zal er, samen met de discontinuïteitstheorie, het conceptuele fundament van de theorie van maken. Van hieruit weet hij eveneens de andere fundamentele factoren van een dergelijke beschrijving te plaatsen zodat ze vloeiend de complementariteitstheorie onderbouwen en op deze wijze de hoeksteen van de Kopenhagen-interpretatie vormen.

### 3.1 De Kopenhagen-interpretatie

De interpretatie van de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg werd door Bohr niet zonder enige nuance geaccepteerd. Een verwijzing naar de grens waarmee we klassieke concepten kunnen toepassen in een beschrijving van kwantummechanische processen vormt slechts een gering onderdeel van de conceptuele beginselen van de relatie. Volgens Bohr was de reductie van definieerbaarheid of bepaling van de variabelen tot meetbaarheid ongeoorloofd: ‘de mate waarin men de positie van een elektron kan meten bevestigt weliswaar de limiet waarmee men de variabelen kan definiëren maar gaat er niet noodzakelijk logisch aan vooraf’ (Jammer 1974:69). Voor Heisenberg was het gammastralen microscoop experiment voornamelijk een heuristisch apparaat. Als zodanig niet de kern van de onbepaaldheidsrelatie. Deze wordt gevormd door het mathematisch formalisme, weergegeven in de matrixmechanica. Maar voor Bohr volstond mathematica alleen niet ter verklaring van de fysische waarheid. Wiskundige vergelijkingen en meetbare grootheden zijn behulpzaam maar niet het finale argument voor algemene aanvaarding. Bohr was steeds uit op een intuïtieve verklaring, gekenmerkt door inzichtelijkheid. Hij zal opteren voor een dualistische beschrijving. Dus de vraag naar de plaats van de relatie alsook de gronden van waaruit men deze kan voorstellen is niet zonder meer éénduidig te verklaren.

#### 3.1.1 Heisenberg en Bohr over de betekenis van de onbepaaldheidsrelatie

‘In physics everything depends upon the insight with which the ideas are handled before they reach the mathematical stage’ (Eddington 1949:55). Dit doet onvermijdelijk de indruk ontstaan dat er voorafgaandelijk aan wetenschappelijke theorieën reeds éénduidigheid bestaat omtrent het schema van waaruit men de verschijnselen kan verklaren. Dit was echter niet het geval bij de introductie van de relativiteitstheorie en al zeker niet voor wat betreft de kwantumtheorie. Hier is eerder het omgekeerde het geval: het mathematische formalisme werd ontdekt vooraleer er sprake was van een bepaald uniform idee of een gepast denkkader waarbinnen dit gesitueerd kon worden. Het

klassieke beeld van de werkelijkheid, zoals beschreven door noties als positie en momentum, bleek niet efficiënt te zijn voor de beschrijving van wat zich in de mathematica voordeed. Immers, in de klassieke beschrijving werd verondersteld dat zowel positie als momentum gelijktijdig over bepaalde waarden beschikten maar dat werd echter niet ondersteund door het achterliggende formalisme. Dit was uiteraard geen aanzet voor een verwerping van het gehele opzet maar het dreef Heisenberg wel tot de conclusie dat het voor de beschrijving van microscopische processen noodzakelijk was dat we de klassieke noties tot op zekere hoogte achterwege dienen te laten. Hij stemde met Bohr in dat het inderdaad noodzakelijk is dat een interpretatie steeds vertrekt van klassieke concepten. De omschrijving van de experimentele opstelling gebeurt immers noodzakelijk in klassieke bewoording. Dit geldt ook zo voor het meetinstrument en de interactie met het onderzoeksobject. Een kwantummechanische beschrijving vertrekt met andere woorden van de scheiding tussen onderzoeksobject en meetinstrumenten (eigenlijk: de rest van het universum), waarbij dit laatste wordt beschreven aan de hand van klassieke noties daar waar dit voor het eerste inadequaat blijkt te zijn. Dit is een opmerkelijke bevinding want hieruit leidt men af dat onbepaaldheid en waarschijnlijkheid oprijzen wanneer een kwantumsysteem in contact treedt met het klassieke domein: zoals de meetapparatuur met het onderzoeksobject. Deze scheidingslijn, al dan niet reëel, toont zich hier dus primair als filosofisch belangrijk. De behandeling van een ‘zogenaamde’ scheidingslijn tussen het klassieke- en het kwantumniveau wordt hier door Bohr voor het eerst aangeraakt vanuit Heisenberg’s analyse van een meetinstrument en de interactie met het onderzoeksobject. Maar daar waar voor Heisenberg de discontinuïteit (discreetheid van de kwanta) in *ófwel* de deeltjesbeschrijving *ófwel* de golfbeschrijving, onafhankelijk van elkaar, voldoende was voor een optimale omschrijving wees zijn interpretatie af van die van Bohr<sup>33</sup>. Volgens deze laatste was het strikt noodzakelijk dat beide vormen, hoewel verschillend in benaderingswijzen, enkel *gelijktijdig* een complementair beeld van de situatie tonen.

---

<sup>33</sup> Deze gedachte vinden we terug in Bohr, N., ‘Atomic theory and the description of nature’, Cambridge, Cambridge University Press, 1934, pp. 15-16

Waarover de discussie tussen Bohr en Heisenberg ging laat zich vertalen uit het voorgaande: niet de geldigheid van de onbepaaldheidsrelatie, noch het mathematisch formalisme maar de betekenis en de filosofisch-conceptuele fundamenteën van waaruit men ze dient te begrijpen vormt het punt van onenigheid tussen de twee. In het tweede deel werd ruim aandacht besteed aan de visie van Heisenberg omtrent de relatie; de discontinuïteit in het algemeen en de inadequaatheid van klassieke noties, dit wil zeggen het beperkte bereik, speelde een cruciale rol in de betekenis ervan. Voor Bohr echter lag de kern van de zaak ergens anders: ‘de onbepaaldheidsrelatie geeft aan dat niet de klassieke concepten maar de *klassieke conceptie van verklaring* [mijn cursivering] moet worden herzien’ (Jammer 1974:97). Bohr drukt deze houding als volgt uit: ‘we moeten in het algemeen voorbereid zijn op een acceptatie van het feit dat een complete verheldering van één en hetzelfde object verschillende gezichtspunten/invallshoeken vereist die een unieke [in de zin van unitair] beschrijving uitdaagt<sup>34</sup> (Bohr 1934:96-97). Hiermee doelt hij ongetwijfeld op het eerder besproken dualisme van materie. Een verdere verklaring van Bohr’s aandrang voor de golf-deeltje dualiteit die de overstap naar het concept van complementariteit mogelijk maakt vinden we terug in het volgende citaat:

“It was the breakdown of the classical ideal of explanation Bohr had in mind when, referring to the wave-particle duality of light, he rejected Heisenberg’s approach. The fact that, on the one hand, Heisenberg, was able to derive his indeterminacy formulae as a deduction from the formalism of quantum mechanics and that, on the other hand, an independent demonstration of this formulae could be given through the analysis of an imaginary experimental setup *if combined with a consideration of the duality aspect* [mijn cursivering], was for Bohr, as we have mentioned already, a proof of the consistency of his complementarity interpretation of microphysics with the mathematical formulation of quantum mechanics.” (Jammer 1974:98)

---

<sup>34</sup> ‘We must, in general, be prepared to accept the fact that a complete elucidation of one and the same object may require diverse points of view which defy a unique description.’

## 3.2 Complementariteit

In de bovenstaande passage wordt er gesproken over complementariteit, een sleutelbegrip in de Kopenhaagse interpretatie dat door Bohr voor het eerst geïntroduceerd werd in een lezing te Como ter verheldering van de kwantumtheorie. Een allesomvattende betekenis van deze notie is echter niet mogelijk doordat ze reeds in verschillende disciplines gehanteerd werd. Met de meest uiteenlopende verklaringen als gevolg. Vandaar dat ze hier slechts in relatie tot de moderne fysica zal besproken worden. Bohr's vertrekpunt situeert zich in de discontinuïteitsthese, of nog, de individualiteit<sup>35</sup> van kwantummechanische processen. De term 'individualiteit' wijst louter op de individuele energiekwanta die hun uitdrukking vinden in de formulering van Planck en verschilt als zodanig niet van 'discontinuïteit'. Uit deze voorstelling leidde Bohr af dat er 'niet enkel een eindige relatie bestaat tussen het object en de meetinstrumenten maar evenzeer een bepaalde latitude in onze grip op deze wederzijdse actie.' (Jammer 1974:90) Dit komt doordat de natuur zich hier niet tot op dezelfde nauwkeurigheid laat beschrijven zoals in klassieke domeinen. Een beschrijving in discrete eenheden (veelvouden van  $h$ ) staat geen tussenstadia toe, dit is niet mogelijk. Dit is wat Bohr bedoeld met 'een latitude'; een zekere speelruimte tussen twee opeenvolgende energie-eenheden dat niet verder kan beschreven of geanalyseerd worden. Hierdoor verkleint voor ons eveneens onze precisie in de weergave van dergelijke processen. Maar betekent dit werkelijk dat onze kennis gelimiteerd is? Indien de natuur zich niet nauwkeuriger laat beschrijven, dan kan er van onzekerheid toch geen sprake zijn omdat dit simpelweg de meest nauwkeurige omschrijving is dat de natuur toelaat. Kan dit niet geïnterpreteerd worden als de natuurlijke limiet, waarmee ik bedoel: hier situeert zich de natuur, niet dieper. Maar hier komen we opnieuw uit bij de problematiek van Einstein: biedt de kwantummechanica wel een complete beschrijving van de fenomenen en is de probabiliteit niet op dieper niveau te beschrijven vanuit fundamentele wetmatige vergelijkingen? Kan men hiermee stellen dat er in de kwantummechanische beschrijving van de werkelijkheid *a priori* een

---

<sup>35</sup> De term 'ondeelbaarheid' wordt eveneens gehanteerd.

marge bestaat waarover de theorie geen uitspraken kan doen? Volgens Bohr kon men de situatie die werd ingeluid door de komst van de kwanta en de daarmee gepaard gaande onbepaaldheidsrelatie omschrijven met het begrip complementariteit.

“On one hand, the definition of the state, of a physical system, as ordinarily understood, claims the elimination of all external disturbances. But in that case, according to the quantum postulate, any observation will be impossible, and, above all, the concepts of space and time lose their immediate sense. On the other hand, if in order to make observation possible we permit certain interactions with suitable agencies of measurement, not belonging to the system, an unambiguous definition of the state of the system is naturally no longer possible, and there can be no question of causality in the ordinary sense of the word. The *very nature of the quantum theory* [mijn cursivering] thus forces us to regard the space-time coordination and the claim of causality, the union of which characterizes the classical theories, as *complementary but exclusive features of the description* [mijn cursivering], symbolizing the idealization of observation and definition respectively.” (Jammer 1974:87)

Met het hierboven aangehaalde citaat meende Bohr verduidelijkt te hebben wat complementariteit betekent binnen deze concreet fysisch-wetenschappelijke context: in onze fysische beschrijving van de werkelijkheid zullen we steeds geconfronteerd worden met *het* vraagstuk van de kwantummechanica, nl. de mate waarin een meting (observatie) het onderzoeksobject noodzakelijk verstoort (zoals besproken in deel 2), in welke hoedanigheid is er dan nog sprake van een authentieke, objectieve en bovenal causale beschrijving? Omgekeerd: in onze bepaling (definitie) van dergelijke systemen kan men slechts een neutraal en dus causaal beeld schetsen indien men het depriveert van elke mogelijke invloed, maar dan is er van meting in de strikte zin van het woord geen sprake. De kwantumtheorie staat met andere woorden een causaal-tijdruimtelijke beschrijving van atomaire processen niet toe. Dit is een vreemd gevolg van het dualiteitsaspect en van de discontinuïteitstheorie. Een klassieke benadering stelt juist als taak voorop een causaal-deterministisch beeld te schetsen; kwantumfysica doet dit ook maar op geheel andere wijze: hier is het dualistische en discontinue aspect van groot belang en maakt de vergelijking in essentie kwantummechanisch. Tegelijkertijd zorgen



deze aspecten en de onbepaaldheidsrelatie ervoor dat een dergelijke beschrijving niet dezelfde objectiviteit kan waarborgen als in het traditionele kader. Hoewel, wanneer ze samenvloeien in een consistent netwerk zijn de resultaten dezelfde als in een klassieke vergelijking. Deze wetenschap is dus *niet* noodzakelijk minder nauwkeurig omdat ze de onbepaaldheidsrelatie gehoorzaamt of haar uitdrukking vindt in termen van een probabiliteitsfunctie. Ze is anders; de kennis over positie is complementair met onze kennis van het momentum; een tijdruimtelijke coördinatie is complementair met een causaal- deterministische beschrijving. Dit is de essentie van Bohr's complementariteits- these, en hoewel ze op het eerste zicht vrij exclusief, speculatief en onwetenschappelijk oogt, doet ze niettemin recht aan elke ontwikkeling binnen de kwantumtheorie, met groter succes dan Heisenberg ooit deed.

Laat ons tot slot halt houden bij wat het betekent wanneer een term als 'complementariteit', een *primair filosofische notie* juist noodzakelijk is in een volledige beschrijving van kwantumprocessen. Van hieruit kunnen we eveneens fundamentele principes als discontinuïteit, probabiliteit en deel-golf dualiteit plaatsen in de tweespalt tussen klassiek en kwantum.

### 3.3 Een kwantummechanische beschrijving

Wat is er nu typisch aan een beschrijving van atomaire processen en kunnen deze aspecten als het equivalent worden beschouwd van een klassieke benadering? In dit laatste hoofdstuk zullen we zien hoe de voorgaande revolutionaire denkbeelden plaats verwerven binnen de kwantumtheorie. Hier zal behandeld worden wat er zowel cruciaal als onvermijdelijk is binnen deze beschrijving en wat haar wezenlijk doet verschillen van de fysica tot 1900. Men mag echter niet verwachten dat hiermee de oude, klassieke traditie volledig achterhaald is en als zodanig kan worden verlaten. Neen, het omgekeerde is weer eens het geval: de klassieke benadering behoudt zijn daadkracht maar is gelimiteerd

tot een beperkt domein waarvan de grenzen worden aangegeven door deze nieuwe wetenschap. Maar waar kan men deze grens situeren? Dit is een uiterst ingewikkelde aangelegenheid waaraan ik me echter slechts gedeeltelijk zal wagen en wel op volgende wijze: ik zal pogen aan te duiden wat er zo typisch is aan atomaire processen en hoe deze zich verhouden tot een klassieke benaderingswijze. Deze laatste zal bij voorbaat reeds ongeschikt blijken ter verklaring van de fenomenen. Via deze weg hoop ik te komen tot een grenssituatie dat ons in staat stelt een onderscheid door te voeren tussen beide verklaringswijzen. Voor dit laatste zal ik kort verwijzen naar de bespreking van een hypothetisch ideale beschrijving van microprocessen, voorgesteld door Heisenberg in zijn boek 'physics and philosophy'<sup>36</sup>.

### 3.3.1 Discontinuïteit

Toen Planck in 1900 zijn experimenten uitvoerde met elektrische oscillatoren in de wand van een cilinder en zo tot de ontdekking kwam dat energie verdeeld is in discrete, *eindige* kwanta (energiepakketjes) werd de eerste fundamentele stap gezet in de kwantumtheorie. Aanvankelijk nog stug en zelfs door Planck niet onmiddellijk begrepen kende de discontinuïteitstheorie zijn intrede. Het belang hiervan zal slechts vele jaren later duidelijk worden, zoals we bij Bohr kunnen lezen in het citaat op pagina 76: hij noemt haar zelfs het 'quantum postulate'. Laat ons even van naderbij bekijken wat hij hiermee bedoelde en verklaren vanwaar al die ophef rond Planck's ontdekking ontstond.

Op zich stelt de ontdekking van individuele energiekwanta niet veel voor maar wanneer men naar de geschiedenis van de fysische wetenschappen kijkt, valt onmiddellijk op wat hier op het spel staat: elke wetenschappelijke ontwikkeling kende tot dan toe een beschrijving in termen van continuïteit, dit wil zeggen dat elke (inter)actie in de werkelijkheid beschreven kon worden met een theoretisch oneindige precisie. Dit is zo omdat een klassieke benadering vertrekt van de continuïteitsgedachte. Deze stelt dat overgangen in de natuur altijd geleidelijk en vloeiend zijn: 'natura non facit saltus'. Dit laatste bleek echter niet in overeenstemming te zijn met resultaten die opduiken wanneer

---

<sup>36</sup> Heisenbergh, W., 'Physics and philosophy: the revolution in modern science.', derde druk, New York, Harper&Row Publishers, 1966

we in onze natuurwetenschappelijke analyse van de dingen steeds kleinere onderzoeksdomeinen ontsluiten. Met andere woorden, in een beschrijving van het (sub)atomaire niveau wordt de onwaarheid van de voorgaande stelling prangend. Wanneer men vasthoudt aan de continuïteitsthese zal men nooit tot een adequate beschrijving komen eenvoudigweg omdat deze idee de kwantummechanica verhult. Wanneer we echter, in navolging van Planck en de zijnen, discontinuïteit in onze beschrijving opnemen, blijkt de vergelijking (ultraviolet-catastrofe) opnieuw te kloppen. Deze nieuwe gedachte luidde de komst van de kwantumtheorie in en in éénzelfde beweging stelde ze een klassieke benadering veilig door te stellen dat deze niet van toepassing kan zijn op (sub)atomaire processen. Dit is zo omdat atomaire processen wezenlijk verschillen van bewegingen beschreven door de Newtoniaans-relativistische (klassieke) bewegingsleer. Vooreerst; atomaire processen zijn minuscuul waardoor de betekenis van de onbepaaldheidsrelatie significant wordt in een beschrijving. Ten tweede; de interactie met het atomaire niveau leidt onvermijdelijk tot een alternatie in het gedrag van dat object, ten gevolge van de discreetheid waarmee de afzonderlijke energie-eenheden ( $h\nu$ ) noodzakelijk verschijnen. Dit laatste brengt een zekere speelruimte in onze kennis van deze processen met zich mee: want wat speelt er zich af tussen deze discrete veelvoudigen van energieniveaus? Laten deze zich eveneens beschrijven zoals in een klassieke benadering of is deze vraag echter geheel onzinnig? Dit brengt ons bij een derde opmerking die we kunnen toevoegen in dit thema: de onduidelijkheid van de grens tussen epistemologische en ontologische proposities. Zijn de uitspraken over discontinuïteit en het probabilistische karakter van de theorie slechts een gevolg van ons laakbaar menselijk theorievormingsproces, danwel een intrinsieke eigenschap van de natuurlijke processen die vanuit de theorie doorklinken? Geen wonder dat de receptie van deze ideeën vrij moeizaam verliep, wat had ze te maken met voorgaande ontwikkelingen? Dit is de eerste en meest exhaustieve ontwikkeling geweest die een breuk markeerde met het oude (klassieke) beeld van fysische beschrijvingen; tevens ook een eerste typische eigenschap van een kwantummechanische beschrijving van kwantumsystemen. De matrixmechanica weerspiegelt in numerieke gegevens wat het

gammastralen experiment conceptueel inzichtelijk maakt. Uit het gegeven dat in beide beschrijvingen de bevindingen in eenheden van de constante van Planck ( $h$ ) worden uitgedrukt volgt dat de discontinuïteitstheorie een noodzakelijke factor is in een beschrijving van de werkelijkheid; bovenal wordt hiermee eveneens aangetoond dat deze beschrijving van niet-klassieke aard is omdat deze de continuïteitstheorie niet ondersteunt. Dit is echter geen cirkelredenering want de discontinuïteitstheorie is *noodzakelijk* in een beschrijving alvorens men ze 'kwantummechanisch' kan noemen en ze is niet kwantummechanisch omdat ze louter de continuïteitstheorie niet onderschrijft.

Wanneer we de discontinuïteitstheorie in verband brengen met de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg wordt duidelijk dat ze ook hier van doorslaggevend belang is. Zoals reeds beschreven spelen de discrete kwanta een cruciale rol in het 'gammastralen microscoop experiment'. Dit is wat Einstein zozeer verfoeilijkte: een beschrijving van kwantumprocessen is tegelijkertijd *nooit* precies in momentum- en plaatsbepaling omwille van de discrete energiestroom (hier: discrete energiepakketjes van de gammastralen). Doordat deze laatste opgebouwd is uit individuele kwanta blijkt een klassieke (voor Einstein: objectieve) benadering uitgesloten. In de plaats hiervan zal opnieuw een kwantummechanische beschrijving komen, deze weet af te rekenen met Einsteins kritiek en houdt de onbepaaldheidsrelatie overeind als een lucide indicatie van hoe men zich kwantumprocessen kan 'voorstellen'. Wederom toont zich hoe de discontinuïteitsgedachte zowel de klassieke wetenschap in stand houdt, want zowel positie als momentum kunnen precies bepaald worden, in een niet-simultane meting althans. Eveneens wordt hier aanleiding gegeven tot de beschrijving van een nieuw onderzoeksdomein, omdat dergelijke beschrijving de onbepaaldheidsrelatie gehoorzaamt en een simultane meting niet toelaat met precisie<sup>37</sup>.

---

<sup>37</sup> Volgens sommige fysici is er geen sprake van een echte scheiding van de twee domeinen maar zijn de klassieke bewegingswetten louter een beschrijving van kwantumsystemen met hoge kwantumgetallen. Dit is een plausible verklaring gezien de enorm kleine waarde van de constante van Planck ( $h$ ). Een gevolg hiervan is dat kwantumprocessen, evenals de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg, slechts significant worden in systemen met kleine kwantumgetallen.

De onbepaaldheidsrelatie wordt vaak ook het ‘onzekerheidsprincipe’ genoemd omdat een precieze bepaling van het momentum zich uitdrukt in een onzekerheid betreffende de positie van datzelfde object. Dit is echter één stap te ver. Men poneert hier namelijk voorbij de stelling van de relatie: men schrijft ze eigenschappen voor die slechts vanuit menselijke perceptie kan begrepen worden. Al wat ze beschrijft is dat een simultane meting op paren van variabelen die de onbepaaldheidsrelatie gehoorzamen nooit nauwkeurig kan zijn. Maar dit ‘nooit nauwkeurig zijn’ neemt als zodanig niet noodzakelijk de vorm aan van onzekerheid. Dit is althans niet het geval op het niveau van een fysische beschrijving. Dit laatste heeft enkel als taak zo objectief mogelijk de processen te omschrijven, waarbij weinig aandacht wordt besteed aan eigen inbreng. Uiteraard zijn er inherent principes werkzaam, zoals de onbepaaldheidsrelatie, die een eenvoudige, complete beschrijving in de weg staan. Echter, dit is slechts onzekerheid gezien vanuit observerend perspectief, vanuit filosofisch-analytisch standpunt. Slechts in de ontleding ervan is ze onzekerheid, altijd wel voor het één of het ander; in de beschrijving ervan is ze slechts onbepaaldheid, in zoverre wetenschap neutraliteit en objectiviteit nastreeft. Wat hier geschetst wordt is echter een naïef beeld. Wetenschap, zelfs fundamentele, zoals fysica, is nooit neutraal maar altijd een product van wetenschappers; op pagina’s 58-62 heb ik er kort naar verwezen. Dit betekent niet dat we de eigenaardigheid van de Kopenhagen-interpretatie kunnen verhullen in het menselijke raamwerk van theorievorming. Dit wil zeggen dat zich hier ook op fysisch niveau iets vreemd voordoet. De eigenaardigheid van de epistemologische weergave en het soms verwarrende weefwerk met de ontologie wordt hier duidelijk; niet enkel vanuit onze verhouding tot de fenomenen maar ook vanuit deze fenomenen zelf. Dit is ook wat Bohr trachtte te verduidelijken wanneer hij zijn complementariteitsgedachte uitte: de ruimte-tijd coördinale beschrijving en een causaal-deterministische beschrijving zijn exclusieve beschrijvingen die slechts complementair (samengevoegd) een volledige beschrijving bieden (citaat van Bohr pag. 76). Om deze alinea af te sluiten zal ik in een controverser uitdrukken waar het om gaat: wanneer men de fenomenen observeert (onderwerpen aan interactie met het meetinstrument), dwingt men een ‘onbepaald-onvolledig’

epistemologische beschrijving af; maar indien men niet observeert en niet in interactie treedt met zijn onderzoeksobject, om het te meten, heeft een epistemologische beschrijving geen zin meer, maar men behoudt wel de causaal-objectieve gedachte van de werkelijkheid die vanuit de klassieke wetenschap zo wordt geprezen. Maar deze is onpraktisch, eerder speculatief.

### 3.3.2 Golf-deeltje dualisme

Maar de discontinuïteitstheorie vormt slechts één, onafhankelijk aspect van een kwantum-beschrijving. Hierna zullen we dit opnieuw in verband brengen met een derde en eveneens noodzakelijk kenmerk van een dergelijke beschrijving: nl. probabiliteit. Maar laat ons vooraf nog even stilstaan bij de dualistische idee in de fysica: bij aanvang enkel gericht op het lichtconcept, na de Broglie geldt ze eveneens voor materie als zodanig. In de zoektocht naar de aard van licht werden experimenten uitgevoerd die niet alleen zowel de deeltjes- als de golftheorie van het lichtconcept ondersteunden, maar eveneens het nog reeds ongekende gebied van deze nieuwe theorie in ogenschouw nam. Vergelijkbaar met dit onderzoek werd ook de aard van materie weer ter discussie gesteld door de Broglie. Dit heeft, in combinatie met de discontinuïteitstheorie en Einsteins niet te miskennen invloed, ervoor gezorgd dat ook het golfkarakter van materie algemene aanvaarding kreeg, zoals beschreven op pagina's 40-42. Wanneer we dit nu met het citaat van Jammer confronteren (p. 76) wordt duidelijk dat we ook hier met een typische eigenschap van kwantummechanische beschrijvingen te doen hebben. Bohr is hier van mening dat het klassieke ideaal van verklaring moet worden opgegeven. Meer nog, hij verwerpt Heisenberg's aanpak omdat deze laatste voor de legitimatie van de onbepaaldheidsrelatie vertrekt van een deductie van het mathematische formalisme, daar waar Bohr erin slaagt dezelfde relatie af te leiden uit een imaginaire experimentele context (gammastralen microscoop) *als en slechts als* men hier het dualistische aspect in rekenschap brengt. Dit was voor Bohr het bewijs dat zijn complementariteitstheorie in microsystemen consistent was met het mathematische formalisme van de kwantumtheorie. En zoals eerder reeds vermeld, Bohr is erin gelukt de

onbepaaldheidsrelatie aan te tonen op meer dan louter wiskundige gronden alleen. Juiste intuïtie en een gevoelige conceptie van de dingen stonden bij Bohr voorop. We kunnen niet ontkennen dat de discussie tussen hen eerder een gevolg was van 'de rangorde der begrippen' (Jammer 1974:68). De taal waarin men doorgaans fysica beschrijft is wiskundig. Dit wordt gehanteerd voor de beschrijving van het verloop van een fysisch systeem. Wiskunde, en in het algemeen taal doet dienst als instrument. Maar er is een belangrijk verschil tussen wiskundige (symbolische) vergelijkingen en de uitdrukking ervan in onze taal ('common language'). Dit is onvermijdelijk en komt doordat we genoodzaakt zijn te interpreteren. Bovendien is onze omschrijving van de natuur reeds meer dan 2000 jaar beschreven aan de hand van wat hier klassieke noties genoemd werden. Deze abrupte ommekeer in de fysica kon men niet voorzien en het zal hoogst waarschijnlijk nog even duren vooraleer een adequate taal kan worden beschreven dat de aspecten van de (sub)atomaire natuur duidelijk weergeeft. Het feit dat de kwantumtheorie vertrekt vanuit de scheidingslijn tussen het onderzoeksobject en de rest van de wereld (meetinstrument, onderzoeker,...) en dat enkel dit laatste in klassieke begrippen kan worden uitgedrukt stelt dit semantische probleem duidelijk voor. Atomaire processen vereisen een beschrijving in termen van de kwantumtheorie maar onze beschrijving is steeds klassiek van aard, en deze verschilt grondig van een kwantummechanische beschrijving. Hierdoor zijn we beperkt in onze weergave van dergelijke systemen. Een kwantummechanische beschrijving vereist een weergave dat de relatie gehoorzaamt en uitdrukking geeft aan het dualistische-, probabilistische- en discontinuïteitaspect. Ons kennisvermogen en wetenschappelijke verklaringswijzen zijn echter wél door en door klassiek. Dit is noodzakelijk volgens Bohr omdat we niet in staat zijn 'onze gebruikelijke perceptie vooraf te gaan'. 'It lies in the nature of physical observation, that all experience must ultimately be expressed in terms of classical concepts' (Bohr 1934:34). Deze discrepantie tussen een vereiste kwantumlogica en onze (gebrekkige) beschrijving in termen van de klassieke logica geeft soms aanleiding tot de meest extreme interpretaties. Bohr en Heisenberg zijn voorzichtiger en duiden enkel op het ongeschikte karakter van een klassieke beschrijving voor kwantumsystemen. Een

leerling van Bohr waagde zich aan deze logische problemen<sup>38</sup>. Deze onderneming, de zoektocht naar een geschikte taal waarin de verschijnselen nauwkeurig kunnen worden uitgedrukt, werd door Bohr op gang gebracht. Dit ambigue aspect betreffende de zoektocht naar een geschikte taal van waaruit men uitdrukking geeft aan de fenomenen is een kenmerk van theorievorming dat zich in de geschiedenis telkens weer herhaalt (flogiston, ether, ...).

Maar niet enkel de complementariteitstheorie werd ondersteund en mogelijk gemaakt door dit dualisme. Eveneens de onbepaaldheidsrelatie kan niet zonder een dualistische omschrijving van materie, aldus Bohr. De link tussen deze relatie en de dualiteit die eraan ten grondslag ligt is gerechtvaardigd vanuit de gammastralenbeschrijving. Dit werd reeds in het tweede deel besproken. Hier bleken beide typen van materie, zowel deel als golf, noodzakelijk in de beschrijving van de experimentele opstelling. Rond dit punt ontstond grote verdeeldheid die bijna de vriendschap tussen de beide opeiste. In het volgende citaat wordt duidelijk weergegeven hoe we Bohr's subtiele kritiek t.a.v. Heisenberg's positie in verband kunnen brengen met zijn complementariteitstheorie.

“The limitations imposed by the indeterminacy relations do not restrict definability, since each of the canonically conjugate quantities, if considered alone, can be measured in principle with arbitrary accuracy. If, however, simultaneous measurements of such conjugate quantities have to be considered, useless speculations can be avoided if it is agreed to define place, time, momentum and energy only in accordance with the indeterminacy relations, that is, *to base their definability on their measurability* [mijn cursivering]. This reduction of definability to measurability was unacceptable to Bohr. For, as he subsequently declared, when speaking about conjugate quantities, the ‘reciprocal uncertainty [lees: onbepaaldheid] which always affects the values of these quantities *is essentially an outcome of the limited accuracy with which changes in energy and momentum can be defined*’ (not ‘measured!’) [mijn cursivering].” (Jammer 1974:68-69)

---

<sup>38</sup> Voor een verdere lectuur hiervan verwijs ik naar C.F. von Weizsäcker.



Vanuit de ontwikkelingen in de fysica gezien, is dit een eigenaardig standpunt: Heisenberg lijkt de (klassieke) mening zijn toegedaan dat de bepaling van de eigenschappen van het fysisch onderzoeksobject (d.w.z. met de nodige variabele eigenschappen dat het tot een onderscheidbaar en onafhankelijk onderzoeksobject maakt) aangegeven wordt door de meetbaarheid. Dit laatste wil zeggen: de mogelijkheid tot kwantitatieve vaststelling en notatie van de variabele waarden van het onderzoeksobject. 'Alle Begriffe, die in der klassischen Theorie zur Beschreibung eines mechanischen Systems verwendet werden, lassen sich auch für atomare Vorgänge analog den klassischen Begriffen exakt definieren' (Heisenberg 1927:179). Zoals we weten is dit in overeenstemming met Heisenberg's eerder beschreven houding van operationalisme. Want met de definieerbaarheid van een concept verwijst hij naar 'het voorschrift van een procedure dat een meting van de kwantiteit waarnaar het concept verwijst inhoudt'. Deze houding is karakteristiek voor een typisch klassieke beschrijving omdat de reductie van definieerbaarheid tot meetbaarheid hier plaatsheeft. Dit geschied op volgende wijze: de definitie (bepaling) van een fysisch systeem baseren op de mogelijkheid tot kwantitatieve bepaling (meetbaarheid) van dat systeem houdt in dat men definieerbaarheid reeds gelijkstelt aan, of erkent als bestaande uit de kwantitatief meetbare eigenschappen van het onderzoeksobject. Dit is echter, hoewel een wezenlijk essentieel element in een fysische beschrijving, niet wat Bohr bedoelde. Voor deze laatste dient, zoals we reeds zijn tegengekomen (p.74), een klassieke conceptie verlaten te worden in een beschrijving van atomaire processen: dit houdt in dat de reductie van definieerbaarheid tot meetbaarheid eveneens terzijde geschoven dient te worden omdat deze een wezenlijk element vormt van een klassieke beschrijving. Deze vluchtweg werd geleverd in de dualistische beschrijving want in een klassieke beschrijving geldt ófwel de ene beschrijving (deel) ófwel de andere (golf), maar nooit gelijktijdig. Voor Bohr, verwijzend naar de complementariteitstheorie, was dit dualisme juist het sleutelement in een kwantum-mechanische beschrijving. Temeer omwille van de consistentie waarmee het de onbepaaldheidsrelatie kon deduceren zonder het abstracte formalisme van Heisenberg te hanteren. Hiermee toonde Bohr aan dat een kwantumbeschrijving

noodzakelijk het golf-deeltje dualisme moet onderschrijven *en* eveneens het discontinuïteitsbeginsel dat de uitdrukking geeft aan dit dualisme; zoniet is er van kwantumprocessen geen sprake. In het volgende citaat bevindt zich de cruciale gedachtegang waarmee dit alles duidelijk wordt en plaats verwerft binnen het opzet; nl. de breuk tussen het klassieke- en het kwantumniveau van beschrijving.

“Bohr’s point of departure was the fundamental wave-particle duality which found its expression in the individuality of atomic processes and which consequently led to the question concerning *the limits within which physical objects of such nature can be described in terms of classical concepts*; the limitation of measurability confirms the limitation of definability but *does not logically precede it* [mijn cursivering].” (Jammer 1974:69)

Dat het dualisme zijn uitdrukking vindt in de individualiteit (discontinuïteit) behoeft niet veel uitleg: vanuit het gammastralen experiment en simpeler nog, vanuit de beschrijving van frequentie in termen van discrete energiekwanta (bv. fotonen) wordt dit duidelijk. Veel belangrijker is het feit dat Bohr definieerbaarheid helemaal niet (a priori) stoelt op meetbaarheid; deze kan het wel bevestigen maar ze gaat er niet noodzakelijk *logisch* aan vooraf. Dit wil zeggen dat een bepaling van fysische systemen (in dit geval kwantumprocessen) niet noodzakelijk gebaseerd hoeft te zijn op exacte kwantitatieve bepaling (meetbaarheid) zoals in het klassieke kader juist *omdat* dit dualisme en individualisme een limiet stelt aan metingen van dergelijke processen. Het vervolg van het voorgaande citaat stelt waarom Bohr gelijk had.

“Bohr’s position could be supported by the argument that, as mentioned previously, any derivation of the indeterminacy relations from thought-experiments, that is, of Heisenberg’s formulation of the limitations of measurability, *had to be based on* the Einstein-de Broglie equations, which in turn, connect features of the wave and particle descriptions – and thus implicitly presuppose wave-particle duality.” (Jammer 1974:69)

Zodoende kan men evenzeer een bepaling van kwantummechanische processen bereiken, ook wanneer deze niet exact (naar klassieke normen althans) te meten zijn.

Want dit element van precisie wordt evengoed binnen een kwantumtheorie bereikt: daar waar het de onbepaaldheidsrelatie gehoorzaamt en bovendien zowel uitdrukking geeft aan de dualistische als aan de discontinue aspecten van dergelijke beschrijvingen. Het verschil situeert zich opnieuw in het conceptuele draagvlak. Want wat een precieze beschrijving inhoudt betekent niet overal hetzelfde: een kwantummechanische context verschilt wel degelijk van een klassieke. In het gebruik van noties als positie en momentum werd dit duidelijk.

### 3.3.3 Probabiliteit

Na de omschrijving van deze twee typische kenmerken zijn we aanbeland bij een derde, eveneens karakteristieke eigenschap. Vaak staat er te lezen dat de introductie van de kwantumtheorie in de fysica kan worden vergeleken met de introductie van waarschijnlijkheid of probabiliteit in de wetenschap, aangeduid met de notie 'probabilisme'. Dit is, zoals reeds vermeld (p.48-51), *niet* hetzelfde als statistische of stochastische waarschijnlijkheid dat we doorgaans terugvinden in een klassieke beschrijving. Het verschil tussen deze beide vormen van probabiliteit werd reeds toegelicht toen we Schrödingers golfvergelijking en Born's probabilistische interpretatie hiervan beschreven. De kern hiervan kan kort worden weergegeven door te stellen dat een kwantummechanische vorm of interpretatie van waarschijnlijkheid nooit kan worden gereduceerd tot, en zelfs wezenlijk verschilt van een statistische interpretatie. Dit komt doordat deze eerste vorm niet het gevolg is van een gebrek aan informatie in de eigenlijke zin van het woord maar eerder een gevolg van het discontinuïteitsbeginsel en het dualisme van het concept 'materie'. Herinner de voorstelling van een fysisch systeem in een probabiliteitsfunctie waarbij enkel het deeltje overblijft na een meting verricht te hebben op deze functie. Hier begeven we ons eens te meer op de duistere scheidingslijn tussen epistemologie en ontologie. Immers: een beschrijving van probabilistische aard die nog steeds deterministisch is, is geen gewoon beeld binnen wetenschappelijke ontwikkelingen. Bovendien bleek dit probabilistische aspect een punt van controverse, zoals we eerder reeds besproken hebben. Het is vanuit deze bekommernis dat

Schrödinger en voornamelijk Einstein zijn kritiek zal uiten. Kunnen we deze inherente probabiliteit in kwantummechanische beschrijvingen niet eerder situeren in onze weergave ervan? Is met andere woorden deze notie van waarschijnlijkheid niet een wezenlijk epistemologische factor dat men op een dieper, ontologisch niveau niet zou aantreffen? Maar dan is deze vorm van probabiliteit louter een manifestatie van statistiek, van incomplete informatieweergave. Dit zullen de aanhangers van de kwantumtheorie niet onderschrijven, integendeel. Probabiliteit is volgens hen evengoed een typische sleutelnotie van dergelijke beschrijvingen. Volgens hen was Einsteins zoektocht naar zo een ‘unificatietheorie’<sup>39</sup> op voorhand gedoemd te stranden. Laat ons even bekijken vanwaar deze vorm van probabiliteit vandaan komt en hoe Heisenberg en Bohr ze integreren in de Kopenhagen-interpretatie.

We weten reeds dat een paar canonisch geconjugeerde variabelen, zoals positie-momentum of tijd-energie, steeds gebonden is aan de relatie beschreven door Heisenberg. Dit laatste is, zoals vermeld, een uitdrukking van onbepaaldheid of onzekerheid (voor de analyserende blik althans) en verwijst naar een marge waarover we als zodanig geen uitspraken kunnen doen. Welnu, wanneer discontinuïteit en het voorgenoemde dualisme noodzakelijke aspecten zijn van een kwantummechanische beschrijving, kan men stellen dat probabiliteit dit ook vormt. Immers, probabiliteit is op dit niveau eveneens een gevolg van de discontinuïteitsthese en het dualisme: uit het feit dat de onbepaaldheidsrelatie slechts beschreven kan worden vanuit deze aspecten volgt probabiliteit. Voor dit laatste verwijs ik naar het verband tussen de discontinuïteitsthese en het dualistische aspect in relatie tot de onbepaaldheidsrelatie, weergegeven op de voorgaande pagina’s. De wijze waarop waarschijnlijkheid hierin tot uiting komt kan onmogelijk gereduceerd worden tot de klassieke variant ervan omdat deze laatste de voorgenoemde factoren niet in haar beschrijving opneemt. Nu zullen we even stilstaan

---

<sup>39</sup> Einstein zou in de jaren na zijn bijdrage aan het ontstaan van de kwantumtheorie zich hevig verzetten tegen de denkbeelden van deze nieuwe theorie. Onder andere de notie van ‘probabiliteit’ als fundamentele eigenschap in deze beschrijving vond hij maar niets. Vandaar dat hij uit was op een overkoepelende theorie die de kwantumtheorie kon verzoenen met de klassieke wetenschap, en als zodanig het probabilisme een fundament kon bieden. Hij is er echter nooit in geslaagd deze (vermeende) onderbouw manifest te maken.

bij de omschrijving van probabiliteit in atomaire processen zoals dit door Heisenberg in zijn boek 'Physics and Philosophy' wordt verdedigd.

“In Newton’s mechanics, for instance, we may start by measuring the position and the velocity of the planet [...] Then the equations of motion are used to derive from these values of the co-ordinates and momenta at a given time the values of these co-ordinates or any other properties of the system at a later time [...]. In quantum theory the procedure is slightly different. We could for instance be interested in the motion of an electron [...] determine by some kind of observation the initial position and velocity of the electron. But this determination will not be accurate; it will at least contain the inaccuracies following from the uncertainty relations and will probably contain still larger errors due to the difficulty of the experiment [...] first of these inaccuracies which allows us to translate the result of the observation into the mathematical scheme of quantum theory. A probability function is written down which represents the experimental situation at the time of the measurement, including even the possible errors of the measurement.” (Heisenberg 1966:44-45)

Hier zien we hoe probabiliteit letterlijk in de kwantumfysica besloten zit: de vertaling in termen van een probabiliteitsfunctie, zoals beschreven in Schrödinger’s golfvergelijking. Uit dit citaat blijkt dat deze vergelijking noodzakelijk de these van de onbepaaldheidrelatie gehoorzaamt. Ook aan de discrepantie tussen de twee vormen van waarschijnlijkheid wordt recht gedaan: als noodzakelijk verschijnsel binnen de transmutatie naar een probabiliteitsfunctie (onbepaaldheidrelatie: kwantum) en als gevolg van ons menselijk rekenschap van de feiten (experiment: klassiek). Belangrijk is hoe Heisenberg even verder een beschrijving geeft van een theoretische interpretatie van een experiment. Hierin onderscheid hij drie stappen.

“(1) The translation of the initial experimental situation into a probability function; (2) the following up of this function in the course of time; (3) the statement of a new measurement to be made of the system, the result of which can be calculated from the probability function. For the first step the fulfillment of the uncertainty relations is a necessary condition. The second step cannot be described in terms of classical concepts. There is no description of what happens to the

system between the initial observation and the next measurement. It is only in the third step that we change over again from the 'possible' to the 'actual'." (Heisenberg 1966:46-47)

Dit mag echter niet de indruk wekken dat de kwantumtheorie geen voorspellingen kan doen. Heisenberg wijst ons enkel op het belang van zijn onbepaaldheidsrelatie en 'probabiliteit' in een kwantummechanische beschrijving. Doch klinkt hier veel meer door. De stap die hier wordt gezet van (2) naar (3) is cruciaal. De beschrijving van de waarschijnlijkheidsfunctie gebeurt in deze eerste stap naar analogie met de coördinatendescriptie uit de Newtoniaanse mechanica. Deze vergelijking gehoorzaamt echter de onbepaaldheidsrelatie, dus wezenlijk klassiek kunnen we haar echter niet noemen. Hoewel: hier gaat het louter om de beschrijving van positie en momentum op een bepaald tijdstip. Dit wordt door de klassieke mechanica tot op zekere hoogte geleverd in een niet-simultane meting, tenminste tot aan de intrede van onbepaaldheid. 'Its change in the course of time is completely determined by the quantummechanical equation [d.i. de golfmechanica van Schrödinger], but it does not allow a description in space and time. The observation, on the other hand, enforces the description in space and time but breaks the determined continuity of the probability function by changing our knowledge of the system.' (Heisenberg 1966:49-50) Hier bespreekt hij de beruchte overgang van 'potens' naar 'act', van waarschijnlijkheid naar actualiteit. Het eerste deel van dit citaat handelt over de tweede stap (2). Hier situeert zich de deterministische maar tevens probabilistische tussenstap waarover men geen uitspraken kan doen. Althans, dit kan niet in een klassiek denkschema worden uitgedrukt. Heisenberg zelf noemt dit domein 'potens', verwijzend naar het probabele karakter van de kwantummechanica. Denken we even terug aan het gammastralen experiment: het gebruik van gammastralen staat een objectieve en vooral continue beschrijving in de weg. Het elektron wordt uit de baan gestoten en deze alternatie in gedrag houdt tevens in dat we niet meer dan één punt van het elektron gelijktijdig kunnen beschrijven; met andere woorden, er is hier van een 'pad' geen sprake, althans niet in de eigenlijke betekenis van het woord. Met 'eigenlijke' wordt hier 'klassieke' bedoeld. Vandaar dat een beschrijving niet in staat is voor wat er feitelijk gebeurt in stap (2), tenminste niet onze klassieke fysica. Stap (2) wordt beschreven aan de

hand van een kwantumbeschrijving die, zoals we reeds opmerkten, de voorgaande aspecten noodzakelijk dient te integreren. In stap (3) wordt opnieuw de beschrijving van het elektron in een klassiek kader gedwongen. De observatie, of nog, de interactie met het onderzoeksobject veroorzaakt de instorting van de probabiliteitsgolf (beschrijving van het kwantumproces) en louter de baan van het elektron blijft hierdoor over. Maar opnieuw is hier geen sprake van een beschrijving buiten de klassieke noties om. Want willen we in staat zijn opnieuw een meting te verrichten, dan moet men opnieuw een beschrijving geven van positie en momentum (1). Deze instorting van de golf functie zijn we reeds eerder tegengekomen, daar waar Born's visie op de algemene golfvergelijken van Schrödinger werd besproken. Hierin valt het dualisme onmiddellijk op: de vertaling naar een probabiliteitsfunctie heeft plaats als een overgang van een deeltjesbeschrijving naar een golfbeschrijving. Stap (2) wordt beschreven vanuit Schrödingers golfmechanica die louter de potentialiteiten uiteenzet. De instorting van de golf ten gevolge van een interactie, de zogenaamde wijziging in onze kennis over dat systeem (stap (2) naar (3)), betekent opnieuw een verschuiving van een golfbenadering naar een deeltjesbenadering. Stap (2), de wezenlijk kwantummechanische en probabilistische overgang, kan echter nooit afzonderlijk compleet beschreven worden, maar enkel complementair. Dit wil zeggen: zowel deel- als golfbeschrijving is hier noodzakelijk. Maar indien we de meting verrichten op de (probabiliteits)golfbeschrijving en een deeltjesbeschrijving afdwingen verdwijnt opnieuw het kwantummechanische aspect.

Dit probabilistische aspect vormt zonder twijfel de doorn in het oog van elke klassiek gezinde wetenschapper. Einstein was hier het sprekende voorbeeld van. De gehele moeilijkheid van de kwantumtheorie situeert zich ongetwijfeld op de interpretatieve factor; de interactie van de meetinstrumenten met het onderzoeksobject, de act van observatie en meting... Deze factoren bepalen mee onze houding t.a.v. de theorie omwille van twee redenen: een eerste, triviale reden hiervoor houdt in dat de epistemologische factor *altijd* aanwezig is in wetenschap. Wij zijn interpreterende wezens; het loutere feit dat er wetenschap ontwikkeld wordt is een indicatie hiervan. Een diepgaandere

verklaring voor het belang van de voorgenoemde factoren in onze interpretatie van de theorie kan niet los worden gezien van de theorie als zodanig. Ze vormen mede het fundament ervan, wat op zijn beurt een invloed uitoefent op de problematiek van de ontologische betekenis van de kwantumfysica. De vraag die eerder gesteld werd in de algemene inleiding: ofdat het verschil tussen een klassieke- en een kwantummechanische beschrijving louter conceptueel, danwel fundamenteel van aard is, werd beantwoord door de essentiële eigenschappen van dergelijke beschrijving te bieden. Maar ofdat deze enkel uitdrukking zijn van onze relatie tot het onderzoeksobject of daarentegen ontologische gevolgtrekkingen hebben, kon niet éénduidig worden behandeld. Maar is dit wel van belang? Hoe de dingen '*an sich*' zijn, wordt in wetenschappelijke disciplines vaak afgedaan als een onzinnige vraag. Bohr, Heisenberg en Einstein staan hier vooral centraal als fysici die juist hun zoektocht afstemden op de vraag naar het wezen van de natuur. Bohr was de eerste die het aandurfde letterlijk een filosofisch element te introduceren dat in deze fysische theorie een doorslaggevende positie innam: de complementariteitstheorie. Nochthans tonen Einstein en Heisenberg eveneens een houding van realisme, maar waar dit voor Einstein op dat moment in tegenspraak met de kwantumtheorie was, vormde dit voor Heisenberg een wezenlijk element in zijn interpretatie van kwantumfysische beschrijvingen.



## 4. Conclusie

We zagen hoe met de ontdekking van Planck het gehele fysische landschap *een omwenteling doormaakte die gekenmerkt werd door een verschuiving in conceptuele fundamenten*. De ambiguïteit van voorgaande stelling wordt prangend wanneer we de kritiek van Einstein ermee in verband brengen. Concreet: hebben we in deze nieuwe theorie slechts een verschuiving van het epistemologische niveau of wordt hiermee eveneens op de ontologie gedoeld? In de onbepaaldheidsrelatie werd dit op de proef gesteld aan de hand van de vraag met betrekking tot simultane metingen. Of deze al dan niet mogelijk zijn. Hierin houdt zich het antwoord schuil op de vraag of het probabiliteitsaspect fundamenteel of eerder epistemologisch is: indien men gelijktijdig kennis van positie en momentum bezit en het deterministische patroon van het gehele systeem kent (wetmatig verband), dan is men in staat zoals Laplace ooit beweerde, de toekomst en het verleden van het universum te bepalen. Dit beeld werd aangehaald om het mechanisch-deterministische karakter van de klassieke wetenschap te tonen maar werd echter niet door de onbepaaldheidsrelatie bevestigd. Dit laatste toonde dat de verhouding tussen de onbepaaldheid in bepaling van positie omgekeerd evenredig was met de onbepaaldheid waarmee het momentum van datzelfde partikel bepaald werd. Het gammastralen experiment is hier een conceptueel inzichtelijke variant van. Hoewel dit laatste een gedachte-experiment is, geeft het eveneens uitdrukking aan het niet-commutatieve aspect van de matrixmechanica. Dit wil zeggen dat het ondersteund wordt door een achterliggend mathematisch verband, wat hem de nodige zelfzekerheid omtrent zijn ietwat gedurfde interpretatie van de theorie verschafte. Maar dit had eveneens tot gevolg dat Bohr zijn complementariteitstheorie kon uitwerken waarin het dualistische aspect van materie centraal staat. Hij ging zelfs zo ver dat hij er, in tegenspraak met Heisenberg, het conceptuele fundament van de theorie van maakte. Achteraf sloot Heisenberg zich aan bij deze nuance van Bohr en vormden zo de belangrijkste pioniers van de Kopenhagen-interpretatie uit die tijd.

Bij de aanvang van de thesis werd de vraag gesteld op welke punten een klassieke benadering fundamenteel verschilt van een wezenlijk kwantummechanische benadering. Dit werd behandeld door vooraf die ontwikkelingen te bespreken waarin deze breuk latent aan bod komt. De nieuwe gedachtengang die hierdoor gaandeweg het landschap domineerde bleek moeilijk vergelijkbaar met de traditie. De fysica tot 1900 werd getekend door een mechanistisch, deterministisch en vooral continu karakter. Dit laatste leerden we kennen als de tegenhanger van de discontinuïteitsthese: alle processen in de natuur laten zich vanuit de klassieke benadering beschrijven als vloeiend en praktisch opvolg- en beschrijfbaar tot in een oneindige nauwkeurigheid. Dit betekende eveneens dat toeval en waarschijnlijkheid uitgesloten zijn binnen deze beschrijving, tenzij dan die vorm van probabiliteit dat men niet kan uitsluiten omdat we slechts mensen zijn. In onze experimentele calculus en weergave van dynamische systemen zijn we gelimiteerd door meetinstrumenten, menselijk falen, onnauwkeurigheid ten gevolge van praktische beperking enz... Maar dit verschijnt niet als een wezenlijk element van de natuur maar slechts in ons rekenschap ervan. Daar waar we echter de onbepaaldheidsrelatie bespraken, bleek de ambiguïteit van deze gedachte duidelijker. Hier dringt zich een revisie op: een simultane meting bevestigt het klassieke in de beschrijving. Immers, positie en momentum kunnen bepaald worden zoals in de klassieke fysica, met nauwkeurige precisie. Maar in kwantumsystemen werd dit niet ondersteund. Hier bleek een simultane meting praktisch onmogelijk, althans met dezelfde criteria als de klassieke variant. In die zin is een gelijktijdige meting wel mogelijk maar niet nauwkeurig. Hieruit concludeerde Heisenberg, in navolging van Bohr, dat klassieke noties als positie en momentum niet van betrekking zijn op atomaire processen en als zodanig niet thuishoren in een kwantummechanische beschrijving. Ze voegen niets toe en beschikken bovendien niet over een referent in het formalisme. Waarom dit zo is werd besproken in het gammastralen experiment. Beide, zowel de onbepaaldheidsrelatie als het gammastralen experiment, geven uitdrukking aan de achterliggende mathematica die werd beschreven als de matrixmechanica. Dit fundament speelde een uitermate belangrijke rol binnen de uiteenzetting omdat zowel Heisenberg als Bohr hun interpretaties opbouwden aan de

hand van de correctheid van dit schema. Heisenberg zal er zijn verwerping van de zogenaamde elektronenbanen mee ondersteunen, mits enkele verwijzingen naar de filosofische achtergrond van waaruit hij dit rechtvaardigt. Bohr zal er integendeel de interpretatie van Heisenberg mee nuanceren en in deze hoedanigheid erin slagen het cruciale dualisme te integreren en zelfs op te voeren als conceptueel draagvlak van zijn complementariteitstheorie. Van hieruit is hij eveneens in staat het probabilistische fundament en de discontinuïteitstheorie op te nemen. Omdat beide in relatie staan tot dit dualisme: discontinuïteit geeft er de uitdrukking aan, probabiliteit is het gevolg. In het feit dat energie slechts in discrete hoeveelheden kan verschijnen volgde onbepaaldheid en probabiliteit (denken we even terug aan de onbepaaldheidsrelatie en de gammastralen microscoop). Vanuit dit laatste merkten we eveneens op dat een beschrijving van atomaire processen steeds vertrekt vanuit de dualistische beschrijving: voor de meting van een elektron (positie of momentum) waren steeds zowel de deeltjes- als de golfbeschrijving vereist. Eveneens de vertaling naar een waarschijnlijkheidsfunctie waaraan de relatie gehoorzaamt geeft hier uitdrukking aan.

Dus, wanneer we een klassieke vorm van beschrijven vergelijken met een kwantummechanische variant vallen onmiddellijk twee dingen op: het beschreven domein verschilt grondig van het klassieke onderzoeksgebied en de beschrijving zelf verschilt in een nog grotere hoedanigheid ervan. Het eerste is triviaal: atomen, elektronen, ... vormen het onderzoeksobject en deze verschillen grondig van melkwegstelsels. Hoewel. Dit laatste is echter niet geheel correct. De vraag naar deze scheidingslijn tussen de domeinen is uiterst interessant en een studie waard. Zo zijn er twee kampen van wetenschappers die beide thesen verdedigen: er is, al dan niet, een onderscheid tussen deze twee. Dat de beschrijving zelf verschilt van een klassieke variant en als zodanig niet als het equivalent kan worden beschouwd is minder triviaal. Beter nog, deze vraag is complexer in behandeling. Hiervoor dient men aan te geven wat zowel cruciaal is aan de klassieke- als aan de kwantummechanische beschrijving. We zagen hoe discontinuïteit de eerste stap vormde. Hiermee werd een geheel van andere

ontdekkingen op gang gebracht die eveneens dienden geïntegreerd te worden. Discontinuïteit gaf aanleiding tot onbepaaldheid (matrixmechanica) en probabiliteit. Het dualisme van de Broglie en de transmutatie naar de probabiliteitsgolf (golfmechanica) gaf er vorm aan. In het laatste deel waren we getuige van hoe dit alles samenvloeiende tot één consistent geheel. Hierdoor werd voor ons duidelijk wat wél en wat niet thuishoorde in een typische beschrijving van atomaire processen; wat er klassiek aan is en wat essentieel kwantummechanisch (denk aan Heisenberg's beschrijving van een experimentele context in drie stappen).

## 5. Slotbeschouwing

Wanneer men de ontwikkelingen binnen het domein van de fysica in ogenschouw neemt, is men doorgaans geneigd Newton en vooral Einstein op te voeren als steunpilaar van theorieën in de fysica. Ondanks het feit dat ze beiden terecht een ereplaats verdienen binnen deze wetenschappelijke revolutie wordt hiermee echter niet het ganse beeld geschetst. We zagen hoe bij aanvang van vorige eeuw nieuwe ontdekkingen oprezen die, wanneer men ze trachtte te verklaren aan de hand van het klassieke denkkader, de vorm aannamen van absurditeiten. Plancks ontdekking van de algemene stralingsformule voor een zwart-lichaam zorgde voor de introductie van de onmisbare discontinuïteitstheorie. Hiermee werd de eerste stap gezet in de richting van een nieuwe theorie dat de fysica als het ware in twee dreigde te splitsen. Men was zich toen echter nog niet bewust van de draagwijdte van deze denkbeelden. Nochtans was er reeds een sluimerend bewustzijn aanwezig dat de aanleiding vormde voor deze eigenaardige revolutie, zij het dan onder louter speculatieve vorm. In het historische gedeelte werd hierop de nadruk gelegd. Reeds Demokritos werd vermeld, om aan te tonen dat de idee van ondeelbare entiteiten, die we atomen hebben genoemd, een lange geschiedenis kent. Deze idee bleek, samen met de ontleding van het lichtconcept, uiterst zinvol te zijn in de zoektocht naar de eigenschappen van microscopische fenomenen. Zo werd gaandeweg het golf- en deeltjesconcept gangbaar onder wetenschappers. Dit laatste bleek plotseling enorme vooruitgang geboekt te hebben want men verklaarde er de chemische samenstelling van substanties mee. Bovendien bleek het een enorme predictieve waarde te bezitten die tot uitdrukking kwam daar waar we Maxwell's kinetische theorie bespraken. Tot dan was het atoomconcept echter nog hoogstens analytisch en eerder speculatief. De kwantitatieve beschrijvingen van Einstein brachten hierin verandering. Maar niet enkel het atoomconcept werd veilig gesteld door zijn toedoen, eveneens het begrip van *fotonen*, dat haaks stond op de golfbeschrijving van het lichtconcept, werd plausibel. Meer nog, hij was in staat het verband tussen frequentie en energie af te leiden: dit betekende, een coherente verklaring te bieden voor zowel de deeltjes- als de

golfbenadering van het lichtconcept. In éézelfde beweging zorgde hij met deze toevoeging ervoor dat de kwantummechanica overeind bleef want hij was in staat deze kwantumrelatie ( $E = h\nu$ ), die door Planck voor het eerst achterhaald werd, plaats te geven binnen zijn kwantitatieve beschrijvingen van licht. Dit alles bleek binnen hetzelfde raamwerk te passen: de kwantumfysica, waarin de constante van Planck opnieuw een cruciale uitdrukkingseenheid vormt en als zodanig wijst op het microscopische karakter van de fenomenen. Maar dit geldt voor de kwantumtheorie in het algemeen:  $h$ , dat een uitdrukking geeft aan het discontinue aspect, wordt niet enkel ondersteund door het stralingsconcept; eveneens het dualisme van materie en licht, het atoommodel van Bohr en de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg geven hier hun uitdrukking aan. Met dit aspect van discrete energie-eenheden werd eveneens de weg geëffend naar een nieuwe analyse van het allerkleinste onderzoeksdomein want zonder deze inbreng zou men in het klassieke domein blijven doorvorsen. Vandaar dat in het onderzoek naar de eigenaardigheid van kwantummechanische processen vooraf deze ontwikkelingen dienden te worden besproken die van bepalend belang zijn voor het verloop van de thesis. Hier werd de nadruk gelegd op aspecten die de breuk met het klassieke denkkader aanduiden en de materie vormen voor een nieuwe benadering. De conceptie van atomen en elektronen opende de deur naar het atoommodel. In dit laatste bleek elektromagnetische straling en de baan van een elektron van belang. Naar het einde van de beschouwing toe vormt deze baan van het elektron het aandachtspunt omdat dit de overstap naar de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg mogelijk maakt. Meer nog, in een analyse van deze zogezegde banen hield zich het antwoord schuil op de vraag waar men het onderscheid tussen beide types kan situeren. Dit werd in het volgende deel besproken aan de hand van de vraag naar een simultane meting.

In dit tweede deel werd deze simultane meting van positie en momentum van een elektron ter discussie gesteld. Dit werd de onbepaaldheidsrelatie genoemd. Deze onbepaaldheid reist steeds op wanneer men een gelijktijdige meting tracht te verrichten op paren variabelen die deze relatie gehoorzamen. Positie en momentum, tijd en energie

waren twee voorbeelden. Een dergelijke meting laat steeds een marge die onbepaald is; een latitude uitgedrukt in eenheden van de constante van Planck. Het contrast met het klassieke domein is zeer groot aangezien een kwantumbeschrijving strikt genomen niet instaat voor een verklaring van het 'pad' dat een elektron beschrijft, aangezien ze geen gelijktijdige correcte bepaling kan geven van beide variabelen. Dit is noodzakelijk en wordt door een Newtoniaanse mechanica wel ondersteund. Maar de vraag of hier niet eerder een conceptuele verwarring danwel een fundamentele bij betrokken is, is hier eveneens van belang en staat niet los van het geheel. Voor Heisenberg en zeker voor Bohr diende de klassieke conceptie 'als verklaring' verlaten te worden. Dit wil zeggen: kwantummechanica in termen van klassieke wetenschap is onmogelijk. De interactie tussen een kwantumsysteem en een meetinstrument (klassiek) leidt onvermijdelijk tot een verandering in de atomaire processen waar we in onze beschrijvingen geen toegang tot hebben. Het vreemde is juist dat dit laatste een gevolg is van onze bedoeling het te bepalen; hiermee bereiken we net het omgekeerde van wat beoogt werd; een omkering van de relatie ontologie-epistemologie? Maar Einstein vond deze probabilistische beschrijving van zowel Heisenberg en Schrödinger als de kwantumfysica in het algemeen niet overtuigend. Niet de validiteit maar de volledigheid van deze theorie vormde zijn bekommernis. Einstein werd hier opgevoerd als verdediger van een klassieke houding; deze kwantummechanische(!) waarschijnlijkheid is niet de finale stap in deze ontwikkeling. Op dieper niveau moeten deze wetten kunnen worden beschreven met nauwkeurigheid gelijk aan dat van het klassieke domein. Dit zou volgens hem bereikt kunnen worden in een experimentele context dat een gelijktijdige meting uitvoerbaar acht. Hij is echter nooit in dit opzet geslaagd. Hieruit concludeerden Heisenberg en Bohr dat een typisch kwantummechanische beschrijving noodzakelijk deze onbepaaldheid impliceert. Maar dit behandelt niet de vraag naar de betekenis van deze relatie. Hiervoor werd verwezen naar de filosofische attitude van waaruit Heisenberg de fenomenen bestudeerde en zijn resultaten interpreteerde; niet iedereen interpreteert de onbepaaldheidsrelatie op dezelfde wijze als hijzelf deed. Volgens sommigen hield zich in deze formulering van onbepaaldheid de doodsteek van causaliteit schuil, voor anderen

was deze relatie net een verklaring ten gunste van causaliteit in kwantumsystemen. Immers: in staat zijn een meting te verrichten en bovendien een alternatie in het gedrag teweeg kunnen brengen, dat bevestigt het causaliteitskarakter. Zeker Bohr was het niet overall met hem eens. Opnieuw was het niet de validiteit van de theorie dat bekritiseerd werd, maar ditmaal waren het de logische gronden waarop men de relatie diende te baseren. De discussie had met andere woorden betrekking op de conceptuele zijde van de zaak. Dit werd in het laatste deel in verband gebracht met revolutionaire ontwikkelingen zoals discontinuïteit, dualisme en probabiliteit die aanleiding gaven tot deze nieuwe theorie, zoals besproken in het eerste deel. Hieruit zal tevens blijken dat deze voorgenoemde aspecten niet louter onderdeel uitmaken van een kwantummechanische beschrijving maar in hun hoedanigheid *noodzakelijk* onderdeel vormen van een dergelijk type van beschrijving. Gelet op de wijze waarop dit alles samenvloede tot een coherent geheel waarin het ene element onmogelijk zonder het andere kan.

In dit laatste deel werd de plaats en betekenis van de onbepaaldheidsrelatie besproken, waarbij de aandacht voornamelijk uitging naar de essentiële elementen van een typisch kwantummechanische beschrijving. Welke elementen zijn hier van belang en in welk opzicht verschillen ze van een klassiek fysische verklaring? In de beknopte bespreking van de Kopenhagen-interpretatie werd duidelijk dat Bohr de onbepaaldheidsrelatie aanvaardde, mits enkele conceptuele nuances: niet louter de limitering in gebruik van klassieke concepten maar de gehele klassieke conceptie dient ter verklaring van atomaire processen vervangen te worden door wat volgens Bohr enkel kan beschreven worden vanuit een dualistische benadering. Dit werd het golf-deel dualisme genoemd en speelt een essentiële rol in zijn complementariteitstheorie. Dit laatste hebben we leren kennen als een filosofische notie die door Bohr gehanteerd werd als een noodzakelijk element in kwantummechanische beschrijvingen. Het citaat op pagina's 85-86 verwijst naar de individualiteit (discontinuïteit) van atomaire processen als de grondslag van dit dualisme en behoort op deze wijze eveneens noodzakelijk tot een dergelijke beschrijving. Het is verbazingwekkend hoe snel en efficiënt Bohr erin sloeg een consistent geheel te



ontdekken binnen deze was van ideeën. Hij stond hiervoor bekend. Maar met discontinuïteit werd niet enkel het dualisme verbonden; eveneens het probabilistische karakter van de beschreven kwantumsystemen verwierf hiermee een plaats tussen de essentiële elementen van de beschrijving. Zowel Schrödingers probabiliteitsfunctie als de onbepaaldheidsrelatie geeft hier uitdrukking aan. In deze zin wordt het 'probabiliteitsconcept' opgevat als de onbepaaldheid zoals ze oprijst binnen de relatie beschreven door Heisenberg. Voor probabiliteit in Schrödingers golfvergelijking volstaat de verwijzing naar de notie van 'probabiliteitsfunctie', waarnaar een transmutatie noodzakelijk is vooraleer de vergelijking wezenlijk kwantummechanisch en praktisch bruikbaar wordt. Bohr voorzag, in samenwerking met Heisenberg, de kwantumtheorie van een coherent, samenhangend beeld dat als theorie in de fysica sindsdien bekend werd als de Kopenhagen-interpretatie.

## Referenties

- Bohr, N., '*Atomic theory and the description of nature.*', Cambridge, Cambridge University Press, 1934
- Eddington, A., '*The philosophy of physical science.*', Cambridge, Cambridge University Press, 1949
- Gribbin, J., '*Op zoek naar Schrödingers kat: quantumfysica en de werkelijkheid.*' vert. door P.A. Stoor, Amsterdam, Contact, 1985
- Heisenbergh, W., '*Physics and philosophy: the revolution in modern science.*', derde druk, New York, Harper&Row Publishers, 1966
- Heisenberg, W., 'Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik.', *Zeitschrift für Physik*, (1927) 43
- Heisenberg, W., '*Die Quantenmechanik und ein Gespräch mit Einstein.*' in *Der Teil und das Ganze*, Munich, Piper, 1969
- Jammer, M., '*The philosophy of quantum mechanics: the interpretation of quantum mechanics in historical perspective.*', New York, Wiley, 1974
- McEvoy, J.P., Zarate, O., '*Quantummechanica voor beginners.*', uitgeverij Elmar, Rijswijk, 1999
- Powers, J., '*Philosophy and the new physics.*', New York, Methuen&Co, 1982

## Primaire bibliografie

- Bohr, N., '*Atomic theory and the description of nature.*', Cambridge, Cambridge University Press, 1934
  
- Eddington, A., '*The philosophy of physical science.*', Cambridge, Cambridge University Press, 1949
  
- Einstein, Albert. 'Zur theorie der Brownschen Bewegung'. *Annalen der Physik*, 19 (1906), pp. 371-382
  
- Einstein, Albert. 'Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt'. *Annalen der Physik*, 17 (1905), pp. 132-149
  
- Greene, B., '*The fabric of the cosmos: space, time and the texture of reality.*', New York, New York Times, 2004
  
- Gribbin, J., '*Op zoek naar Schrödingers kat: quantumfysica en de werkelijkheid.*' vert. door P.A. Stoor, Amsterdam, Contact, 1985
  
- Heisenbergh, W., '*Physics and philosophy: the revolution in modern science.*', derde druk, New York, Harper&Row Publishers, 1966
  
- Jammer, M., '*The philosophy of quantum mechanics: the interpretation of quantum mechanics in historical perspective.*', New York, Wiley, 1974
  
- McEvoy, J.P., Zarate, O., '*Quantummechanica voor beginners.*', uitgeverij Elmar, Rijswijk, 1999
  
- Powers, J., '*Philosophy and the new physics.*', New York, Methuen&Co, 1982

## Secundaire bibliografie

- Albert, D. Z., '*Quantummechanics and experience.*', Cambridge, Harvard University Press, 1992
- Greene, B., '*The elegant universe: superstrings, hidden dimensions, and the quest for the ultimate theory.*', New York, New York Times, 1999
- Kaku, M., '*Hyperspace: a scientific odyssey through parallel universes, time warps, and the tenth dimension.*', New York, Oxford University Press, 1994
- Pais, A., '*Subtle is the lord: the science and the life of Albert Einstein.*', Oxford, Oxford University Press, 1983
- Reichenbach, H., '*Philosophical Foundations of Quantum Mechanics.*', Dover, University of California Press, 1998
- Sklar, L., '*Philosophy of physics.*', Oxford, Oxford University Press, 1992
- Smolin, L., '*The life of the cosmos.*', London, Weidenfeld and Nicolson, 1997