



UNIVERSITEIT GENT
FACULTEIT LETTEREN EN WIJSBEGEERTE
VAKGROEP WIJSBEGEERTE
ACADEMIEJAAR 2006-2007

**EEN ONDERZOEK NAAR DE WAARDE VAN DE NATUURFILOSOFIE VAN
ILYA PRIGOGINE EN DE DRAAGWIJDTE ERVAN BINNEN DE DISCUSSIE
ROND DE PIJL VAN DE TIJD EN HET DETERMINISME**



Promotor: Prof. Dr. Philip Van Loocke

Benjamin PRAET

Commissarissen: Prof. Dr. Erik Weber
Dr. Linda Van Speybroeck

Licentiaatsverhandeling ingediend
tot het behalen van de graad
licentiaat in de wijsbegeerte.

Inhoudstafel

1.	INLEIDING	6
1.1	Woord vooraf en dankwoord	6
1.2	Achtergrond bij de scriptie	7
1.3	Probleemstelling, opzet en doelstelling	10
2.	DE FYSICA EN CHEMIE BIJ ILYA PRIGOGINE, GEKADERD BINNEN ZIJN NATUURFILOSOFIE	12
2.1	Synopsis van het uitgangspunt en het globale standpunt van Ilya Prigogine	12
2.2	Wetenschappelijk en filosofische achtergrond	14
2.2.1	Het project van Ludwig Boltzmann	14
2.2.2	Henri Bergson en Alfred Whitehead	16
2.3	Een zicht op de onomkeerbaarheid van de tijd	19
2.3.1	Het besef van de relevantie van de irreversibiliteit en de opdracht die dit met zich meebrengt	19
2.3.2	Stabiele en instabiele systemen en de ensembletheorie	20
2.3.3	Niet-integreerbaarheid, resonanties en wat dit met zich meebrengt	22
2.4	Systemen uit evenwicht: dissipatieve structuren, zelforganisatie en bifurcaties	25
2.4.1	De context van dissipatieve structuren	25
2.4.2	Chemische oscillatie en zelforganisatie	26
2.4.3	Bifurcatiepunten	26

2.5	De wetten van de dynamica op het statistische niveau	27
2.5.1	Markovprocessen en de nood aan verenigbaarheid met de klassieke dynamica	27
2.5.2	Correlaties	28
2.5.3	Chaotische afbeeldingen	30
2.5.3.1	<i>De Bernouilli-afbeelding en de richting van de tijd</i>	30
2.5.3.2	<i>Operatoren en eigenfuncties</i>	31
2.5.3.3	<i>De spectrale representatie van de operator</i>	32
2.5.3.4	<i>De bakkerstransformatie</i>	32
2.5.3.5	<i>Enkele conclusies</i>	34
2.5.4	Instabiliteit in de klassieke mechanica	34
2.5.5	Het dynamische probleem op het statistische niveau	36
2.6	De rol van de kwantummechanica binnen de natuurkunde van Prigogine	36
2.6.1	Enkele relevante principes binnen de kwantummechanica	36
2.6.2	Het subjectieve karakter van de kwantummechanica de rug toegedraaid	38
2.6.3	Het eigenwaardeprobleem	39
2.7	De interactie tussen mens en natuur	40
2.8	Kosmologie bij Prigogine	42
2.9	Slotbeschouwing over het project van Prigogine	43
3.	SECUNDAIRE AUTEURS OVER HET WERK VAN ILYA PRIGOGINE	45
3.1	Inleiding	45
3.2	David Bohm en ambiguïteit	46
3.2.1	Bedenkingen van David Bohm over het project van Prigogine	46
3.2.2	Bespreking en bemerkingsen	48

3.3	Een bevraging door Peter Gunter	49
3.3.1	Enkele vragen van Peter Gunter aan het adres van Ilya Prigogine	49
3.3.2	Een antwoord van Ilya Prigogine	50
3.3.3	Bespreking en bemerkingsen	51
3.4	Een bedenking van de evolutiebioloog John Maynard Smith	52
3.4.1	De invloed op de biologie	52
3.4.2	Bespreking en bemerkingsen	54
3.5	De kritische blik van Cosma Shalizi	55
3.5.1	Prigogine algemeen bekeken	55
3.5.2	Een korte blik op dissipatieve structuren	57
3.5.3	Bespreking en bemerkingsen	58
3.6	Bricmont	59
3.6.1	Jean Bricmont en de notie ‘baan’	59
3.6.2	Irreversibiliteit	61
3.6.3	Het recurrentietheorema van Poincaré	63
3.6.4	Ergodiciteit	63
3.6.5	Bespreking en bemerkingsen	64
3.7	Besluit	66
4.	DE PIJL VAN DE TIJD, PRO EN CONTRA	67
4.1	Inleiding	67
4.2	Het KteV- en CPLEAR-experiment	69
4.2.1	De experimentele opzet	69
4.2.2	Bespreking en bemerkingsen	70

4.3	Paul Davies over de pijl van de tijd	72
4.3.1	Het alternatief van Davies	72
4.3.2	Bespreking en bemerkingen	74
4.4	Victor Stenger en zijn tijdloze realiteit	75
4.4.1	Zigzaggen	75
4.4.2	Bespreking en bemerkingen	77
4.5	Robert Bishop	80
4.6	Het symmetrische alternatief van Huw Price	81
4.6.1	‘ μ Independence’ en tijdssymmetrie op microniveau	81
4.6.2	Thermodynamisch gepuzzel	86
4.6.3	Chaostheorie	89
4.6.4	Bespreking en bemerkingen	90
4.7	Besluit	90
5.	DETERMINISME	93
5.1	Inleiding	93
5.2	Determinisme en voorspelbaarheid	95
5.3	Determinisme en chaostheorie	96
5.3.1	Inleidende beschouwing	96
5.3.2	Argumentatie tegen het verband tussen chaostheorie en determinisme	98
5.4	Indeterminisme	100
5.5	Determinisme en de pijl van de tijd	102
5.6	Irrationale getallen	107

5.6.1	Wiskunde op de bres tegen determinisme	107
5.6.2	Bespreking en bemerkingen	108
5.7	Besluit	110
6.	CONCLUSIE EN EINDBESCHOUWINGEN	112
	APPENDIX	116
	BIBLIOGRAFIE	118

1. Inleiding

1.1 Woord vooraf en dankwoord

Ik zou graag van deze gelegenheid gebruik maken om alle mensen te bedanken die me geholpen en gesteund hebben bij het tot stand komen van deze scriptie.

In de eerste plaats ben ik mijn promotor Prof. Dr. Philip Van Loocke dankbaar voor het opvolgen van deze licentiaatsverhandeling en voor het advies en de raad die ik kreeg om dit project in goede banen te leiden. Ik ben hem ook erkentelijk voor de introductie tot het boeiende domein dat wetenschapsfilosofie is. Ook Dr. Linda Van Speybroeck en Prof. Dr. Erik Weber wil ik bedanken voor de interesse die ze betoonden door het op zich nemen van het commissarisschap.

Speciale dank gaat ook uit naar dhr. Stuart Kauffmann, professor aan de Universiteit van Calgary en medewerker aan het befaamde Santa Fé-instituut in New Mexico, en dhr. Cosma Shalizi, verbonden aan het Departement voor Statistiek aan de Carnegie Mellon University, omdat ze zich de moeite namen in te gaan op mijn correspondentie. De zaken waarover Kauffmann me berichtte bleken uiteindelijk jammer genoeg niet relevant voor deze scriptie en zijn er dus, op één opmerking na, niet in opgenomen.

Ik wil ook graag mijn familie en vrienden bedanken die de ontwikkeling van deze scriptie van bij aanvang met belangstelling gevolgd hebben, in het bijzonder mijn ouders Roger en Chris en mijn vriendin Evelien voor het nalezen, corrigeren van foutjes en de steun.

Dit is ook het gepaste moment om mijn medestudenten uit de 2^e licentie wijsbegeerte te vermelden voor de eindeloze maar immer boeiende discussies die we doorheen de jaren voerden en die ons allen verrijkten.

Tenslotte nog een woordje van dank voor alle docenten van de vakgroep wijsbegeerte die mijn ideeën hielpen vormen met hun diverse invalshoeken. Sommige zaken lagen me

meer dan andere, maar de veelheid aan domeinen en bijhorende opinies kwam de meerwaarde alleen maar ten goede.

Benjamin Praet

29 juli 2007

1.2 Achtergrond bij de scriptie

In de eerste kandidatuur kwam ik voor het eerst echt in aanraking met het onderzoeksdomein van de wetenschapsfilosofie. Tot voordien had wijsbegeerte in mijn ogen steeds een uitgesproken metafysisch karakter, begaan met zingeving, maar duidelijk onderscheiden van de wetenschappelijke vakgebieden. Dan leerde ik opeens hoe zinvol het kan zijn om deze vraagstukken te integreren in de zogenaamde harde wetenschappen. Deze unificatie en interactie maakt een vruchtbare discussie mogelijk waarbij wijsbegeerte kan voortbouwen op wetenschappelijke progressie en de wetenschap ruimdenkend en open kan blijven door te vissen in de kweekvijver van wijsgerige creativiteit. Maar het meest fascinerende was misschien wel de aantrekkingskracht die uitging van de soms bijna absurde onderwerpen die binnen dit ruime vakgebied aan de orde zijn: van een analyse van het zelf van de mens over de mogelijke ontkenning van de tijd tot parallelle universa.

Het is vanzelfsprekend dat sommige thema's meer aandacht krijgen dan andere. Het hoeft daarom niet zo te zijn dat deze intrinsiek interessanter zijn of meer deduceerbare hypothesen toelaten dan onderzoek binnen andere thema's. Eerder spreken ze een breed publiek aan door zich te wentelen in een quasi-romantisch imago. Vaak gaan ze ook gepaard met een schijnbare eenvoud. Velen voelen zich dan direct op deze kwesties betrokken en denken dat een persoonlijke argumentatie meteen al onderbouwd is en een meerwaarde heeft. Dit is ook de reden waarom er over dergelijke onderwerpen al bibliotheken volgeschreven zijn. En dit is meteen ook de reden waarom er over weinig onderwerpen zoveel nietszeggende, verwarrende of eenvoudigweg onbeargumenteerde zaken geschreven zijn.

Bovenstaande uiteenzetting is in grote mate van toepassing op het determinisme. Vooral wanneer dit aan de discussie over de vrijheid van de wil gekoppeld wordt, lijkt iedereen

er zijn zegje over te willen doen. Ook over het statuut van de tijd is al menig inkt gevloeid.

Toch zijn dit net twee cruciale onderwerpen van deze scriptie. Ook op mij hadden ze de invloed van een sirenegezing. Laat ik dus maar meteen aan bovenstaand – eerder negativistisch klinkend – betoog enkele nuances toevoegen. Eerst en vooral impliceert de overdaad aan publicaties over deze onderwerpen niet dat er überhaupt niets zinnigs over kan gezegd worden. Vervolgens is het niet zo dat ik de indruk wil wekken door de waarde van vele dergelijke publicaties in twijfel te trekken, dat ik met hét antwoord voor de dag wil komen of iedereen er op wil wijzen hoe het wél moet. Ik zal me eerder bescheiden opstellen door niet tot definitieve en afgesloten stellingen te concluderen.

Door de hoger vermelde veelheid aan publicaties hieromtrent, was er nood aan een concreet vertrek- en aanknopingspunt. Ik koos voor het werk van de chemicus Ilya Prigogine.¹ Deze wetenschapper beschouwde zichzelf steeds als een filosoof van nature. Hij aarzelde dan ook nooit om aan zijn bevindingen wijsgerige conclusies toe te schrijven. Zo was de pijl van de tijd, in al zijn aspecten, de leidraad doorheen zijn hele (academische) leven en meende hij van daaruit antwoorden te kunnen bieden op de deterministische kwestie.

Prigogine leek mij dus een dankbaar en fascinerend startpunt. Ook in de 1^e licentie werkte ik reeds rond hem voor het vak ‘Wijsbegeerte van Moderne en Hedendaagse Tijden – sectie Informatietheorie’. Toen schreef ik een paper waarin ik theorieën van Prigogine naast de studie naar ‘randomness’ van de wiskundige Gregory Chaitin legde. Binnen deze gepopulariseerde onderwerpen is het opmerkelijk hoe weinig aandacht het project van Prigogine lijkt te krijgen, zelfs al schatte hij de potentiële impact van zijn conclusies zelf groot in en suggereerde hij het Prigoginianisme als oplossing voor vele vraagstukken. Ook dit is een reden waarom ik voor Ilya Prigogine opteerde.

In de Volkskrant van 28 maart 1998 schreef Ad Lagendijck in zijn column:

¹ Voor de vogelliefhebbers: er bestaat binnen de familie van de kerkuilen een zeldzame soort die de Prigogine-uil (*Tyto prigoginei*) noemt. Deze is echter niet genoemd naar Ilya, maar naar zijn broer Dr. Alexander Prigogine.

“Dat wij daarvan zo weinig merken, komt omdat de media meer geïnteresseerd zijn in kleurrijke buitenbeentjes dan in integere wetenschappers. Maar met Prigogine is het nog erger. Niet alleen de media, maar ook de maatschappelijke elites dwepen met hem.”

Met de ‘integere wetenschappers’ verwijst Lagendijck naar de critici van Prigogine. Het deed Lagendijck namelijk deugd te vernemen dat er blijkbaar toch een hele groepering bestond die zich als anti-Prigogine geëngageerd had, met Jean Bricmont op kop. Hij betreurde wel het gebrek aan aandacht dat deze critici krijgen, ten voordele van Prigogine zelf. Echter, de figuurlijke spotlichten die op Prigogine gericht zijn, lijken me ferm overdreven. En als Prigogine al een maatschappelijk aanknopingspunt zou zijn, impliceert dit nog niet dat zijn theorieën inhoudelijk op belangstelling kunnen rekenen binnen het wetenschappelijk domein. Wat het gebrek aan forum voor de critici betreft, dit nodigt misschien eerder uit tot conclusies omtrent de waarde van hetgeen deze te vertellen hebben. Maar het is nog te vroeg om hier reeds oordelen te vellen.

Wel moet gezegd worden dat de invloed die Prigogine en zijn theorieën hebben, van uiteenlopende aard is. Zowel wetenschappers, filosofen als meer spirituele denkers en zelfs New Age-bewegingen kunnen iets met deze thematiek aanvangen.

Op het moment van dit schrijven dook Prigogine ook op in het door Knack samengesteld lijstje van 30 belangrijkste / meest invloedrijke Belgen.² De introductie van zijn voorstelling blokletterde ‘Vader van de chaostheorie!’, alsof Poincaré nooit bestaan heeft.

Het werk van Prigogine en de verdere discussies over de pijl van de tijd zijn in wezen heel wiskundig van aard en vaak moeilijk te begrijpen voor iemand die in deze domeinen niet technisch is aangelegd. Ik zal deze technische details echter hoofdzakelijk achterwege laten en de zaken in heldere taal trachten weer te geven.

Veel zaken en fenomenen die we onderweg zullen tegenkomen, dienen tegenwoordig als stof voor de populaire ontspanningscultuur, vooral in de filmwereld. Een groepje mensen raakt in de knoei met de tijd in ‘Cube 2: Hypercube’. Instabiele dynamische systemen en chaotische systemen vormen dan weer het fundament voor ‘The Butterfly Effect’ en het Duitse ‘Lola Rennt’.

² A. LUYTEN, “Ilya Prigogine”, in: *Knack*, 2007, 28-29, pp. 30-31.

1.3 Probleemstelling, opzet en doelstelling

In een eerste deel schets ik de theorie van Ilya Prigogine. Om het overzichtelijk en consistent te houden, geef ik een volledig beeld weer, vertrekkend van enkele belangrijke invloeden van Prigogine en eindigend bij een (beknopte) kosmologische beschouwing en enkele wijsgerige gevolgen. Daartussen besteed ik aandacht aan Prigogine zijn werk rond systemen uit evenwicht en de zoektocht naar intrinsieke onomkeerbaarheid. Dit deel kan dan misschien niet zo boeiend lijken, het is wel noodzakelijk om te weten waar het project Prigogine voor staat en om verder te kunnen gaan.

In een tweede luik bespreek ik enkele critici van Prigogine. We kunnen ons dan afvragen in hoeverre deze het project van Prigogine dwingen tot nuancering, of sterker nog, herziening. Voegen die bemerkingen iets toe aan Prigogine z'n werk, of komen ze slechts voort uit onbegrip van hiervan? En zijn ze relevant, of staren ze zich blind op een detail naast de kwestie? Met hetgeen we hieruit overhouden, gaan we over naar een volgend niveau.

In het derde deel komt het statuut van de tijd aan bod. Eerst en vooral heeft dit begrip nood aan een genuanceerde invulling. Dit brengt reeds enkele vragen met zich mee. Vervolgens bekijk ik enkele standpunten – zowel pro's als contra's – omtrent deze pijl van de tijd. De vraag stelt zich dan of ze capabel zijn om Prigogine zijn standpunt te ondersteunen, dan wel te ondermijnen. Is het ook niet zo dat veel moeilijkheden, verwarringen en onenigheden voortkomen uit onbegrip of foutieve interpretaties? Mag een bepaalde bevinding over de pijl van de tijd zomaar een objectief en unificerend statuut innemen? En zelfs als we aannemen dat Prigogine z'n geponeerde fundamentele onomkeerbaarheid volledig correct zou zijn, vertelt dit ons dan uiteindelijk iets meer over dé pijl van de tijd en de eigenschappen van tijd?

Het vierde deel betreft voorgaande onderwerpen op het determinisme. De hamvraag hierbij is natuurlijk of de zaken die we gezien hebben ons daadwerkelijk iets meer over het determinisme kunnen vertellen, zoals maar al te vaak graag wordt aangenomen.

Prigogine meende alleszins een relatie tussen bovenstaande thematiek en het determinisme te mogen veronderstellen.

Ik wil hierbij tot slot nog vermelden dat ik meermaals veelvuldig gebruik maak van citaten. Ik parafraseer natuurlijk ook hele stukken tekst en destilleer er belangrijke zaken uit, maar vaak zijn bepaalde kernstellingen, conclusies of standpunten dermate krachtig en treffend uitgedrukt door de auteur zelf, dat het een oneconomische zaak zou zijn om er aan te sleutelen.

2. De fysica en chemie bij Ilya Prigogine, gekaderd binnen zijn natuurfilosofie

“Pak iets aan voordat het een probleem is. Schep orde voordat de chaos intreedt.”

Lao-Tse

2.1 Synopsis van het uitgangspunt en globale standpunt van Ilya Prigogine

De Belgische fysicus en chemicus Ilya Prigogine³ ontving de Nobelprijs voor Scheikunde in 1977 voor zijn bijdrage tot de irreversibele thermodynamica. Prigogine, een leerling van Théophile de Donder, die een thermodynamische school in Brussel opzette, neemt het vraagstuk van de tijd als vertrekpunt en tevens als steeds terugkerende rode draad. Dit valt vooral uitgesproken te bemerken in zijn meer gepopulariseerde werken ‘Orde uit Chaos’, ‘Tussen Tijd en Eeuwigheid’ en ‘Het Einde van de Zekerheden’; werken waarin hij zijn bevindingen verhelderend bundelt en waarbij hij er, vooral in deze laatste twee, wijsgerige kanttekeningen aan toevoegt. Vanuit de problematiek van de tijd kan onze verhouding tot de werkelijkheid beschouwd worden en het statuut van onze kennis en krijgen we ook een zicht op het dilemma van het determinisme, met bijhorend vraagstuk van de vrije wil.

De tijd staat centraal in ons bestaan. Sterker nog: “[...] *il semble établi que la flèche du temps donne à l’Univers son unité.*”⁴ Toch merken we hoe de tijd vroeger fundamenteel genegeerd werd: in de klassieke Newtoniaanse mechanica en zelfs in de relativiteitstheorie en de kwantummechanica. Steeds was er geen plaats voor een onderscheid tussen verleden en toekomst. Zelfs Einstein benadrukte het illusoir karakter van de tijd.

³ Voor een (academische) biografie: zie appendix.

⁴ I. PRIGOGINE, “Le futur n’est pas donné”. In: I. PRIGOGINE (ed.). *L’homme devant l’incertain*. Paris, Editions Odile Jacob, 2001, 377, p. 27.

*“De gangbare natuurkunde wil de pijl van de tijd niet zien. Daarvoor heeft ze zelfs een truc bedacht. Men maakt een rigide onderscheid tussen fundamentele wetenschap en de wereld van de fenomenen.”*⁵

Toch speelt het verloop van de tijd een belangrijke rol, zowel in ons eigen leven als in verscheidene takken van de wetenschap. *“Hoe kan de pijl van de tijd tevoorschijn komen in een wereld waaraan de fysica de eigenschap toeschrijft van symmetrie in de tijd?”*⁶, zo formuleert Prigogine zijn zogenaamde ‘paradox van tijd’, iets wat hem zijn hele leven bezighield. Prigogine stelt de onomkeerbaarheid als een essentieel kenmerk van de natuur centraal en kent een reëel statuut toe aan de pijl van de tijd. Vooral sinds Boltzmann was die pijl van de tijd ondergebracht bij de fenomenologie, zodat hij kon opgevat worden als een subjectieve creatie van onszelf als waarnemers. Tijd die verandering, evolutie en onomkeerbaarheid uitdrukt, bestond dus niet. Tegenwoordig, en dan vooral sinds Prigogine, wordt er aan de pijl van de tijd een constructieve, objectieve rol toegeschreven. Zo is onomkeerbaarheid niet langer iets wat zou verdwijnen bij een volmaakte kennis. Zoals hij het zelf samenvat: *“Wij zijn het niet die de pijl van de tijd doen ontstaan. Integendeel, wij zijn de kinderen van de pijl van de tijd.”*⁷ Zoals we later nog zullen zien, spelen de ontwikkeling van de niet-evenwichtsfysica, met nieuwe begrippen zoals zelforganisatie en dissipatieve structuren en het onderzoek naar instabiele dynamische systemen hierin een belangrijke rol, naast de chaostheorie. Fluctuaties en instabiliteit blijken uitermate relevant geworden te zijn en hierbij ook het begrip van meervoudige keuzemogelijkheden. Zekerheid lijkt verdwenen en wordt vervangen door waarschijnlijkheid. Door dit karakter te benadrukken zal Prigogine zich ook afwenden van het determinisme en de ‘hypothese van het indeterminisme’ ondersteunen die de oorsprong van zowel de eenheid als de diversiteit in de wereld is. Het vraagstuk van de tijd brengt ook de zoektocht naar de betekenis van de ‘big bang’ mee. We kunnen ons afvragen of tijd toen begonnen is, of reeds ervoor bestond. Zo fixeert Prigogine zich op de wetenschap van het ‘worden’. Prigogine is zich er hier van bewust dat hij een zekere consequentie moet doorvoeren, want

⁵ I. PRIGOGINE, “De pijl van de tijd bestaat echt”, in: *Filosofiemagazine*, nr. 3, 1997, s.p.

⁶ I. PRIGOGINE, *Het einde van de zekerheden: tijd, chaos en de natuurwetten*, Tielt, Lannoo, 1996, p. 9.

⁷ I. PRIGOGINE, *Het einde van de zekerheden*, p. 11.

“[...] de onomkeerbare tijd kan niet ‘ontstaan’ binnen een omkeerbare werkelijkheid. Ofwel zullen we uiteindelijk de onomkeerbare tijd op alle niveaus tegenkomen, ofwel zullen we hem nergens kunnen begrijpen.”⁸

Er is dus een duidelijke spanning zichtbaar, want ook al slagen de klassieke theorieën er in sluitende prestaties neer te zetten, toch geven ze geen beeld van de werkelijkheid zoals die ervaren wordt. Uit onze ervaringsgegevens leren we bijvoorbeeld hoe een plas water nooit terug regen wordt, melk in koffie niet terug ontmengd raakt,... Deze processen verlopen zodanig dat er steeds een toename van de entropie plaatsvindt. Dit wordt duidelijk geformuleerd in de Tweede Hoofdwet van de thermodynamica en zo wordt meteen ook een richting van de tijd vastgelegd. Ook hierover later meer.

2.2 Wetenschappelijke en filosofische achtergrond

Zonder alle theorieën en individuen te vermelden die aan Prigogine vooraf gingen en reeds (deels) in dezelfde richting wezen of een voedingsbodem voor hem kunnen betekend hebben, beperk ik me in deze sectie tot enkele figuren die een duidelijke stempel op Prigogine z'n werk gedrukt hebben. Verder in deze scriptie zullen we nog enkele andere figuren tegenkomen die een min of meer belangrijk rol hebben gespeeld, zoals bijvoorbeeld Lars Onsager.

2.2.1 Het project van Ludwig Boltzmann

Een bespreking van Prigogine en een begrijpen van de hele problematiek rond het probleem van de tijd is vruchteloos zonder vermelding van het werk van de reeds hoger vernoemde Weense fysicus Ludwig Boltzmann. Als kind van de 19^e eeuw werd ook hij geconfronteerd met de twee tegenstrijdige visies op de natuur die toen heersten. Enerzijds zijn er de wetten van Newton, verbonden met een statisch heelal, anderzijds zijn er de beschrijvingen waarin evolutie een plaats krijgt en (de toename van) entropie een rol speelt.⁹ De Duitse wiskundige en fysicus Rudolf Clausius introduceerde het begrip entropie en bracht dit in verband met de door hemzelf zo geformuleerde Tweede Hoofdwet van de thermodynamica¹⁰. Zo verkreeg de tijd een richting¹¹ en was het

⁸ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid: de nieuwe plaats van de mens in de natuurwetenschap*, Amsterdam, Bakker, 1989, p. 14.

⁹ G. BODIFÉE, *Ruimte voor vrijheid*, Kapellen, Uitgeverij Pelkmans, 1988, p. 93.

¹⁰ De entropie van een geïsoleerd systeem uit evenwicht zal steeds toenemen.

onderscheid tussen omkeerbaar¹² en onomkeerbaar uitgesproken. Deze problematische tegenstrijdigheid stond centraal bij Boltzmann. Belangrijk hierbij was de figuur van Darwin. Deze laatste gaf aan evolutie een fundamentele waarde. Zoals Prigogine het belang van Darwin in deze context samenvat:

*“Darwin toonde aan dat het de studie van populaties was, op lange termijn bekeken, en niet de studie van individuen, die toeliet te begrijpen hoe individuele variabiliteit, onderworpen aan een selectieproces, kon leiden tot veranderingen van levende soorten.”*¹³

Zo ook wou Boltzmann afstappen van het beschrijven van de banen van de afzonderlijke deeltjes om aan te tonen dat de onveranderlijkheid slechts schijn is en er evolutie heerst op een fundamenteel beschrijvingsniveau. Boltzmann was zich zelfs reeds bewust van een verband tussen willekeurigheid en onomkeerbaarheid.¹⁴ Hij wou aantonen dat het effect van botsingen van grote groepen deeltjes de onomkeerbaarheid binnen de thermodynamica kan bewerkstelligen, om in de fysica hetzelfde resultaat te bekomen als dat welke Darwin in de biologie had bereikt. Hij stelde zijn beroemde H-theorema op die de entropie voor een onomkeerbaar proces uitdrukt op microniveau. Inhoudelijk heeft het betrekking op de botsingen tussen deeltjes van een systeem en hun invloed op de snelheid en de positie van die deeltjes. Onder invloed van dit proces zal de waarde van de functie afnemen tot een minimum. Op dat moment is er een evenwicht bereikt dat niet meer zal veranderen en elke oorspronkelijke afwijking van de statistische gelijkmatige verdeling geëlimineerd heeft, en dit alles via een onomkeerbare ontwikkeling.¹⁵

Er kwam echter bijna direct een hele hoop kritiek op de bevindingen van Boltzmann. Al snel bleek dat een afname van de entropie en een toename van de oorspronkelijke ongelijkheden eveneens tot de realistische mogelijkheden behoorde. Uiteindelijk is het niet mogelijk uit te maken of een botsing naar de toekomst dan wel naar het verleden gaat, zoals ook Poincaré fundamenteel opmerkte.¹⁶ De Oostenrijkse fysicus en chemicus Loschmidt maakte met zijn omkeerbaarheidsparadox duidelijk dat het niet mogelijk is

¹¹ Het verband tussen entropie en de pijl van de tijd werd uitgesproken gelegd door Arthur Eddington, een Britse astrofysicus; leefde van 1882 tot 1944.

¹² Voor een voorbeeld van een omkeerbaar systeem kan men de beweging van een geïdealiseerde slinger bekijken. In zo'n systeem blijft de entropie constant.

¹³ I. PRIGOGINE, *Het einde van de zekerheden*, p. 22.

¹⁴ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos: de nieuwe dialoog tussen de mens en de natuur*. Amsterdam, Bakker, 1985, 352, p. 44.

¹⁵ G. BODIFÉE, *Ruimte voor vrijheid*, pp. 93-96.

¹⁶ D. RUELLE, *Chance and chaos*. New Jersey, Princeton University Press, 1991, pp. 48-49.

een onomkeerbaar proces af te leiden uit een dynamica die symmetrisch is in de tijd.¹⁷ Ook het bezwaar van de Duitse wiskundige en filosoof Zermelo bleek uitermate frappant. Zoals Prigogine het formuleert in ‘Orde uit Chaos’:

*“[...] zijn de symmetrie-eigenschappen voor de bewegingsvergelijking die Boltzmann voor de verdelingsfunctie afleidde in strijd met die van de dynamica. Boltzmann kan entropie dus niet uit de dynamica hebben ‘afgeleid’. [...] Zijn resultaat kan dus hoogstens een fenomenologisch model zijn dat, hoe nuttig het ook is, geen enkel direct verband heeft met de dynamica.”*¹⁸

Boltzmann leek dus gefaald te hebben in zijn opzet. Zijn theorema was verbonden met een macroscopische en benaderende beschrijving en was er dus niet in geslaagd een fundamentele waarde aan de onomkeerbaarheid toe te kennen. Dit kwam omdat het in contrast was met een basisprincipe van de dynamica; een principe dat ook kan beschreven worden door ‘het principe van de voldoende grond’ van Leibniz, wat de gelijkwaardigheid tussen volledige oorzaak en geheel gevolg weergeeft. Aldus gaf hij zijn dynamische interpretatie van de Twee Hoofdwet van de thermodynamica op omdat deze steeds gepaard ging met een omgekeerde evolutie.

Prigogine merkt op dat deze kritieken op Boltzmann tegenwoordig veel aan kracht hebben ingeboet. Zo maken ze gebruik van eerder vage termen zoals ‘volledige’ oorzaak en hadden ze nog geen weet van instabiele dynamische systemen.¹⁹ Daarom is het mogelijk, volgens Prigogine, om het opzet van Boltzmann opnieuw te bekijken met een vruchtbaarder resultaat. Zo kunnen de waarschijnlijkheden waarvan Boltzmann gebruik maakte door de instabiele dynamica een intrinsieke waarde krijgen en hoeven ze niet langer afgeschilderd te worden als gevolg van onwetendheid.

2.2.2 Henri Bergson en Alfred Whitehead

Een prominente invloed op Prigogine was de Franse filosoof Henri Bergson, door Russell ‘een prachtige illustratie van de rebellie tegen de rede’ genoemd.²⁰ Belangrijk zijn diens ideeën zoals uiteengezet in ‘L’*évolution créatrice*’. Bergson stelde zich de vraag wat de natuurwetenschappen ons kunnen onthullen over de realiteit die we zo vaak als objectief aannemen. De natuurwetenschap heeft inderdaad steeds voor bruikbare

¹⁷ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, p. 32.

¹⁸ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, p. 260.

¹⁹ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, p. 32.

²⁰ B. RUSSELL, *Geschiedenis van de westerse filosofie*, Cothen, Servire Uitgevers, 1990, p. 820.

resultaten gezorgd wanneer deze zich richtte op de (geïdealiseerde) processen waarbij tijd kan genegeerd of geëlimineerd worden. Maar het is pas wanneer de natuurwetenschap de tijd incorporeert als scheppend geheel en het fenomeen van het ‘worden’ tracht te kaderen, dat ze tekort schiet. Bovendien is de natuurwetenschap in de eerste plaats een middel om de wereld rondom ons uit te buiten.

De natuurwetenschap houdt zich in feite steeds met de notie ‘ruimte’ bezig, die homogeen is. Beweging is hier niet meer dan een opeenvolging van verschillende configuraties, waarbij men bijna willekeurig van één punt naar een ander kan gaan; wording is herhaling van hetzelfde, dit alles verbonden door deterministische wetten. De tijd echter is niet homogeen en omkeerbaar. Dit is niet de tijd van het ‘zijn’, zoals de natuurwetenschappen die opvatten, maar de tijd van het ‘worden’. Dit is de sfeer van creatie en vernieuwing.²¹

Bergson verbond het verstand met de ruimte. Het materiële is dus object van het verstand. Dit is het orgaan van de ‘homo faber’, de handelende mens. Maar zoals reeds gezegd, ontleedt het verstand de tijd zodanig dat deze haar ware kern niet kan vatten. Om het worden te begrijpen is er dus nood aan iets anders en het is hier dat Bergson een taak weggelegd ziet voor de intuïtie, de zuivere beschouwing.²² Het is de ‘homo sapiens’ die hiervan gebruik maakt. De moderne mens echter is zo verknocht aan het gebruik van het verstand, dat het hem lastig valt zich hiervan te bevrijden. Dit is nodig, wil de mens ten volle de natuur begrijpen waarvan hij deel uitmaakt en waarmee hij geheel verstrengeld is. Want onze intuïtie maakt de weg vrij voor de ervaring van de doorleefde / beleefde / geleefde tijd. Zo komen we tot begrip van de ontwikkeling van de dingen.²³

Prigogine merkt op dat de natuurwetenschappen zoals bekritiseerd door Bergson een té dogmatisch en statisch karakter krijgen. Prigogine zal trachten het ‘worden’ in de natuurwetenschappen in te lijven, daar waar Bergson het verstand en de intuïtie tegenover elkaar plaatste en als onverenigbaar beschouwde en waarbij hij hoopte in die intuïtie een duchtige concurrent voor de wetenschappelijke kennis gevonden te hebben. Hierbij zal Prigogine gebruik maken van het scheppende potentieel dat in de natuurwetenschappen als menselijke werktuig aanwezig is. “*We zullen ons op het*

²¹ B. RUSSELL, *Geschiedenis van de westerse filosofie.*, pp. 821-823.

²² *Ibid.*, p. 824.

²³ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, pp. 111-113.

*standpunt stellen dat de natuurkunde geen model is, maar een creatief ‘interface’ tussen de mensen en de wereld van de verschijnselen.”*²⁴

Zo kunnen dat wat beschreven wordt en diegene die beschrijft, verenigd worden. Toch dient er genuanceerd te worden dat ook Bergson er zich van bewust was dat de intuïtie geen volledige kennis oplevert en zowel intuïtie als verstand elk deels de werkelijkheid raken. De intuïtie kan dus geen geheel systeem opleveren en zal zo steeds onvolledig blijven. Zij is een concentratie die aandachtig tracht door te dringen in het wezen van de dingen en *“Une intuition qui prétend se transporter d’un bond dans l’éternel s’en tient à l’intellectuel.”*²⁵ Zo kan men een alsmar groter beeld van dat facet van de werkelijkheid krijgen dat niet in wetenschappelijke terminologieën kan gegrepen worden, ook al is de keerzijde dat ook de intuïtie, wil ze communiceerbaar zijn, van taal zal moeten gebruik maken.

Bergson zijn op intuïtie gebaseerde metafysica faalde echter door zijn té eenzijdige beschouwing van wetenschap in het algemeen. Prigogine zal het belang van het ‘worden’ als diepste ervaring van onszelf en onze verbinding met de wereld betrekken op de natuurwetenschappen, maar zal zoals Bergson onderstrepen dat het mogelijke rijker is dan het reële.

Ook Alfred Whitehead, beïnvloed door Bergson, ging op zoek naar de diepere betekenis van de tijd. *“Een saaie bedoening, geluidloos, reukloos, kleurloos, slechts de jachtige materie, eindeloos, betekenisloos.”*²⁶ zo zag Whitehead de klassieke natuurkundige opvattingen. Whitehead wou eveneens de beleefde menselijke ervaring een realistisch, fysisch bestaan toekennen, hij wou deze opvatten als behorend tot de natuur zelf. In tegenstelling tot Bergson echter plaatste hij de eerder intuïtieve filosofie en de positieve wetenschap niet tegenover elkaar.

*“Het lag in zijn bedoeling een begrippenkader te vinden waarbinnen het probleem van de menselijke ervaring en de fysische processen systematisch kon worden behandeld, en om de voorwaarden te bepalen die nodig waren om alle vormen van ervaring te typeren, die van stenen tot en met die van de mens.”*²⁷

²⁴ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, p. 23.

²⁵ H. BERGSON, *La pensée et le mouvant*, url: http://classiques.uqac.ca/classiques/bergson_henri/pensee_mouvant/pensee_mouvant.html, s.p.

²⁶ Geciteerd in: I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, p. 114.

²⁷ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, p. 115.

Binnen dit universeel kader trachtte hij bestendigheid met evolutie te verzoenen, omdat hij goed beseftte dat wanneer de theorie van het worden alleenrecht verkreeg, individuele entiteiten genegeerd zouden worden en de filosofie ditmaal van de andere kant eenzijdig zou ondermijnd worden.

2.3 Een zicht op de onomkeerbaarheid van de tijd

2.3.1 **Het besef van de relevantie van de irreversibiliteit en de opdracht die dit met zich meebrengt**

De natuurkunde zou zich dus capabel moeten weten om een formulering te geven van de instabiele en evoluerende wereld waarin wij leven. Belangrijk om op te merken is dat de onomkeerbaarheid niet langer uitsluitend met de toename van wanorde (en dus entropie) kan verbonden worden. Recent blijkt namelijk (bijvoorbeeld bij de studie van systemen uit evenwicht) dat de zogenaamde pijl van de tijd ook een bron van orde kan zijn.

Onomkeerbaarheid kan dus zowel tot orde als tot wanorde leiden. Bij ver-uit-evenwichtssystemen is de rol van de irreversibiliteit zelfs nog opzichtiger. Het is pas hier dat het bestaan van het leven mogelijk is. En het is juist door die onomkeerbaarheid dat de natuur de complexiteit kan bekomen die we rondom ons waarnemen. Het systeem evolueert spontaan naar een stationaire niet-evenwichtstoestand die een grotere complexiteit kan waarborgen dan het overeenkomstige evenwicht. *“In het voorbeeld van de thermische diffusie komt die grotere complexiteit overeen met een gedeeltelijke scheiding van de samenstellende stoffen, als het ware alsof ze gesorteerd worden.”*²⁸ Zo zijn er meerdere processen waarbij de irreversibiliteit ordening opwekt die onmogelijk bleek bij het evenwicht.

Bij een systeem in evenwicht (bijvoorbeeld een geïsoleerd systeem) nemen zowel de entropie als de ‘vrije energie’ extreme waarden aan; de eerste maximaal, de twee minimaal. Dit zorgt ervoor dat een fluctuatie geen cruciaal effect zal hebben en een terugkeer naar het evenwicht bij een dergelijke verstoring het geval zal zijn.²⁹ Bij systemen die zich ver uit evenwicht bevinden is het niet vanzelfsprekend dat fluctuaties getemperd zullen worden, omdat zowel de vrije energie als de entropie niet naar een extreme waarde streeft. *“Het is alleen nog mogelijk om voldoende voorwaarden te*

²⁸ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 57.

²⁹ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, pp. 70-71.

*formuleren voor stabiliteit; wat we het 'algemene evolutie criterium' hebben genoemd.*³⁰ Zo verkrijgt men onomkeerbare processen in het systeem, die verbonden zijn met typische specifieke natuurwetten (in tegenstelling tot de universele natuurwetten bij evenwicht). Instabiliteiten spelen een rol en de materie wordt actiever. Dit alles komt overeen met de verschillende soorten gedrag van materie die we rondom ons bemerken.

*“De irreversibiliteit maakt een uitbreiding van de dynamica noodzakelijk.”*³¹ zo vat Prigogine een belangrijke conclusie uit zijn boek ‘Orde uit Chaos’ samen en een taak waarvoor hij zich geplaatst ziet. Hierbij bedoelt hij niet het eenvoudigweg toevoegen van nieuwe vergelijkingen aan de klassieke dynamica, maar letterlijk een uitbreiding *“tot instabiele en chaotische systemen [zo]dat het mogelijk wordt de tegenstelling te overwinnen tussen de omkeerbare wetten van de dynamica en de evolutionistische beschrijving geassocieerd met entropie.”*³² Er zijn namelijk situaties waarin de symmetrie van de tijd teniet wordt gedaan. Hiertoe is een onderzoek naar instabiel dynamisch gedrag vereist, wat zich zal uiten in een werken met ‘mogelijkheden’.

Toch betekent dit geenszins dat de klassieke natuurkunde zomaar overboord gegooid moet worden.

*“De Newtoniaanse wetenschap moet een heel belangrijke, maar ook een heel specifieke tak van de fysica worden. Het is die tak die toepasbaar is wanneer je een aantal deeltjes uit het geheel kunt isoleren. Maar de concrete natuur kan dat niet. Om die te benaderen heb je een holistische aanpak nodig, die ieder reductionisme overstijgt. Dat is een nieuw paradigma.”*³³

2.3.2 Stabiele en instabiele systemen en de ensembletheorie

Belangrijk is dus het verschil tussen stabiele en instabiele systemen. Bij deze eerste heeft een kleine aanpassing van de initiële condities slechts minimale gevolgen. Als men bij een systeem van de tweede soort twee banen heeft waarbij de beginvoorwaarden weliswaar kort bij elkaar liggen, maar toch verschillen, zullen deze na verloop van tijd exponentieel van elkaar verwijderd raken. Een chaotisch systeem is bijvoorbeeld zo'n instabiel dynamisch systeem, waarbij het befaamde ‘vlindereffect’ wel het beste gekende is. ‘Gevoeligheid voor de beginvoorwaarden’ is wat hier aan de orde is.

³⁰ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, pp. 57-58.

³¹ *Ibid.*, p. 26.

³² *Ibid.*, p. 26.

³³ I. PRIGOGINE, “De pijl van de tijd bestaat echt”, in: *Filosofiemagazine*, nr. 3, 1997, s.p.

In tegenstelling tot wat op het eerste zicht aannemelijk lijkt, vergt dit geen uitzonderlijke situatie op het aanvangsmoment: “[...] *many physical systems exhibit sensitive dependence on initial condition for arbitrary initial condition.*”³⁴ Hier heeft men te maken met de zogenaamde ‘deterministische chaos’ omdat de vergelijkingen waarmee dit beschreven wordt strikt deterministisch zijn zoals in de klassieke natuurkunde, maar er toch een vorm van willekeur lijkt op te duiken in het systeem. Het is Poincaré die er op wees dat de systemen die door zulke wetten beschreven worden niet allemaal op elkaar lijken en er een fundamenteel verschil is tussen stabiele en instabiele dynamische systemen, waarbij zijn eigen drielichamenprobleem onder de tweede categorie valt. Een wiskundige analyse van het gedrag van biljardballen die in contact komen met afgeronde obstakels werd gegeven door de Russische wiskundige Yakov G. Sinai.³⁵

We kunnen een enkel systeem beschouwen waarbij de baan beschreven wordt door een wet uit de klassieke dynamica, vertrekkende van een begintoestand met een bepaalde positie en snelheid in de faseruimte.³⁶ We kunnen echter ook een ‘ensemble’ bestuderen, een verzameling van systemen, naar de term van Einstein en Gibbs.³⁷ Hierbij heb je niet langer een enkel punt in de faseruimte, maar een wolk van punten “[...] *die overeen komen met de verschillende dynamische toestanden die nog verenigbaar zijn met de informatie die we over het systeem hebben.*”³⁸ beschreven door een waarschijnlijkheidsverdeling die de dichtheid van die punten weergeeft, waarbij het opmerkelijk is dat “[...] *we de dynamische theorie geheel onafhankelijk van een precieze aanduiding van de beginvoorwaarden kunnen formuleren.*”³⁹

De ensembletheorie combineert statistisch materiaal met de klassieke dynamica. Gibbs en Einstein zagen de theorie van de ensembles als een uitdrukking van ons gebrek aan informatie, doordat ze zich op waarschijnlijkheden beroepen. Ze veronderstelden dus een equivalentie tussen het individuele en het statistische niveau. Voor stabiele dynamische

³⁴ D. RUELLE, *Chance and chaos*, p. 40.

³⁵ Y. SINAI, “Dynamical systems with elastic reflections”, In: *Russian Math Surveys* 25, nr. 2, 1970, pp. 137-89.

³⁶ Dit is een denkbeeldige ruimte die gebruikt wordt als wiskundig hulpmiddel en bevat wat er gebeurt en welke mogelijke zaken er zouden kunnen gebeuren. Deze ruimte heeft 6 dimensies die tot stand komen door plaatscoördinaten (weergegeven door 3 vectoren) en impulscoördinaten (eveneens weergegeven door 3 vectoren).

³⁷ J. W. GIBBS, *Elementary principles in statistical mechanics*, New York, Scribner, 1960, s.p.

³⁸ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, p. 264.

³⁹ *Ibid.*, p. 263.

systemen gaat dit op, maar voor instabiele systemen niet. Prigogine zegt dat we bij onomkeerbare processen door de instabiliteit te maken krijgen met een vorm van waarschijnlijkheden die een intrinsieke betekenis hebben, zoals reeds hoger was vermeld. Dit valt reeds te merken wanneer we kijken naar de kinetische gastheorie en de experimenteel bevestigde resultaten die deze boekt. De equivalentie tussen het individuele en het statistische wordt dus verbroken. Hieraan verbindt Prigogine de term ‘intrinsiek aleatorisch’, waarmee hij wil beklemtonen dat waarschijnlijkheden een intrinsieke betekenis aannemen. Máár, belangrijk is dat we beseffen dat we nooit “[...] een theorie van onomkeerbare processen kunnen afleiden die voor elk systeem geldt dat aan de wetten van de klassieke (of de quantum-) dynamica voldoet.”⁴⁰. We zagen dit al eerder bij het project van Boltzmann. Dit geldt dus ook als we de ensembletheorie van Einstein en Gibbs gebruiken en interpreteren.

Bij een chaotisch instabiel systeem is een baan niet meer dan een idealisatie. De onmogelijkheid om aan zulk systeem een baan toe te schrijven komt door het feit dat dat een oneindige precieze kennis zou vragen. We kunnen ten hoogste proberen om de waarschijnlijkheidsverdeling te concentreren op een zo klein mogelijk gebied in de faseruimte. Máár: “De waarschijnlijkheidsverdeling laat ons toe de complexe microstructuur van de faseruimte op te nemen in het raam van de dynamische beschrijving.”⁴¹ en bevat zo meer informatie dan wanneer men zich enkele concentreert op de individuele banen, terwijl deze laatste toch steeds als fundamenteeler werden gezien. Er ontstaan nieuwe vergelijkingen op het niveau van de waarschijnlijkheidsverdelingen die niet toepasbaar zijn op individuele banen. Zo verkrijgen we een nieuwe beschrijving die toelaat het gedrag van een ensemble te bevatten, gesitueerd op het statistische niveau. Dit is de uitbreiding van de dynamica die Prigogine voor ogen had, waarin ook nieuwe wiskundige werktuigen nodig zijn, de fractalen, de meetkunde van Riemann en Hilbertruimten.

2.3.3 Niet-integreerbaarheid, resonanties en wat dit met zich meebrengt

Nu kunnen we even terugkeren naar Poincaré. Hij maakte het hoger vermelde onderscheid tussen stabiele en instabiele systemen, maar introduceerde verder de notie ‘niet-integreerbaar dynamisch systeem’. Tevens toonde hij aan dat de meeste dynamische

⁴⁰ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, p. 267.

⁴¹ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 33.

systemen hieronder vallen. Voor een precieze beschrijving van een integreerbaar systeem gebruik ik de woorden van Prigogine:

“Elk dynamisch systeem kan gekenmerkt worden door een kinetische energie, die enkel afhangt van de snelheden van de delen van het systeem, en een potentiële energie, die afhangt van de wisselwerkingen tussen die delen, dat wil zeggen van de onderlinge afstanden van de delen. Een bijzonder eenvoudig geval is dat van vrije deeltjes, zonder onderlinge interacties. In dat geval is er geen potentiële energie en wordt het uitrekenen van de banen triviaal. Een dergelijk systeem is integreerbaar in de zin die Poincaré bedoelde.”⁴²

Als men dus de variabelen zodanig kan definiëren dat de potentiële energie geëlimineerd wordt, krijgt men een beschrijving als zou het systeem bestaan uit deeltjes die niet interageren. Maar Poincaré maakte duidelijk dat zulke variabelen slechts zelden te bekomen zijn. Dit is een belangrijk gegeven, aangezien in een wereld ontdaan van interactie, de pijl van de tijd zich niet zou kunnen handhaven en ook zelforganisatie of het leven zelf uitgesloten is.

De zeldzaamheid van bovengenoemde eigenschap is te wijten aan ‘het bestaan van resonanties tussen de vrijheidsgraden van het systeem’.⁴³ Om het begrip ‘resonantie’ duidelijk te begrijpen is het handig om naar de frequentie van een harmonische oscillator te kijken. Een duidelijk voorbeeld is dat van een veer en een externe kracht die erop inwerkt.⁴⁴ We hebben dan te maken met resonantie als beider frequenties (die van de veer en die van de externe kracht) zich verhouden als een eenvoudige breuk.

Poincaré zag deze problematiek als iets fundamenteel, veroorzaakt door de natuur zelf. Voor Prigogine echter vormt het de mogelijkheid van een nieuw vertrekpunt, de basis van een statistische formulering met intrinsieke waarde. Resonanties zijn alom aanwezig, en het overwinnen van hun moeilijkheden leidt ook tot de uitbreiding van de dynamica.⁴⁵ Want *“Als de dynamische systemen integreerbaar waren, zou de dynamica ons slechts een statisch beeld van de wereld kunnen geven [...]”*⁴⁶

Toegepast op het niveau van de trajecten, kan men aldus twee soorten onderscheiden: deterministische trajecten en trajecten, geassocieerd met resonanties, die zich doorheen

⁴² I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 35.

⁴³ Ibid., p. 35.

⁴⁴ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, p. 130.

⁴⁵ Deze thematiek werd het eerst onder handen genomen door de KAM-theorie (verwijzend naar het werk van Kolmogorov, Arnold en Moser).

⁴⁶ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, p. 131.

de faseruimte slingeren (omdat bepaalde punten in de faseruimte gelinkt zijn aan resonanties, en andere niet). Verder wijzigt de topologie van de faseruimte onder toenemende energie⁴⁷ en zal het systeem zich chaotisch gedragen vanaf een bepaalde waarde. We krijgen een divergentie van naburige trajecten. Als de chaos zich doorzet, verkrijgen we zelfs diffusie of uniforme verspreiding. Dit is een onomkeerbaar fenomeen. We zien dus hoe er zich een onomkeerbaarheid voordoet, gebaseerd op de klassieke dynamica. Hoe kunnen we dit verklaren, vraagt Prigogine zich af. En “*Hoe kunnen we de statistische regelmaat van een dergelijk gedrag, die in schrill contrast staat met het aleatorische chaotische gedrag op het niveau van individuele banen, vertalen in dynamische termen?*”⁴⁸ Dit is een vraag die Prigogine als fundamenteel bekijkt met betrekking tot de tijd en een cruciaal probleem, gezien de kwestie van het project van Boltzmann of de ensembletheorie.

Resonanties en de divergentie die deze met zich meebrengen, kunnen op het statistische niveau geëlimineerd worden. Dit leidt uiteindelijk tot een niet-newtoniaanse theorie, een die onverenigbaar is met de beschrijving in termen van trajecten. En op het statistische niveau is het systeem duidelijk beschreven als overeenkomend met diffusie. “*Op het statistische niveau zorgen de resonanties voor de ineenstorting van het determinisme. Ze brengen onzekerheid binnen in de klassieke mechanica en ze verbreken de symmetrie van de tijd.*”⁴⁹

De diffusie speelt geen rol bij kortstondige wisselwerkingen, maar des te meer bij langdurige wisselwerkingen (bijvoorbeeld bij een aanhoudende flux van deeltjes die op een doelwit inslaan). Verder is het zo dat vooral in de macroscopische fysica de onomkeerbaarheid en het fundamentele belang van de waarschijnlijkheden zich laten gelden en dat een reductionistische aanpak tekort schiet. Men moet dus naar een heel stelsel kijken, niet enkel naar individuele deeltjes.

⁴⁷ Iets wat ook door de KAM-theorie wordt beschreven.

⁴⁸ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 38.

⁴⁹ *Ibid.*, p. 39.

2.4 Systemen uit evenwicht: dissipatieve structuren, zelforganisatie en bifurcaties

2.4.1 De context van dissipatieve structuren

Ver uit evenwicht kunnen er ‘dissipatieve structuren’ optreden, met de afstand tot het evenwicht als parameter. Deze kunnen slechts begrepen worden door onomkeerbare processen en hebben nood aan de pijl van de tijd. Nieuwe dynamische toestanden van de materie kunnen ontstaan, die de interactie tussen een bepaald systeem en zijn omgeving weergeven. Dissipatieve structuren spelen een constructieve rol bij het totstandkomen ervan.⁵⁰ Het systeem communiceert dan als geheel en er ontstaat een nieuw soort orde. Dissipatieve structuren verhogen verder meestal de entropieproductie. Prigogine verduidelijkt zelf:

“Scheikundige reacties zijn in het algemeen niet lineair. Voor elke gegeven waarde van [beginproducten] {A} en [eindproducten] {F} bestaan er dus vele mogelijke oplossingen voor de concentratie van intermediaire producten {X}. Van deze oplossingen komt er één enkele overeen met de toestand van thermodynamisch evenwicht en maximale entropie. Die oplossing kan voortgezet worden in het niet-evenwichtsdomein: dat is de ‘thermodynamische tak’. Maar het onverwachte resultaat is dat de stationaire toestanden horend bij de thermodynamische tak in het algemeen onstabiel worden vanaf een kritieke afstand van het evenwicht. Voorbij het eerste bifurcatiepunt treedt een verzameling nieuwe fenomenen op: we kunnen oscillerende reacties krijgen, ruimtelijke niet-evenwichtsstructuren en chemische golven.”⁵¹

Ondanks de lengte leek het me toch zinvol dit gehele stuk over te nemen, omdat het de context van dissipatieve structuren (de ‘verzameling nieuwe fenomenen’ waarover sprake is) verheldert. Natuurlijk is het soort dissipatieve structuur dat ontstaat afhankelijk van de specifieke omstandigheden waaronder dat gebeurt, en vertoont deze tevens een aanpassing aan die omstandigheden. Bijvoorbeeld: *“Het leven lijkt [...] een specifieke uitdrukking te zijn van juist die omstandigheden waarin onze biosfeer is ingebed, het bouwt juist voort op de niet-lineaire reacties en de ver-uit-evenwichtsomstandigheden die door de zonnestraling aan onze biosfeer worden opgelegd.”⁵²*

⁵⁰ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, p. 41.

⁵¹ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 58.

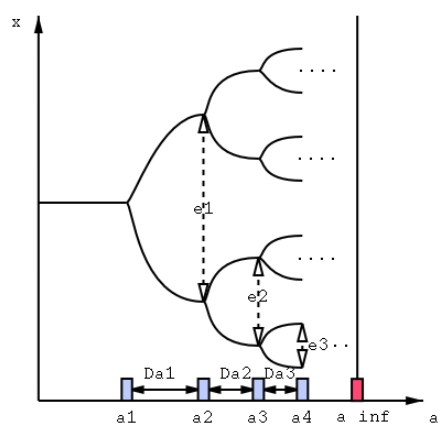
⁵² I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, p. 42.

2.4.2 chemische oscillatie en zelforganisatie

Een van de eerste en nog steeds een van de belangrijkste voorbeelden van een chemische oscillatie (een chemische klok) is de Belousov-Zhabotinski-reactie,⁵³ waarop ook Prigogine z'n eigen Brussels model, de zogenaamde 'Brusselator', gebaseerd is. Het resultaat van bovengenoemde reactie is een oplossing die heen en weer schommelt tussen een blauwe en een rode kleur (van geoxideerd ferrozout naar gereduceerd ferrozout en omgekeerd) én dat dit gebeurt met regelmatige tijdsintervallen, zodat een oscillerend patroon opduikt met een gezamenlijke evolutie en een grote coherentie.⁵⁴ De materie wordt dus gevoelig voor zichzelf en voor haar omgeving, zoals ook reeds eerder ter sprake kwam. De dissipatieve structuren doen aan 'zelforganisatie', waarbij de pijl van de tijd een essentiële rol speelt. Bovenstaande is een voorbeeld uit de scheikunde, maar *"de superioriteit van zelforganiserende systemen wordt geïllustreerd door de biologische systemen waar ingewikkelde producten gevormd worden met een niet te vergelijken precisie, doeltreffendheid en snelheid!"*⁵⁵

2.4.3 Bifurcatiepunten

In de systemen uit evenwicht spelen, zoals hoger reeds vermeld, fluctuaties een belangrijke rol. Dit is vooral het geval bij de reeds hoger geciteerde bifurcatiepunten (of tweekronen). Dit zijn een soort keuzepunten (kunnen ook tripels, quadrupels,... zijn) waartussen het systeem kan 'kiezen', die samengaan met de aanvang van chaos en waarbij kwalitatief verschillende manieren van functioneren worden gepresenteerd.



Bron: URL: <http://pear.math.pitt.edu/mathzilla/Examples/chaos/>

⁵³ Videobestand van deze reactie is te bekijken op http://www.uni-regensburg.de/Fakultaeten/nat_Fak_IV/Organische_Chemie/Didaktik/Keusch/D-oscill-e.htm

⁵⁴ J. COHEN & I. STEWART, *Chaos geordend: de ontdekking van eenvoud in complexiteit*, Amsterdam-Antwerpen, Uitgeverij Contact, 1994, pp. 286-289.

⁵⁵ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 64.

Dit doet zich voor wanneer de parameter van een niet lineair systeem gevarieerd wordt. Opmerkelijk is dat geen enkele optie een bevoorrechte positie heeft om gekozen te worden, zodat er, aldus Prigogine, een niet te reduceren probabilistisch element opduikt,⁵⁶ wat meteen ook een fundamentele onvoorspelbaarheid invoert. Zo had ons heelal een heel verschillend pad van opeenvolgende bifurcaties kunnen volgen.

Bij de bifurcatiepunten doet er zich symmetriebreking voor, van tijd (zoals bij chemische oscillaties), van ruimte (zoals bij Turings niet-evenwichtsstructuren) of van beide (zoals bij chemische golven). “*Het passeren van een tweesprong is een stochastisch proces, net zoals het opgooien van een munt.*”⁵⁷ Tussen de bifurcatiepunten bestaan er dan weer deterministische gebieden, en het geheel van een bifurcatiediagram wordt gekenmerkt door een historiciteit: voor de derde vertakking te bereiken, moeten eerst de eerste twee doorlopen zijn.⁵⁸

2.5 De wetten van de dynamica op het statistische niveau

2.5.1 Markovprocessen en de nood aan verenigbaarheid met de klassieke dynamica

Prigogine wil echter een stap verdergaan, zich toespitsen op het microniveau en kijken hoe de tijd daar genesteld zit. Hij wil begrijpen hoe de reeds beschreven fluctuaties en dissipatieve structuren zelf in elkaar steken (en ook de notie ‘complexiteit’) en hoe “*we hun rol [kunnen] verenigen met de deterministische en reversibele beschrijving die inherent is aan de traditionele formulering van de natuurwetten.*”⁵⁹

Hiervoor moeten we kortweg, zoals in de inleiding reeds vermeld, de wetten van de dynamica op het statistische niveau formuleren. Met andere woorden, banen en golf functies zijn niet langer van belang als fundamentele fysische noties, maar wel intrinsieke waarschijnlijkheden. En dergelijke probabilistische processen zijn verbonden met de richting van de tijd.⁶⁰

⁵⁶ I. PRIGOGINE & G. NICOLIS, *Exploring complexity*, New York, W. H. Freeman and Company, 1989, p. 72.

⁵⁷ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, p. 194.

⁵⁸ *Ibid.*, p. 186.

⁵⁹ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 64.

⁶⁰ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, p. 105.

Prigogine verwijst hiervoor naar het model van de urnen van Ehrenfest, een voorbeeld van een Markovproces.⁶¹ “*Hun kenmerkende eigenschap is in het kort gezegd het bestaan van welbepaalde overgangswaarschijnlijkheden onafhankelijk van de voorgeschiedenis van het systeem.*”⁶² Dergelijke processen kunnen eveneens beschreven worden aan de hand van entropie. Maar nu stelt zich de vraag hoe dergelijke waarschijnlijkheden met de dynamica verbonden dienen te worden. De probabilistische mechanica van de evenwichtssituaties is niet echt een probleem. Wanneer de evenwichtsverdeling gegeven is, kunnen alle thermodynamische eigenschappen van het evenwicht uitgerekend worden en zelfs de theorie van de ensembles kan hierop toegepast worden. Voor de niet-evenwichts statistische mechanica gaat dit niet op. Hier treffen we steeds conflicten aan tussen de klassieke en de kwantummechanica die de onomkeerbaarheid negeren, en de thermodynamica, met de Tweede Hoofdwet die de toename van entropie beschrijft. “*Hoe kunnen we de onomkeerbare evolutie van de waarschijnlijkheidsverdeling bekomen wanneer ze gedefinieerd is in termen van dynamische variabelen, beheerst door vergelijkingen die symmetrisch zijn in de tijd?*”⁶³, zo formuleert Prigogine andermaal de probleemstelling. Hier zien we terug de nood aan een uitbreiding van de dynamica opduiken.

2.5.2 Correlaties

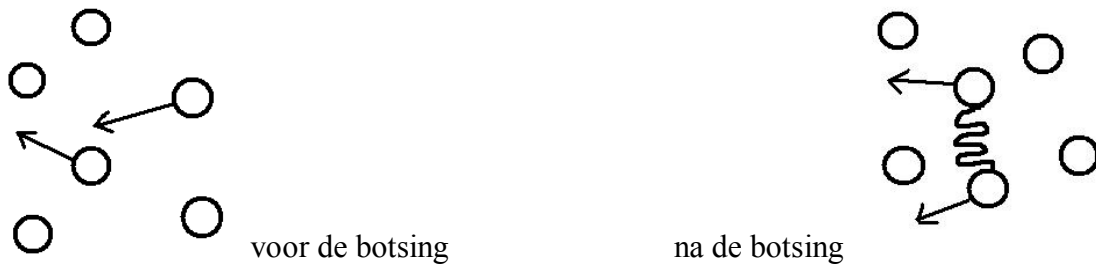
Eerst en vooral is het belangrijk vertrouwd te zijn met enkele resultaten die reeds eeuwen bekend zijn. We kunnen een glas water bekijken dat tientallen moleculen bevat, met voortdurende onderlinge botsingen. Dit systeem is niet-integreerbaar, in de zin van Poincaré. Het water kan beschreven worden door ensembles en is dus voorstelbaar door middel van een waarschijnlijkheidsverdeling. Op het statistische niveau is er sprake van een natuurlijke orde als “[...]we de evolutie van de waarschijnlijkheidsverdeling door de gevolgen van de botsing bestuderen.”⁶⁴ Fundamenteel hierbij is de notie ‘correlatie’ (wat in het voorbeeld van het glas water ontstaat door een botsing tussen moleculen). Correlaties ontstaan en verbreiden zich en worden in de tijd geordend.

⁶¹ Dit is genoemd naar de Russische wiskundige Andrei Markov, die de eerste was om dergelijke probabilistische processen te bestuderen.

⁶² I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, p. 253.

⁶³ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 70.

⁶⁴ *Ibid.*, p. 71.



Bron: gebaseerd op Prigogine Ilya. in: *Tussen tijd en eeuwigheid*, afbeelding 18 op p. 138.

In een systeem met twee deeltjes kan men hieruit geen richting van de tijd afleiden, omdat het “[...] onmogelijk [is] een onderscheid te maken tussen voorbotsingscorrelaties en nabotsingscorrelaties.”⁶⁵ Maar in grote systemen met chaotisch gedrag kan bovenstaande wel degelijk een tijdsrichting duidelijk maken.

Prigogine vergelijkt dit met communicatie tussen mensen, waarbij gevolgen van een eerdere ontmoeting nog doorwerken op een latere. Er ontstaat een flux waarbij opeenvolgende botsingen binaire correlaties creëren, en vervolgens ternaire, enzovoort. Door een dynamica van de correlaties te construeren (in plaats van een van de trajecten), zien we hoe onomkeerbaarheid opduikt op het statistische niveau; dit is, als er voldaan is aan de voorwaarde van niet-integreerbaarheid.

In computersimulaties is aangetoond dat er zelfs bij evenwicht correlaties gevormd worden door botsingen. Het verschil tussen verleden en toekomst is dus steeds aanwezig op het microniveau, evenwichtstoestand of niet-evenwichtstoestand.⁶⁶

*“Het is niet zo dat de niet-evenwichtstoestand het ontstaan van de richting van de tijd veroorzaakt, maar de evenwichtstoestand verhindert de richting van de tijd die altijd aanwezig is op het microscopische niveau, om macroscopische gevolgen te hebben.”*⁶⁷

⁶⁵ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, p. 139.

⁶⁶ I. PRIGOGINE & E. KESTEMONT & M. MARESCHAL, “Velocity correlations and irreversibility: a molecular dynamics approach”. In: MARKUS, M. & MÜLLER, S. C. (eds.). *From chemical to biological organisation*. Heidelberg, Springer-Verlag, 1988, passim.

⁶⁷ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, p. 141.

2.5.3 Chaotische afbeeldingen

2.5.3.1 De Bernoulli-afbeelding en de richting van de tijd

Natuurlijk lijkt het aannemelijk op de verschijning van irreversibiliteit op het statistische niveau aan onze onwetendheid of praktische onkunde toe te schrijven. Prigogine lost dit op aan de hand van chaotische afbeeldingen.⁶⁸

Deze zijn een voorbeeld van deterministische chaos, waarbij er zich op regelmatige tijdstippen een transformatie voordoet. *“One [...] speaks of deterministic noise when the irregular oscillations that are observed appear noisy, but the mechanism that produces them is deterministic.”*⁶⁹ Hierbij werkt de tijd niet continu maar discreet,⁷⁰ wat de bewegingsvergelijkingen eenvoudiger maakt en er zo voor zorgt dat een vergelijking tussen het individuele niveau (met trajecten) en het statistische niveau ook eenvoudiger wordt. Bij stabiel dynamisch gedrag, overeenkomend met een integreerbaar systeem, is er wel degelijk een equivalentie tussen het individuele en het statistische (ensembles). Dit kan doorbroken worden wanneer men kijkt naar een instabiel dynamisch systeem, bijvoorbeeld de chaotische ‘afbeelding van Bernoulli’ (die wel deterministisch is: als beginvoorwaarde x_0 gekend is, kan x_n voor elk later moment berekend worden). Hier blijkt er een opvallend verschil tussen de beschrijving in termen van paden en in de beschrijving in termen van ensembles te bestaan. Meer bepaald: *“De instabiliteit op het niveau van het afzonderlijke pad leidt tot een stabiel gedrag op het niveau van de statistische beschrijving.”*⁷¹ De Perron-Frobenius-operator⁷² laat in dergelijk systeem op het statistische niveau naast een oplossing die overeenkomt met het pad ook nieuwe oplossingen toe die enkel toepasbaar zijn op statistische ensembles en verbreekt aldus de hoger vernoemde equivalentie. Bij de Bernoulli-afbeelding is er ook een duidelijke bevoorrechte richting van de tijd.

*“Als we in de plaats van $x_{n+1} = 2x_n$ (modulo 1)⁷³ de omgekeerde afbeelding nemen, $x_{n+1} = x_n/2$, dan bekommen we een uniek attractiepunt overeenkomend met $x = 0$, waarnaar alle banen convergeren, wat ook de beginpositie is. De symmetrie van de tijd is dus al gebroken op het niveau van de bewegingsvergelijking.”*⁷⁴

⁶⁸ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, pp. 73-79.

⁶⁹ D. RUELLE, *Chance and chaos*, p. 67.

⁷⁰ Discrete tijd werkt in stapjes, met opvolgers, en kan als gehele/natuurlijke getallen voorgesteld worden; bij continue tijd is er steeds een tussenliggend tijdstip en maakt men gebruik van reële getallen.

⁷¹ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 78.

⁷² Dit is een operator die de evolutie in de tijd van de dichtheden in de faseruimte beschrijft.

⁷³ Dit is de bewegingsvergelijking die overeenkomt met de Bernoulli-afbeelding.

⁷⁴ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p.82.

Hier voegt Prigogine een belangrijke verduidelijking bij: “*Rekening houden met statistische ensembles komt niet overeen met een benaderende beschrijving; integendeel, het laat toe het chaotische karakter van de transformaties op te nemen in de beschrijving.*”⁷⁵ Zodoende lijkt het fundamenteel mogelijk en aangeraden om de wetten van de dynamica uit te drukken met behulp van ensembles, iets wat vroeger vaak werd genegeerd omwille van het succes van de klassieke theorie van de trajecten. Chaotische afbeeldingen zijn ook uitermate bruikbaar om het vraagstuk van de onomkeerbaarheid bloot te leggen, omwille van hun eenvoud. Het systeem is namelijk bepaald door een beperkt aantal onafhankelijke veranderlijken. Daardoor is het absurd de onomkeerbaarheid, die in dit eenvoudig voorbeeld reeds opduikt, af te schuiven op onwetendheid.

2.5.3.2 Operatoren en eigenfuncties

Daarjuist was er reeds sprake van het begrip ‘operator’, wat een centrale betekenis heeft. Een operator is een soort functie, of beter: een manier die aanduidt hoe een bepaalde functie moet gebruikt of vervormd worden (tot een andere functie). Zo is de vermenigvuldiging een eenvoudig voorbeeld van een operator. Hierbij is ook het domein waarop de operator van toepassing is, expliciet belangrijk. Voor elke operator zijn er tevens functies die niet wijzigen als hij er op inwerkt (op een multiplicatieve factor na). Deze worden de ‘eigenfuncties’ van de operator genoemd, met de getallen waarmee vermenigvuldigd wordt als ‘eigenwaarden’. De eigenfuncties en eigenwaarden zijn dan weer afhankelijk van de functieruimte.⁷⁶ Zo is er bijvoorbeeld de Hilbertruimte,⁷⁷ meestal geassocieerd met de kwantummechanica. Aangezien singuliere veralgemeende functies noodzakelijk zijn om de onomkeerbaarheid aan te brengen in de statistische beschrijving, maar de Hilbertruimte slechts omgaat met normale functies, zullen we hier dus voorbij moeten gaan.

⁷⁵ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 78.

⁷⁶ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, p. 239.

⁷⁷ De Hilbertruimte is de plaats waar de golf functie zich ontwikkelt, en wordt “[...] hetzij opgebouwd met behulp van de coördinaten, hetzij met behulp van de impulsen.” I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, p. 151.

2.5.3.3 De spectrale representatie van de operator

Na bovenstaande verheldering kunnen we terugkeren naar de Bernoulli-afbeelding. Meer concreet, echter zonder in gehele techniciteit te vervallen, is het nodig om de Perron-Frobenius-operator te vervangen door een uitdrukking in de zogenaamde Bernoulli-veeltermen.⁷⁸ Dit is de zogenaamde ‘spectrale representatie’ van de operator en maakt de integratie van een dynamisch systeem mogelijk. Het uitzonderlijke bij een toestand van deterministische chaos is nu dat deze Bernoulli-veeltermen niet de enige verzameling eigenfuncties is van de Perron-Frobenius-operator. Er bestaat er nog een die in tegenstelling tot de eerste niet uit normale maar uit singuliere functies bestaat. Door deze tweesplitsing ontstaat de verbreking van de equivalentie tussen het statistische en het individuele niveau.

“De spectrale weergave die we bekomen hebben voor de Perron-Frobenius-operator is irreducibel, in de zin dat ze van toepassing is op waarschijnlijkheidsverdelingen die overeenkomen met ‘normale’ functies, en niet met deeltjesbanen die overeenkomen met singuliere functies. Deze spectrale representatie leeft, bij wijze van spreken, in een veralgemeende Hilbertruimte en ze brengt singuliere functies mee. Deze resultaten zijn van fundamenteel belang, want ze zijn typisch voor instabiele systemen.”⁷⁹

De veralgemeende Hilbertruimte waarvan sprake in het citaat wijst er gewoon op dat we de normale Hilbertruimte te buiten moeten gaan omdat we zowel normale als singuliere functies nodig hebben. Soms worden deze ook ‘Gelfandruimten’ genoemd.

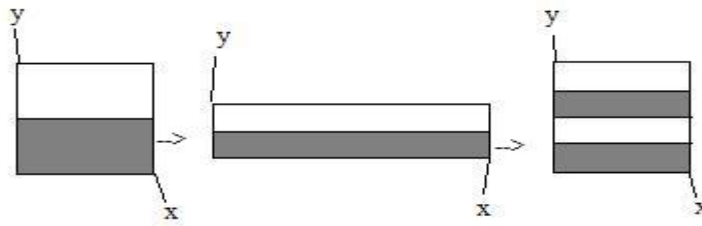
2.5.3.4 De bakkertransformatie

Bij de Bernoulli-afbeeldingen wordt er met de bewegingsvergelijking meteen al een pijl van de tijd geïntroduceerd. Het is dus niet te achterhalen hoe deze tevoorschijn komt uit het gedrag van het systeem. Daarom is het zinvol de befaamde ‘bakkertransformatie’ onder handen te nemen. Dit systeem is deterministisch en omkeerbaar in de tijd. Meer bepaald is het, zoals de Bernoulli-afbeelding, een voorbeeld van deterministische chaos.⁸⁰

⁷⁸ Uitgedrukt als $B_m(x)$.

⁷⁹ einde van de zekerheden, p 86

⁸⁰ De bakkertransformatie is in feite een veralgemening van de Bernoulli-afbeelding.



Bron: gebaseerd op Prigogine Ilya, in: *Exploring complexity*, afbeelding 85 p. 202.

Het is verder zo dat een goede kijk op “[...] *the mechanism of the Baker transformation is gained by representing it as a process known as the Bernoulli shift.*”⁸¹⁸²

Er wordt vertrokken van een groepje punten binnen een klein gebied in het vierkant, en na enkele iteraties zal er zich uiteindelijk een gelijkmatige verdeling over het hele vierkant voordoen. De waarschijnlijkheidsverdeling evolueert dus naar een constante waarde, zoals ook het geval was bij de Bernoulli-afbeelding. Er dient zich een chaotisch effect aan en onvoorspelbaarheid speelt een rol. Verder is de bakkerstransformatie recurrent. Maar ondanks de recurrentie en de omkeerbaarheid zorgt het chaotische aspect toch voor een breuk in de tijdssymmetrie en zodoende voor een onomkeerbaarheid op het statistische niveau.

We kunnen twee evoluties onderscheiden, namelijk $t \rightarrow \infty$ en $t \rightarrow -\infty$. Voor de eerste bekomt men horizontale banden in het vierkant die alsmaar kleiner worden zodat men de waarschijnlijkheid kan vervangen door een constante voor het hele vierkant. Voor de tweede verkrijgt men verticale banden, waarbij “[...] *alle punten die tot een samentrekkende vezel behoren convergeren naar dezelfde toekomst.*”⁸³. Dit is de zogeheten evenwichtstoestand.⁸⁴ Dit illustreert de mogelijkheid om op het statistische niveau twee irreducibele spectrale representaties te construeren, een die van toepassing is op de toekomst en de andere op het verleden, overeenkomstig met twee verschillende beschrijvingen. Met die basisverdelingen kan men het begrip ‘inwendige tijd’ verbinden.

We zagen reeds dat er twee Markovketens opduiken, één die overeenkomt met de horizontale banden en een die overeen komt met de verticale banden. Prigogine hanteert

⁸¹ I. PRIGOGINE & G. NICOLIS, *Exploring complexity*, p. 202.

⁸² Ik zal niet concreet doorgaan op het principe van de Bernoulli-verschuiving. Ik vermeld enkel nog dat dit vertrekt van het principe van de waarde van de twee coördinaten die ieder punt in deze faseruimte vastleggen, uit te drukken in een soort binaire code.

⁸³ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd een eeuwigheid*, p. 127.

⁸⁴ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, pp. 287-292.

een selectiemechanisme om de nadering naar evenwicht in de toekomst te behouden en die in het verleden uit te sluiten. Hij voegt daar het volgende aan toe: “[...] waarschijnlijk komt tevoorschijn als het gevolg van een alternatieve formulering van de dynamica,⁸⁵ een niet-lokale beschrijving die bij zeer instabiele dynamische systemen optreedt.”⁸⁶

Zo wordt er rekening gehouden met de universaliteit van de onomkeerbaarheid en wordt elk proces gekenmerkt door dezelfde richting van de tijd. “Om die reden behouden we alleen de beschrijving die overeenkomt met het bereiken van evenwicht in onze toekomst (voor $t \rightarrow \infty$).”⁸⁷

2.5.3.5 Enkele conclusies

Samengevat is gebleken dat de wetten van de dynamica, wanneer die van toepassing zijn op chaotische systemen, geformuleerd dienen te worden in probabilistische termen. Hiervoor moet men de gebruikelijke Hilbertruimte verlaten (en de normale functies waarmee deze omgaat). Zo kan men onomkeerbaarheid introduceren. Die statistische methode is vooral zo succesvol omdat ze rekening houdt met de microstructuur van de faseruimte. En wegens het kleine aantal vrijheidsgraden van de zojuist besproken systemen, kan de onomkeerbaarheid moeilijk afgeschoven worden op de menselijke benadering. De theorie van de banen houdt wel stand als de beginvoorwaarden met een eindige precisie bestaan of gekend zijn, maar dit doet zich in de realiteit niet voor.

2.5.4 Instabiliteit in de klassieke mechanica

Nu kunnen we overgaan naar een bespreking van de rol van instabiliteit in de klassieke mechanica; die mechanica die ons met een deterministisch en omkeerbare wereldbeeld opzadelde. Het introduceren van instabiliteit en niet-integreerbaarheid maakt de onomkeerbaarheid fundamenteel mogelijk, welke samenhangt met de productie van entropie. Ook hier moet de equivalentie tussen de beschrijving in termen van banen en het statistische niveau doorbroken worden. Dit vereist niet-newtoniaanse elementen die pas vanaf het probabilistische niveau kunnen opgenomen worden. Belangrijk is dat dit resultaat voortkomt uit de aard van de dynamische processen zelf. Het indeterminisme,

⁸⁵ Prigogine bedoelt hier een objectieve waarschijnlijkheid mee, en verbindt die nieuwe formulering aan de notie van ‘inwendige tijd’.

⁸⁶ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, p. 289.

⁸⁷ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 93.

dat ook verdedigd werd door Bergson, Popper of Whitehead, valt niet meer te omzeilen, aldus Prigogine. Dit is geen metafysische keus, maar “[...] *het gevolg van de statistische beschrijving die vereist wordt door de instabiele dynamische systemen.*”⁸⁸

De evolutie-operator in deze context is de Liouville-operator. De eigenfuncties en de eigenwaarde van deze operator moeten bepaald worden. Zo kan men de spectrale representatie van deze L construeren. Maar een fundamenteel theorema stelt dat “[...] *de operator L in de Hilbertruimte alleen reële getallen als eigenwaarden heeft.*”⁸⁹ Men verkrijgt oscillerende termen en het onderscheid tussen verleden en toekomst is niet van belang. Daarom is er nood aan complexe eigenwaarden die een exponentiële rol spelen, zodat de symmetrie van de tijd doorbroken wordt. De Hilbertruimte moet dus andermaal verlaten worden en veralgemeende singuliere functies moeten ingevoerd worden.⁹⁰ Dit laatste komt voor uit het feit dat er in onze wereld ‘persistente’, langdurige wisselwerkingen optreden (bijvoorbeeld de botsingen tussen moleculen in de lucht). Het volstaat dus niet zoiets te idealiseren tot een ‘transitoire’, voorbijgaande interactie. En het is hier dat de klassieke mechanica meestal deze laatste gebruikt, zoals de geïdealiseerde beweging. De persistente wisselwerkingen werken met niet gelokaliseerde waarschijnlijkheidsverdelingen (en leiden tot singuliere functies), de transitoire met gelokaliseerde. Thermodynamische systemen vallen bijvoorbeeld in de eerste categorie. Een ‘baan’ of ‘traject’ is niet langer een elementair begrip in de statistische beschrijving. Zo moeten we in de bovenstaande situatie de waarschijnlijkheidsverdeling concentreren in één punt, om een baan te vinden. Zo’n baan van een deeltje wordt niet meer dan een wiskundige constructie. “*Het wordt daarmee denkbaar dat de Poincaré-resonanties de constructieve interferenties ongedaan maken die tot deeltjesbanen leiden.*”⁹¹

De Poincaré-resonanties werden al eerder besproken. Hun functie is het koppelen van dynamische processen⁹² en in het bijzonder van vernietigings- en scheppingsfragmenten. Dit veroorzaakt een nieuwe soort dynamische processen die vertrekken van een welbepaalde correlatietoestand en terugkeren tot diezelfde correlatietoestand, in een diagram voor te stellen als ‘lussen’. Samenvattend: deze ontstaan in en door de Poincaré-resonanties, want de resonantie is “[...] *een nieuw beschrijvend principe dat wezenlijk*

⁸⁸ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, pp. 98-99.

⁸⁹ *Ibid.*, p. 102.

⁹⁰ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, pp. 152-153.

⁹¹ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 107.

⁹² Dit is zoals harmonische tonen gekoppeld worden in de muziek.

onomkeerbaar is en op waarschijnlijkheden gebaseerd.”⁹³ Wat meer is: “*Ze komen overeen met gebeurtenissen die beschouwd moeten worden als een geheel en ze introduceren niet-newtoniaanse elementen in de evolutie van de waarschijnlijkheidsverdeling.*”⁹⁴ Een gevolg is dat de tijdssymmetrie verbroken wordt.

2.5.5 Het dynamische probleem op het statistische niveau

Nu kan men het dynamische probleem op het statistische niveau ook behandelen. Twee punten zijn van belang volgens Prigogine: we moeten ons richten op niet gelokaliseerde verdelingsfuncties (en de bijhorende persistente interacties, die leiden tot singuliere functies) en wanneer we die interacties beschrijven, moeten we rekening houden met Poincaré-resonanties (omdat deze zorgen voor nieuwe dynamische processen, verbonden met het begrip diffusie).⁹⁵ Dit leidt tot een “*[...] irreducibele en complexe spectrale representatie van de evolutie-operator (hier de Liouville-operator).*”⁹⁶ Mogelijkheden nemen dan binnen de wetten van de dynamica de prioritaire rol van de zekerheden over. Is niet volledig aan de voorwaarden voldaan, dan zitten we terug met de newtoniaanse beschrijving in termen van deeltjesbanen.

2.6 De rol van de kwantummechanica binnen de natuurkunde van Prigogine

2.6.1 Een korte schets van enkele relevante principes binnen de kwantummechanica, de vraagstelling die dit oproept en het opzet van Ilya Prigogine

Ook in de kwantummechanica spelen instabiliteiten een belangrijke rol. Het is dus belangrijk hier even dieper op in te gaan, niet in het minst op de zogenaamde ‘paradox van de waarnemer’. Waar de klassieke mechanica gebruik maakt van banen, beroept de kwantummechanica zich op de golf functie Ψ . De Schrödingervergelijking beschrijft de evolutie hiervan in de loop van de tijd (zoals de bewegingsvergelijkingen in de klassieke mechanica die vertrekken van de initiële condities).⁹⁷ De Hamiltoniaan⁹⁸ uit de klassieke

⁹³ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, p. 220.

⁹⁴ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 111.

⁹⁵ *Ibid.*, p. 112.

⁹⁶ *Ibid.*, p. 112.

⁹⁷ I. PRIGOGINE, *Orde uit chaos*, pp. 243-246.

mechanica wordt vervangen door de Hamiltonoperator H_{op} . Om dit laatste duidelijk te maken, is het zinvol om een globaal uitgangspunt van de kwantummechanica te vermelden:

“[...] met alle fysische grootheden uit de klassieke mechanica correspondeert er in de quantummechanica een operator, en de getalswaarden die deze fysische grootheid kan aannemen zijn eigenwaarden van de overeenkomstige operator.”⁹⁹

De Hamiltonoperator wijst dus op de energie en de energieniveaus komen overeen met de eigenwaarden die bij deze operator horen. De Schrödingervergelijking is nog steeds deterministisch en omkeerbaar. De golf functie Ψ zelf beschrijft een ‘waarschijnlijkheidsamplitude’.¹⁰⁰

Waar de Schrödingervergelijking de evolutie van een bepaalde golf functie naar een andere beschrijft, hebben we in de kwantummechanica ook te maken met ‘potentialiteiten’ (beschreven door golf functie Ψ), die overgaan naar de ‘actualiteiten’ die we meten.

Het is zo *“[...] dat we, vertrekkende van een zuivere toestand, dus een ensemble van systemen die allemaal voorgesteld worden door een golf functie Ψ , uitkomen bij een mengsel, een ensemble van systemen beschreven door twee verschillende golf functies [...]. Het is deze overgang van een zuivere toestand naar een gemengde toestand die men de ‘reductie’ of ‘collaps’ van de golf functie noemt.”¹⁰¹*

Er wordt dus van een zuivere toestand naar een mengsel gegaan. Dit leidt tot de veelbesproken discussie die zich de vraag stelt naar het belang van een menselijke handeling binnen deze overgang. Er is met andere woorden onduidelijkheid over het statuut van de meting, quasi analoog met de opvatting die menselijke meting verantwoordelijk acht voor het ontstaan van de pijl van de tijd.¹⁰² De Kopenhaagse interpretatie van de kwantummechanica, in het bijzonder vertegenwoordigd door Niels Bohr, stelt voor om het meetinstrument op een klassieke manier te interpreteren, in haar functie als raakvlak met de kwantummechanische realiteit. Dit lijkt echter, aldus

⁹⁸ Dit is een functie die alle eigenschappen van een dynamisch systeem kan uitdrukken en is op zich de totale energie van een systeem (potentiële + kinetische energie). Deze energie wordt weergegeven in kanonieke variabelen. I. PRIGOGINE, *Orde uit chaos*, pp. 90-92.

⁹⁹ I. PRIGOGINE, *Orde uit chaos*, p. 239.

¹⁰⁰ Ook hier zijn ‘ensembles’ mogelijk, bekomen door superpositie van verschillende golf functies.

¹⁰¹ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 43.

¹⁰² Een bekende poging om hieraan te ontsnappen vinden we bijvoorbeeld in de veelwereldthematiek van Everett.

Prigogine, een eerder willekeurige en niet te verantwoorden keuze te zijn, als zou de geldigheid van de kwantummechanica op een bepaald punt ophouden.¹⁰³ “*De waarnemer die buiten de werkelijkheid staat en deze vanop een afstand observeert zonder ermee in contact te komen, is een onzinnige onderstelling.*”,¹⁰⁴ zo beaamt ook Gerard Bodifée.

Het is zo dat er heden ten dage een noodzaak heerst om het subjectieve aspect van de kwantummechanica te elimineren. Murray Gell-Mann bijvoorbeeld stelt in zijn boek ‘De Quark en de Jaguar’ voor om gebruik te maken van een grofkorrelige interpretatie die de interferentietermen elimineert zodat de overgang van potentialiteit naar actualiteit niet meer aan de orde is. Maar ook dit lijkt nogal gratuit volgens Prigogine.

Prigogine stelt dat er nood is aan een radicale vernieuwing die de resultaten van de kwantummechanica niet verwaarloost, maar toch het hoofd kan bieden aan de problemen die voortkomen uit de dualistische structuur ervan. Hier voegt hij eraan toe dat dit nauw samenhangt met het probleem van de tijd. Prigogine zal ook hier de resonanties van Poincaré ten berde brengen, waarbij men een formulering krijgt die de Hilbertruimte te buiten gaat, zodat de centrale notie van de golffunctie Ψ in de kwantummechanica vervangen wordt door waarschijnlijkheid (of duidelijker in deze context: matrixdichtheid) in strikte zin. De diffusie zal een rol spelen, en opnieuw bij langdurige wisselwerkingen. Zodoende heeft men twee onderscheiden gebieden: die waarin de golffuncties een rol zullen blijven spelen en die waarin de probabiteit fundamenteel wordt. De kwantummechanica wordt uitgebreid en doet meteen het probleem van de waarnemer verdwijnen omdat er geen nood meer is aan een reductie van de golffunctie (omdat de dynamische wetten vanaf nu verbonden zijn met probabilistische termen).¹⁰⁵

2.6.2 Het subjectieve karakter van de kwantummechanica de rug toegedraaid

De kwantummechanica heeft dus een dualistische structuur. Enerzijds hebben we de Schrödingerfunctie die van toepassing is op de golffunctie en deterministisch en symmetrisch in de tijd is, anderzijds hebben we de reductie van de golffunctie die tot een gemengde toestand leidt en onomkeerbaar is. Voor dit laatste echter hebben we een op zichzelf staand dynamisch proces nodig, willen we het subjectieve en reduceerbare

¹⁰³ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, pp. 153-154.

¹⁰⁴ G. BODIFÉE, *Ruimte voor vrijheid*, Kapellen, Uitgeverij Pelkmans, 1988, p. 124.

¹⁰⁵ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, pp. 155-162.

karakter van de actie van het meten omzeilen. Er zijn echter nog steeds geen criteria voor dergelijk proces, waarin de Schrödingervergelijking achterwege wordt gelaten, gegeven.

De paradox die gepaard gaat met dit dualisme is wat Prigogine onder handen wil nemen. De oorzaak hiervan wijdt hij aan de onvolledigheid van de kwantummechanica. Hij stelt een oplossing voor¹⁰⁶ die ook in staat is om onomkeerbare processen (zoals de nadering naar evenwicht) te beschrijven, een oplossing die hijzelf als realistisch bestempelt, en wel op twee vlakken: *“Enerzijds verleent die formulering een dynamische betekenis aan het essentiële evolutieve aspect van de wereld, waar de thermodynamica van getuigt, en anderzijds laat ze een interpretatie van de reductie van de golf functie in dynamische termen toe.”*¹⁰⁷

Belangrijk is de terugkeer naar het realisme, dat, zoals Prigogine Popper beaamt, géén terugkeer naar het determinisme hoeft in te houden. Integendeel is dit verenigbaar met een probabilistisch aspect, met het indeterminisme.

We zagen reeds het invoeren van de hamiltonoperator H_{op} . Zodoende dienen ook alle andere dynamische variabelen als operatoren beschouwd te worden. Het gevolg van deze omschakeling is een conceptueel verschil tussen *“een natuurkundige grootheid, voorgesteld door een operator, en de numerieke waarden die die grootheid kan aannemen, de eigenwaarden van die operator.”*¹⁰⁸ Zo kunnen we het klassieke realisme de rug toedraaien, welke de theoretisch geconstrueerde grootheden als overeenkomstig ziet met hetgeen we observeren in de natuur. Hieruit volgt dat ook het begrip ‘baan’ en alles wat eruit volgt, aan prioriteit moet inboeten.

Het is hier dat we de onzekerheidsrelaties van Heisenberg zien verschijnen. We kunnen namelijk een deeltje niet gelijktijdig een positie en een impuls (of snelheid) toekennen. Dit komt omdat de operatoren die overeenkomen met de impuls en de positie niet commuteren (en dus ook verschillende eigenfuncties hebben).

2.6.3 Het eigenwaardeprobleem

Waar de klassieke mechanica een toestand voorstelt als een punt in de faseruimte en de evolutie ervan door een pad in de faseruimte, maakt de kwantummechanica gebruik van

¹⁰⁶ Deze is gebaseerd op het in de steek laten van de golf functie.

¹⁰⁷ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, pp. 118-119.

¹⁰⁸ *Ibid.*, p. 121.

respectievelijk de golffunctie en de Schrödingervergelijking. Beide echter maken ze gebruik van deterministische en in tijd omkeerbare wetten.

Wat de kwantummechanica betreft, betekent dit dat wanneer Ψ en de randvoorwaarden gekend zijn, we Ψ kunnen berekenen voor elk tijdstip in verleden of toekomst en dat wanneer we t vervangen door $-t$, de vergelijking geldig blijft, tenminste als we Ψ vervangen door zijn complex toegevoegde Ψ^* . Het verschil tussen verleden en toekomst kan niet onderscheiden worden.¹⁰⁹ Dit is het geval zolang men in de Hilbertruimte vertoeft, waar er geen enkel onomkeerbaar proces mogelijk is. Toch doen deze zich voor in de kwantummechanica, denk bijvoorbeeld aan de kwantumsprongen in het model van Bohr.

*“Het centrale probleem van kwantummechanica is het oplossen van het ‘eigenwaardeprobleem’, dat wil zeggen het bepalen van de eigenwaarden van de hamiltoniaan.”*¹¹⁰ Zoals bij deterministische chaos, kan dit probleem uitgebreid worden tot singuliere functies buiten de Hilbertruimte. *“Er zijn dan twee functies die overeenkomen met het aangeslagen atoom: de ene [...] beschrijft een exponentiële desexcitatie in de toekomst [...], terwijl de andere [...] een desexcitatie in het verleden beschrijft [...]. Slechts een van deze deelgroepen is gerealiseerd in de natuur.”*¹¹¹

In deze desexcitatie van atoom vindt er slechts een transfer van energie plaats, maar is er nog geen nadering naar evenwicht. Voor dit laatste moeten we van een individuele beschrijving naar een statistische gaan. Belangrijk is dat we, zoals reeds vermeld, buiten de Hilbertruimte treden, en dat we dit doen op het niveau van de waarschijnlijkheden en niet op het niveau van de golffuncties. Dit is de aanpak die Prigogine zal volgen. Door het eigenwaardeprobleem van de kwantum-Liouville-vergelijking op te lossen voor GPS in ruimten die algemener zijn dan de Hilbertruimte, zal hij terechtkomen bij beschrijvingen die niet terug te voeren zijn op golffuncties. Zo komt hij tot nieuwe oplossingen op het statistische niveau die een realistische kwantumbeschrijving toelaten.

2.7 De interactie tussen mens en natuur

Het is de communicatie met de natuur die zo verkregen wordt, die er voor zorgt dat we iets kunnen leren over die natuur. Voorwaarde hiervoor is dat er een gemeenschappelijke

¹⁰⁹ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, pp.123-124.

¹¹⁰ Ibid., p. 126.

¹¹¹ Ibid., p. 126.

tijd is. En het is precies deze die Prigogine invoert. “*Observatie veronderstelt een wisselwerking met een meetinstrument of met onze zintuigen.*”¹¹² Aldus kan een natuurkundige theorie niet volledig zijn zonder de mogelijkheid van metingen in te sluiten.

*“Dat is precies wat onze aanpak toelaat, zonder de dualiteit die door Bohr gepostuleerd werd. Het apparaat moet een GPS met gebroken tijdssymmetrie zijn. De richting van de tijd is gemeenschappelijk voor het meetinstrument en de waarnemer. Een specifieke verwijzing naar de meting in de interpretatie van het formalisme is niet meer nodig. De GPS meten als het ware zichzelf. Het actualiseren van de potentialiteiten vevat in de golf functies gebeurt dankzij de GPS.”*¹¹³

Zo kan men het antropocentrische en subjectivistische aspect van de kwantummechanica, iets wat Einstein kopzorgen baarde, elimineren en het fysisch realisme waarnaar Popper verlangde, in ere herstellen. Prigogine noemt zijn eigen oplossing niet zo extreem als de andere voorstellen om de tijdsparadox (en hiermee samenhangend de kwantumparadox) op te lossen, omdat hij niet meer doet dan “*een traject een definitie geven in termen van ensembles, dat wil zeggen het te definiëren als een superpositie van vlakke golven in plaats van het te beschouwen als een primair concept.*”¹¹⁴ De Poincaré-resonanties doen dan de coherentie van de superposities teniet, zodat men een statistische beschrijving verkrijgt die niet langer te herleiden is naar het concept van een baan.

De dialoog is dus van fundamenteel belang voor kennis. Dit is onmogelijk in een omkeerbare en symmetrische wereld, want kennis ontstaat door een meting en is zo een verbinding die een verschil maakt tussen verleden en toekomst. Te vaak is het doorgronden van de natuur verward geweest met het beheersen van de natuur. Prigogine verwijst in dit opzicht naar hoe het ideaal van de klassieke wetenschap doemscenario’s oproept zoals beschreven door Aldous Huxley of George Orwell.¹¹⁵ Tegenwoordig zien we hoe het begrip evolutie primordiaal is geworden en dat de natuurwetten kunnen gevat worden in termen van instabiliteit (samenhangend met deterministische chaos en niet-integreerbaarheid).

¹¹² I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 133.

¹¹³ Ibid., p. 133.

¹¹⁴ Ibid., p. 138.

¹¹⁵ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, p. 80.

In de chaotische afbeeldingen dook de onomkeerbaarheid reeds op bij systemen met weinig vrijheidsgraden. Maar ook in de echte dynamische systemen, zoals de klassieke mechanica of de kwantummechanica, is er een centrale statistische formulering mogelijk én nodig.¹¹⁶ Dit maakt “[...] *nieuwe oplossingen mogelijk van de statistische vergelijkingen van de dynamica, oplossingen die niet uitgedrukt kunnen worden in termen van banen of golffuncties.*”¹¹⁷ Als niet aan de voorwaarden voldaan is, vallen we terug op de klassieke formulering, hoewel we hier steeds met idealisering te maken hebben, zelfs bij eenvoudige systemen als het tweelichamenprobleem.

2.8 Kosmologie

De kosmologie kan ons helpen om een duidelijker zicht op de ware aard van de tijd te krijgen en in het bijzonder op haar oorsprong. Ik zal echter niet de hele theorie van Prigogine uiteenzetten, en wel om een tweedelige reden. In wat volgt in deze scriptie zal ik mij nergens expliciet op het terrein van de kosmologie begeven, zodat een uiteenzetting hier de coherentie van dit werk geen meerwaarde zou geven. En met wat we reeds over Prigogine zagen, kunnen we ons een globaal beeld vormen van zijn theorie betreffende probabiliteit en onomkeerbaarheid, toegepast op dit universum.

Een citaat van Prigogine zelf over zijn eigen kosmologische beschouwingen en hun relatie tot het ontstaan van de tijd kan het algemene inzicht evenwel ten goede komen.

*“We kunnen niet denken aan een absoluut ontstaan van de tijd. [...] De vraag ‘wanneer is de tijd begonnen’ valt meer dan ooit buiten de natuurkunde, net zoals zij ongetwijfeld ook buiten de mogelijkheden van onze taal valt en buiten ons voorstellingsvermogen. [We kunnen alleen denken] aan de ‘entropie-explosies’ die het bestaan van de tijd veronderstellen en die steeds een nieuwe tijdelijkheid kunnen vormen en een nieuw bestaan dat wordt gekarakteriseerd door een kwalitatief nieuwe tijd.”*¹¹⁸

¹¹⁶ Hiervoor moet er voldaan zijn aan de twee hoger vermelde voorwaarden: het bestaan van Poincaré-resonanties die leiden tot nieuwe, in de dynamische beschrijving op het statistische niveau opgenomen diffusieve processen en persistente interacties die beschreven worden door niet gelokaliseerde verdelingsfuncties.

¹¹⁷ I. PRIGOGINE, *Einde van de zekerheden*, p. 136.

¹¹⁸ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Tussen tijd en eeuwigheid*, p. 201.

2.9 Slotbeschouwing over het project van Prigogine

“*Pour la première fois, le temps de la science coïncide avec celui de Marcel Proust [...] dans ‘A la recherche du temps perdu’ [...]*”.¹¹⁹ Het is opmerkelijk hoe Arnaud Spire zich na een hele uiteenzetting over Prigogine laat verleiden tot deze uitspraak. Dat hij de Prigogine wel begrepen heeft wat betreft zijn wijsgerige conclusies en zijn opvattingen over de onomkeerbaarheid van de tijd, zo blijkt overtuigend uit zijn boek ‘*La pensée-Prigogine*’. Het is daarentegen misschien het werk van Marcel Proust waar hij minder mee vertrouwd is. Want de ik-figuur in de 7-delige romancyclus van Proust is onderhevig aan een verstoring van de chronologie en wordt de hele tijd op discontinue wijze heen en weer geslingerd tussen heden en verleden.

De enige schijnbare link tussen beide is dat Prigogine claimt (het belang van) de verloren tijd teruggevonden te hebben.

Het bestaan van de tijd is reëel volgens Prigogine. Deze tijd is op haar beurt dan weer onomkeerbaar. Die irreversibiliteit kan teruggevoerd worden tot de oorsprong van het heelal. Dit geeft er een universeel karakter aan, onafhankelijk van het al dan niet bestaan van een waarnemer. Ook nu zetten deze onomkeerbare processen zich nog voort en laten zo een onbepaalde toekomst open. Het heelal is een groot thermodynamisch geheel, met instabiliteiten en bifurcaties op alle niveaus en het onderzoek naar strikte en vastomlijnde zekerheden moet beëindigd worden wegens onvruchtbaar. “*De wetenschappen nemen deel aan het opbouwen van de maatschappij van morgen, met al haar tegenstrijdigheden en onzekerheden.*”¹²⁰

Prigogine tracht een middenweg te zoeken tussen twee vervreemdende wereldvisies, de heerschappij van het toeval enerzijds, en het determinisme anderzijds. “*De natuurwetten komen overeen met een nieuwe vorm van begrijpelijkheid, uitgedrukt door de irreducibele probabilistische voorstellingen.*”¹²¹

Tot slot nog een bemerking: er wordt Prigogine vaak een dualisme verweten. Hij maakt zowel gebruik van symmetrie als asymmetrie en benadrukt het bestaan van niet te reduceren probabilistische macroscopische configuraties. Toch poneerde Prigogine ook

¹¹⁹ A. SPIRE, *La pensée-Prigogine*, Paris, Desclée de Brouwer, 1999, p. 116.

¹²⁰ I. PRIGOGINE, Einde van de zekerheden, p. 167.

¹²¹ Ibid., p. 170.

onomkeerbaarheid op microniveau (zoals we bijvoorbeeld zagen bij de bespreking van correlaties). Ook al maakt hij in zijn redeneringen vaak gebruik van transformaties die uiteindelijk de onomkeerbaarheid opwekken, die onomkeerbaarheid is een fundamenteel holistisch en unificerend principe, op elk niveau van de werkelijkheid aanwezig.

We zullen nu in het volgende hoofdstuk enkele courante kritieken op Prigogine bespreken. Daarna zullen we twee van de belangrijkste (wijsgerige) conclusies die we uit dit hoofdstuk kunnen afleiden, in een breder daglicht plaatsen. Prigogine meende uit zijn theoretische en experimentele onomkeerbaarheid het bestaan van dé onomkeerbaarheid als fundamenteel principe te mogen afleiden en meende ook evidentie voor dé pijl van de tijd gevonden te hebben. Voorts dacht hij uit deze resultaten tot de nederlaag van het determinisme te mogen besluiten. Ik bespreek deze kwesties in respectievelijk hoofdstuk vier en vijf.

3. **Secundaire auteurs over het werk van Ilya Prigogine**

“Liegt der Irrtum nur erst, wie ein Grundstein, unten im Boden, immer baut man darauf, nimmermehr kömmt er an Tag.”

Johann Wolfgang von Goethe

3.1 Inleiding

Bij het doorlopen van databanken en het uitpluizen van referenties is het opmerkelijk hoe weinig auteurs, zowel op filosofisch als op wetenschappelijk vlak, een confrontatie aangaan met de theorieën van Prigogine. In encyclopedische werken vindt men hier en daar wel een korte en neutrale uiteenzetting van de bevindingen van Prigogine en zijn medewerkers, maar zelfs deze zijn slechts tot een minimum beperkt. Toch opmerkelijk voor een Nobelprijzslareaat die vaak (al dan niet terecht) wordt beschouwd als iemand die de aanzet gaf tot een heuse kentering van het wetenschappelijke wereldbeeld. En wanneer men dan kijkt welke werken inhoudelijk inspelen op Prigogine en door middel van discussie – pro, contra, of ergens tussenin – een intellectuele meerwaarde trachten te verkrijgen, is het aanbod al helemaal beperkt.

Toch is het de bedoeling van dit hoofdstuk enkele van die werken of papers die dit toch verwezenlijkten, naar voor te brengen. Om een breed zicht op deze kwestie te krijgen, bespreek ik bemerkingen van uiteenlopende aard. Sommige zijn eerder conceptueel van aard, andere trachten inhoudelijke nuances aan te brengen. Mijn dank gaat hierbij ook uit naar dhr. Cosma Shalizi, die me op enkele auteurs wees die Prigogine onder handen namen. Ik bespreek ook zijn eigen kritieken op het project van Ilya Prigogine.

Ik ga schematisch te werk, door telkens eerst een bepaalde auteur met een bepaalde kritiek aan te halen, en vervolgens uit te wijden met secundaire auteurs en eigen bemerkingen.

3.2 David Bohm en ambiguïteit

3.2.1 Bedenkingen van David Bohm over het project van Prigogine

De Amerikaanse kwantumfysicus David Bohm heeft ook enkele opmerkingen bij de theorieën van Ilya Prigogine die hij verwoordt in zijn artikel ‘Comments on Ilya Prigogine’s Program’.¹²² Prigogine, zo vat Bohm hem eerst en vooral samen, bestudeerde processen uit evenwicht in complexe dissipatieve systemen (zoals gassen). Er doet zich hier een nieuw en complex gedrag voor dat zelfs met behulp van eenvoudige wetten tot stand kan komen en waarbij de symmetrie van tijd en ruimte wordt verbroken. Het cruciale punt was te verklaren hoe onomkeerbaar gedrag mogelijk was met de fundamentele wetten van de fysica aan de basis, die toch symmetrisch zijn. Prigogine toonde met behulp van onstabiele systemen aan hoe een transformatie van omkeerbare basisvergelijkingen van de klassieke fysica tot een vorm gelijkend op die van onomkeerbare systemen mogelijk is.

Hiertoe was het nodig de notie ‘interne/inwendige/intrinsieke tijd’ in te voeren. “*That is, the passage of time may be related to complex changes in the internal state of a system that correspond roughly to the idea of the “aging” of that system.*”¹²³ “[...] ze hangt af van de globale topologie van het systeem.”¹²⁴ zo voegt Prigogine er zelf aan toe. Dit kan uitgedrukt worden in termen van een operator en een distributiefunctie.¹²⁵ Het is deze opvatting van de tijd die Prigogine als fundamenteeler beschouwd dan de tijd zoals die gemeten wordt aan de hand van een essentieel omkeerbaar systeem (zoals de planeten) of een uurwerk. In het volgende hoofdstuk zullen we dit onderscheid ook nog tegenkomen. Bohm merkt op dat dit een interessante invalshoek is, maar nood heeft aan een conceptuele verduidelijking. “*In particular, it is completely ambiguous what is to be meant by the “simultaneous existence” of systems of different ages.*”¹²⁶ Zo maakt Prigogine niet duidelijk wat bedoeld wordt met coëxistentie. Prigogine maakt wel een distinctie tussen de hoger vermelde interne tijd en de ‘uurwerk-tijd’, waarbij deze laatste onderworpen is aan de wetten van de relativiteit. In de relativiteitstheorie wordt de notie

¹²² D. BOHM, “Comments on Ilya Prigogine’s program”. In: GRIFFIN, David (ed.). *Physics and the ultimate significance of time*. Albany, State university of New York press, 1986, pp. 261 – 264.

¹²³ D. BOHM, *Comments on Ilya Prigogine’s program*, p. 261.

¹²⁴ I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *Orde uit chaos*, p. 287.

¹²⁵ Prigogine stelt dat deze interne/inwendige tijd eigenlijk zelf een operator is. I. PRIGOGINE, *Orde uit chaos*, p. 287.

¹²⁶ D. BOHM, *Comments on Ilya Prigogine’s program*, p. 262.

van coëxistentie behandeld.¹²⁷ Echter, Prigogine vat dit belangrijke kenmerk van ons tijdsconcept niet op als een intrinsiek kenmerk van de interne tijd. Wanneer twee systemen samen behandeld worden, moet men van de twee soorten tijd gebruik maken. Deze twee zijn door fysische wetten gerelateerd, zodat Prigogine kan aantonen dat in bepaalde gevallen veranderingen in de uurwerk-tijd kwalitatief afleidbaar zijn van veranderingen in de interne tijd. “*Nevertheless, the qualitative feature of coexistence cannot be derived in this way, so there is still the need to introduce two different (though related) kinds of time.*”¹²⁸ Het zou dus interessant zijn om coëxistentie vanuit de interne tijd te kunnen afleiden.

Hierbij aansluitend verwijst Bohm naar het artikel ‘Irreversibility and Space-Time Structure’ van Prigogine waarin deze laat uitschijnen dat de toestand van elk klassiek systeem strikt gedefinieerd is. Hij maakt echter ook gebruik van de theorie die elk systeem opvat als een regio in de faseruimte. Bohm bemerkt dat Prigogine zo een gegeven systeem als ambigu opvat. Dit kan op zich tot vruchtbare resultaten leiden, ware het niet dat Prigogine deze ambiguïteit nergens verduidelijkt of expliciet maakt, aldus Bohm.

Bohm heeft tenslotte nog een voorstel om voort te bouwen op Prigogine z’n ideeën.¹²⁹ Hiervoor vertrekt hij van twee pijlers van het concept tijd: recurrente en niet-recurrente processen. Deze eerste maken gebruik van exponentiëlen met imaginaire argumenten, waarmee ook de kwantummechanica verbonden is. Deze laatste werken met reële argumenten. Ook de irreversibele processen waar Prigogine het over heeft, maken hiervan gebruik. Bohm suggereert dat wanneer we de exponentiëlen generaliseren tot exponentiëlen met complexe argumenten, we zowel recurrente als niet-recurrente processen binnen één kader zouden begrijpen en een fundamentele unificatie van de kwantummechanica en de onomkeerbaarheid zouden verkrijgen.

¹²⁷ Dat wat buiten de lichtkegel van een welbepaalde gebeurtenis valt, daarvan kan gezegd worden dat het er mee coëxisteert.

¹²⁸ D. BOHM, *Comments on Ilya Prigogine’s program*, p. 262.

¹²⁹ *Ibid.*, p. 263.

3.2.2 Bespreking en bemerkingen

De ambiguïteit waar David Bohm in zijn kritiek op wijst, is zodanig verwoord dat ze bijna gelijkenissen vertoont met het dualisme van Henri Bergson. Toch is de realisatie van de opheffing van het Bergsoniaans dualisme een uitgesproken doelstelling van Prigogine zelf.

Maar het is wel zo dat het meestal aan een secundaire auteur gegeven is om inhoudelijke ambiguïteiten in iemands werk op te merken. Bohm was er zelf ook niet vrij van. Thomas Hickey bespreekt deze in zijn 'History of the twentieth-century philosophy of science'.¹³⁰ Bohm zelf heeft bijvoorbeeld reeds een dualisme binnen zijn criteria voor wetenschappelijke kritiek. "*He spent most of his career attempting to persuade the physics profession that there exists another criterion that is unabashedly philosophical.*"¹³¹

Maar het woord 'ambiguïteit' moet hier echter ook dieper geïnterpreteerd worden, als een werkwijze, een vruchtbaar uitgangspunt. Bohm zelf hield vast aan een creatieve spanning tussen realisme en idealisme, monisme en dualisme.¹³² Zo laten systemen die zich focussen op het elimineren van ambiguïteit geen ruimte voor groei, evolutie of orde. We moeten namelijk de ambiguïteit toelaten om tot de kern van deze wereld trachten te komen.¹³³

Toch staat Prigogine ook niet vijandig tegenover ambiguïteit. Sterker nog, Prigogine benadrukt zelfs expliciet het belang van ambiguïteit. Zoals Amardo Rodriguez het werk en het standpunt van Prigogine interpreteert: "*Integral to the promotion of [...] change and evolution is ambiguity*"¹³⁴ en "*Meaning and ambiguity are ontologically intertwined. A world devoid of ambiguity is one devoid of meaning.*"¹³⁵ Er zit dus steeds betekenis in ambiguïteit en ambiguïteit in betekenis.

¹³⁰ T. HICKEY, *History of the twentieth-century philosophy of science*, 1995, url: <http://www.philsci.com/index.html>, s.p.

¹³¹ T. HICKEY, *History of the twentieth-century philosophy of science*, s.p.

¹³² Robert John Russell bespreekt deze spanning in zijn artikel 'The physics of David Bohm and its relevance to philosophy and theology'. RUSSELL, Robert. "The physics of David Bohm and its relevance to philosophy and theology". In: *Zygon*. 1985, 2, pp. 135-158

¹³³ A. RODRIGUEZ, *Culture to culturing, re-imagining our understanding of intercultural relations*, url: <http://www.immi.se/intercultural/nr5/rodriguez.pdf>, 2002, pp. 4-6.

¹³⁴ A. RODRIGUEZ, *Culture to culturing, re-imagining our understanding of intercultural relations*, p. 2.

¹³⁵ *Ibid.*, p. 2.

3.3 Een bevraging door Peter Gunter

3.3.1 Enkele vragen van Peter Gunter aan het adres van Ilya Prigogine

In een eerder kort artikel, ‘Some Questions for Ilya Prigogine’, richt Pete Gunter, professor wijsbegeerte en studie van religies aan de University of North Texas, enkele vragen aan Prigogine. Bij aanvang merkt hij op dat een groot deel van het scepticisme dat Prigogine over zich heen krijgt te wijten is aan de onwil van velen om de notie ‘tijd’ ernstig te nemen. Toch meent Gunter hier en daar theoretische en experimentele onvolledigheid waar te nemen in het werk en de theorieën van Ilya Prigogine.

Niet-evenwichtsthermodynamica berust op twee zaken die symmetrie verbreken. Een ervan brengt de onomkeerbaarheid met betrekking tot de tijd tot stand, de ander geeft een voorkeursrichting aan de tijd.

“Do either of these operations¹³⁶, and the experiments on which they are based and which they are required to explain, require either to be more firmly or more broadly established? Is it necessary to extend them to hitherto unexplored domains, to add experimental proof or mathematical formalisms?”¹³⁷

Deze vragen kunnen het best bekeken worden in het licht van de andere subtakken van de fysica, zo verduidelijkt Gunter zich. Hij ziet de hedendaagse fysica opgesplitst in minstens drie delen: kwantumfysica, fysica van de relativiteit en thermodynamica (en eventueel kosmologie, als dit afzonderlijk beschouwd wordt). Echter hoe ziet Prigogine de relaties tussen deze disciplines en de thermodynamica, vraagt Gunter zich af. Misschien is het, om alle twijfel hieromtrent weg te nemen, wel eerst en vooral vereist dat de thermodynamica er in slaagt de relativiteits- en kwantumfysica in te sluiten of zelfs te herformuleren.

En dan is er nog de biologie met haar componenten noodzakelijk om leven tot stand te brengen. Gunter vraagt zich ook hier af welke relatie Prigogine ziet tussen de biologie en

¹³⁶ Hiermee worden de twee zojuist vermelde symmetriebrekende zaken bedoeld.

¹³⁷ P. GUNTER, “Some questions for Ilya Prigogine”. In: GRIFFIN, David (ed.). *Physics and the ultimate significance of time*. Albany, State university of New York press, 1986, p. 256.

zijn recent geformuleerde interpretatie van de thermodynamica. “*Have we far to go before biology and biochemistry become components of this new physics?*”¹³⁸

Dan heeft Gunter nog twee vragen die het fysische component zelf betreffen, namelijk of hij (Prigogine) denkt dat het microniveau de ware bron van onomkeerbaarheid is en of hij er zeker van is dat de kwantummechanica wel degelijk deterministisch is, omdat deze in wezen stochastisch is. Hoe kan een wetenschap zowel deterministisch als probabilistisch zijn?

3.3.2 Een antwoord van Ilya Prigogine

Ilya Prigogine bezorgt Gunter een antwoord.¹³⁹ Hij zegt dat hij wel degelijk de mening is toegedaan dat de onomkeerbaarheid een unificerende rol kan spelen. Hiervoor moet er verder theoretisch en experimenteel onderzoek gedaan worden binnen de niet-evenwichtsfysica en de chemie, zodat nieuwe structuren kunnen gevonden worden.

Verder mag men niet vergeten dat “[...] *in the classical view, irreversibility is added through supplementary approximations.*”¹⁴⁰ Dit vloekt natuurlijk met de fundamentele rol die eraan wordt toegekend door recente ontwikkelingen, onder andere door Prigogine zelf. Daarom neemt hij de Tweede Hoofdwet, opgevat als dynamisch principe, als vertrekpunt. “*This leads to a theory of transformation between groups and semigroups and therefore between deterministic and probabilistic processes such as are exemplified by the Markov chains.*”¹⁴¹ Dit is iets nog veel onderzoek vraagt, maar al bevredigende resultaten heeft bereikt.

Prigogine denkt wel niet dat de thermodynamica de overige disciplines (zoals kwantum- of relativiteitsfysica) zal absorberen, maar hij gelooft wel dat deze disciplines geherformuleerd moeten worden om het concept van onomkeerbaarheid op te nemen. De onomkeerbaarheid is namelijk zodanig fundamenteel en universeel dat ze op alle niveaus opduikt. In de traditionele opvatting van de kwantummechanica duikt de onomkeerbaarheid enkel op door metingen en observaties. Dit leidt tot opvattingen zoals die van J. A. Wheeler, waarin het de observeerder is die de geschiedenis maakt.

¹³⁸ P. GUNTER, *Some questions for Ilya Prigogine*, p. 257.

¹³⁹ I. PRIGOGINE, “Response to Peter Gunter”. In: GRIFFIN, David (ed.). *Physics and the ultimate significance of time*. Albany, State university of New York press, 1986, pp. 258-261.

¹⁴⁰ I. PRIGOGINE, *Response to Peter Gunter*, p. 258.

¹⁴¹ *Ibid.*, p. 258.

Prigogine contrasteert dit door aan te tonen dat er onomkeerbare processen bestaan die onafhankelijk zijn van een of andere menselijke activiteit. In die visie worden de menselijke gedachte en zijn metingen een uitdrukking van de onomkeerbaarheid in de fysische wereld.

Ook in de biologie speelt de onomkeerbaarheid een karakteriserende rol bij mechanismen die het leven reguleren.¹⁴² Structuren uit evenwicht kunnen zowel regulier als chaotisch zijn¹⁴³. “*From this point of view, it is interesting to note that cardiac diseases are related to rhythmic disorder [...]*”¹⁴⁴ En de wijze waarop de onomkeerbaarheid opduikt in de biologie wordt reeds goed begrepen in eenvoudige gevallen zoals enzymatische chemie. Verder is sinds Darwin duidelijk dat de biologie ook een historisch basiscomponent heeft. Er is wel nog veel werk op het domein van de biologie. Bij een kristal vallen de niet-evenwichtscondities waaronder het tot stand kwam, makkelijk af te leiden, maar voor biomoleculen en de blauwdruk van de niet-evenwichtscondities in biopolymeren, staat dit programma nog in z’n kinderschoenen.

Tenslotte heeft Prigogine het over de terminologische kwestie waar Gunter op het einde van z’n artikel naar verwijst. “*Quantum mechanics is deterministic if one considers the wave functions and probabilistic if one considers the distribution of observables.*”¹⁴⁵ Deze opvatting is zelfs algemeen aanvaard, zo voegt Prigogine er aan toe. De misvatting bestaat er echter in een probabilistische theorie te verwarren met de theorie van stochastische processen (zoals Markovketens geassocieerd met een stijgende entropiefunctie).

3.3.3 Bespreking en bemerkingen

Deze correspondentie tussen Peter Gunter en Ilya Prigogine heeft één heel belangrijke troef: ze zorgt voor de nodige nuancering van de relevantie die Prigogine zelf aan zijn bevindingen lijkt toe te schrijven, wanneer men hem enthousiast bezig hoort in z’n werk. Gunter wijst er terecht op dat Prigogine dan wel resultaten verkregen heeft binnen het domein van de thermodynamica, maar dat men deze niet zomaar mag generaliseren naar

¹⁴² Voor een meer diepgaande uiteenzetting hierover, zie: GOLDBETER, Albert. *Rhythmes et chaos dans les systèmes biochimiques et cellulaires*. Paris, Masson, 1990, 304 p.

¹⁴³ Dit eerste is het geval bij grenscycli, het tweede bij vreemde attractoren.

¹⁴⁴ I. PRIGOGINE, *Response to Peter Gunter*, p. 259.

¹⁴⁵ *Ibid.*, p. 259.

andere (sub)takken van de wetenschap, althans niet zonder expliciet de relatie tussen de verschillende wetenschappelijk domeinen te onderzoeken en te specificeren. Het is ook een van de zeldzame fragmenten waarin Prigogine aanhaalt dat er inderdaad nog werk is om de andere wetenschappelijke deelgebieden zodanig te transformeren dat ook zij capabel worden om de onomkeerbaarheid te incorporeren en dat hij niet de indruk wekt dat de thermodynamica de hoger vermelde vakgebieden zal opslokken. Meestal bezorgt Prigogine de lezer het gevoel dat hij ervan overtuigd is dé pijl van de tijd gevonden te hebben en dat thermodynamica dé sleutel is. In ‘Time, structures, and fluctuations’ stelde hij nog dat de nog dat zijn thermodynamische bevindingen een grote draagwijdte moeten krijgen en noodzakelijk zijn “[...] for a formulation of theoretical methods in which time appears with its full meaning associated with irreversibility or even with “history” and not merely as a geometric parameter associated with motion.”¹⁴⁶ En dit klinkt natuurlijk een heel stuk minder pluralistisch.

Zoals ik in de inleiding van het volgende hoofdstuk aanhaal, dienen er meerdere ‘pijlen van de tijd’ onderscheiden te worden en brengt deze classificatie op haar beurt nog een hele hoop vragen en problemen met zich mee. Maar het onderkennen van deze indeling vormt de eerste stap.

Opmerkelijk is ook hoe Gunter de vraag stelt of de ware bron van de onomkeerbaarheid uiteindelijk op het microniveau dient gesitueerd te worden. Dit is een denken dat zich aan het reductionisme vastklampt. Het is wel opvallend dat Gunter in die richting redeneert, want de meeste personen menen juist dat de onomkeerbaarheid bij Prigogine eigen is aan het macroniveau. Maar Prigogine zelf is hier, zoals we eerder zagen, toch wel duidelijk over: hij verdedigt het holisme met een objectieve onomkeerbaarheid op elk niveau.

3.4 Een bedenking van de evolutiebioloog John Maynard Smith

3.4.1 De invloed op de biologie

De bioloog John Maynard Smith vraagt zich af wat de relevantie van deze nieuwe thermodynamica van Prigogine voor de biologie is, omdat Prigogine tenslotte toch een zicht op het leven biedt, door levende organismen als dissipatieve structuren te bekijken. Er zijn echter weinig biologen die een dergelijke visie ondersteunen, zo merkt Smith op.

¹⁴⁶ I. PRIGOGINE, “Time, structures, and fluctuations”. In: *Science*. 1978, 4358, p. 778

Dit komt omdat de ingeburgerde onderzoeksmethode binnen de biologie uitgaat van chemische reacties binnen de cellen, en hoe dit gestuurd wordt door proteïnen, hoe de codering van dit alles in het DNA aanwezig is en hoe dit laatste geprogrammeerd wordt door de natuurlijke selectie.¹⁴⁷ Deze hele opvatting maakt gebruik van concepten uit de cybernetica en de informatietheorie, en zoals Dawkins zegt in ‘The selfish gene’, kunnen organismen omgevat worden als “[...] *robot vehicles blindly programmed to preserve the selfish molecules known as genes.*”¹⁴⁸ Er is dus weinig ruimte voor de inhoudelijk niet zo statische terminologie van Prigogine.

Er zijn natuurlijk biologen die bovenstaande invalshoek te nauw vinden en vinden dat het object zelf zo teveel naar de achtergrond wordt geschoven. Hier kan Prigogine vaak wel op bijval rekenen, zo merkt Smith op. Meestal betreft het hier ontwikkelingsbiologen. Deze vallen wel nog uiteen in twee kampen. Voor sommigen is de hoofdzaak te weten hoe de informatie in het DNA vertaald wordt in de volwassen structuur en hoe en wanneer bepaalde genen worden aangezet of uitgeschakeld. Anderen concentreren zich volledig op het feit hoe een complexe structuur kan ontstaan uit een klein homogeen beginpunt. Hier lijkt Zhabotinsky’s reactie een vruchtbaardere analogie te zijn dan computerprogramma’s.

*“Ultimately, of course, there need be no contradiction between these two approaches. Even if we come to view embryos as dissipative structures, genes can still control those structures by determining which enzymes shall be present, and hence the rates at which chemical reactions shall proceed.”*¹⁴⁹

Toch meent Smith niet dat ontwikkelingsbiologen beïnvloed zijn door de niet-evenwichtsthermodynamica. Hij noemt het leuk dat dergelijk procesdenken niet in tegenspraak is met de wetten van de thermodynamica, maar voegt er aan toe dat wanneer er wel een contradictie tussen beide zou zijn, de thermodynamica hier het minst goed zou uitkomen. *“After all, eggs do turn into adults. What I cannot tell is whether the new thermodynamics is going to be of any more detailed use in analyzing development.”*¹⁵⁰

Smith trekt het belang van de niet-evenwichtsthermodynamica voor de biologie dus grondig in twijfel. Maar hij heeft het evenmin begrepen op de eerder ‘poëtische’ meerwaarde die Prigogine zelf aan zijn theorieën toekent door erop te wijzen dat het voor

¹⁴⁷ J. M. SMITH, *Games, sex and evolution*, New York-Londen-Tokyo-Sydney-Toronto, Harvester Wheatsheaf, 1988, p. 255.

¹⁴⁸ Geciteerd in J. M. SMITH, *Games, sex and evolution*, p. 255.

¹⁴⁹ *Ibid.*, p. 256.

¹⁵⁰ *Ibid.*, p. 256.

de mens veel aangenamer is te weten dat hij in een levendige wereld leeft en niet in een dood universum, en dat het juist dát is wat hij met zijn werk uitdrukt. Smith heeft begrip voor zijn afkeer van Einstein's universum en heeft houdt zelf ook vast aan een veranderende structuur, maar enkel omdat dat betere wetenschap oplevert. “*A physics which does not permit the occurrence of birth, life and death (in that order) is bad physics.*” Hij vindt dat we een wetenschappelijke theorie moeten gebruiken omdat ze veel zaken verklaart, niet overduidelijk vals is en een nieuwe vraagstelling kan oproepen. Hij voegt er aan toe dat we ons niet op een theorie mogen verlaten omdat ze hoopgevender of aangenamer is dan een andere, iets waar hij Prigogine wel van verdenkt.¹⁵¹

3.4.2 Bespreking en bemerkingen

De opmerkingen van Smith met betrekking tot de theorie van Prigogine kunnen op het eerste zicht nogal triviaal lijken. Toch verkondigt hij mijns inziens een opinie die bij velen, wetenschappers zowel als filosofen die begaan zijn met het werk van Ilya Prigogine, onderhuids sluimert. Het vitale domein dat de biologie is,¹⁵² wordt in verband gebracht met het belang en de waarde van het werk van Prigogine (en nuanceert dit) en leidt Smith tot het besluit dat Prigogine zijn conclusies misschien wel om de verkeerde redenen dermate veel belang toekent.

Deze kritiek is in zekere zin uniek, omdat het een van de weinige is die de ondertoon in het project van Prigogine probeert te lezen. Het eindigt met een – weliswaar nog deels impliciete – aanpak die meestal wordt teruggevonden bij een lezing van literatuur, waarbij men op zoek gaat naar het motief van de auteur en dit bij wijze van rode draad doorheen het hele oeuvre geëxtrapoleerd ziet. En bij Prigogine lijkt dergelijke invalshoek me op zijn plaats. Want Prigogine baseerde zijn hele levensproject in zekere zin op een buikgevoel, meer dan bij een studie van zijn filosofische – en dus persoonlijk gekleurde – stellingen duidelijk kan worden. Hij wist als het ware reeds vroeg wat hij wou aantonen en welke conclusie hij wou bereiken, zodat hij daar naartoe werkte met een soms zichtbare gekunsteldheid en krampachtigheid. Of hij al dan niet geslaagd is in zijn opzet is hier naast de kwestie, maar Smith slaat de nagel op de kop door Prigogine zijn persoonlijke intenties als drijfveer en vaak ook als argumentatie aan te duiden. Daarom

¹⁵¹ J. M. SMITH, *Games, sex and evolution*, p. 257.

¹⁵² Of biologie al dan niet een elementairdere objectieve ondersteuning, in reductionistische zin, nodig heeft, sterker dan Smith vermeldt, is een andere vraagstelling waar ik hier niet dieper zal op ingaan. Een degelijke uiteenzetting van deze thematiek is te vinden in H. KINCAID, *Individualism and the unity of science*, Lanham, Rowman and Littlefield, 1997, 165 p.

ook dat interviews met Ilya Prigogine hierin een goede inkijk verschaffen. Hierin vertelde hij meermaals hoe zijn interesse, op reeds jonge leeftijd, voor artistieke zaken zoals beeldhouwen en muziek hem deden inzien dat er met de notie ‘tijd’ meer en de hand was dan de toen gangbare natuurkunde deed uitschijnen en hem ertoe deden besluiten deze thematiek verder uit te diepen.¹⁵³

De opmerking van Smith is naar mijn mening terecht, maar er dient opgemerkt te worden dat we deze ook niet mogen overdrijven. Want hoewel bij Prigogine het onderscheid vaak vaag is, is er verschil tussen een esthetische en gevoelsmatige prioriteit en een zuiver enthousiaste gedrevenheid. “[...] *la science moderne est une entreprise passionnée, d’une ambition démesurée.*»¹⁵⁴

Wat de eigenlijke interactie tussen de biologie en de studie van de onomkeerbaarheid en systemen uit evenwicht betreft, is Smith misschien iets te voorbarig. De biologie onderzoekt vooral hoe bepaalde processen en systemen zich gedragen, maar er zijn veel zaken die aan haar verklaringen ontsnappen. Zelfs het reductionistische domein binnen de biologie stelt zich bepaalde vragen niet. Deze visie vinden we ook terug bij Gerard Bodifée: “*Het DNA levert informatie voor de groei van een organisme, waarom legt een organisme de informatie over zijn structuur niet in het DNA? Waarom verenigen na een celdeling de beide dochtercellen zich niet opnieuw tot één cel?*”¹⁵⁵ Bevindingen zoals deze van Prigogine zouden de biologie kunnen helpen om binnen haar vakgebied complementaire waarom-vragen te stellen (en eventueel op te lossen).

3.5 De kritische blik van Cosma Shalizi

3.5.1 Prigogine algemeen bekeken

Cosma Shalizi besteedde, in tegenstelling tot de bemerkingen die we nu reeds bekeken, iets meer inhoudelijke aandacht aan Prigogine en zijn werk. Shalizi heeft het niet zo op Prigogine begrepen en vindt dat hij door zijn afkeer van de zogenaamde ‘koude wetenschappen van het zijn’ verworden is tot de “[...] *patron scientist of New Age*

¹⁵³ Een voorbeeld hiervan is het video-interview dat vrijelijk te bekijken valt op <http://www.youtube.com/watch?v=2NCdpMIYJxQ> of het interview in de Financieel-Economische Tijd van 17 mei 1997

¹⁵⁴ I. PRIGOGINE, *Le futur n’est pas donné*, p. 16.

¹⁵⁵ G. BODIFÉE, *Ruimte voor vrijheid*, p. 98.

twinks, of post-modern I-know-not-whats, of some anti-post-modern I-know-not-whats [...]".¹⁵⁶ Natuurlijk geeft Shalizi toe dat Prigogine uitstekend werk verricht heeft op het domein van de niet-evenwichtsthermodynamica en dat hij vóór anderen een degelijke studie ondernam naar de vorming van patronen en zelforganisatie (hoewel Shalizi dit project niet geslaagd noemt) en zo een aansporing naar andere toe betekende om zich ook met dergelijke problemen te gaan bezighouden.

Shalizi noemt het een groot misverstand te denken dat Prigogine z'n ideeën over dissipatieve structuren enig nut hebben bij een experimenteel onderzoek naar of een theoretische analyse van patroonvorming. "*The Brusselator-type models of chemical oscillators and other excitable media are quite incompetent to handle many important and easily-observed experimental phenomena; and so on.*"¹⁵⁷ Zoals Pierre Hogenberg het stelt: "*I don't know of a single phenomenon his theory has explained.*",¹⁵⁸ verwijzend naar Prigogine.

Shalizi gaat verder door te stellen dat z'n ideeën over onomkeerbaarheid in wezen helemaal niet verbonden zijn met het concept van zelforganisatie. Het is zelfs mogelijk om een omkeerbaar systeem te hebben dat toch mooi aan zelforganisatie doet. Raissa D'Souza en Norman Margolus maken zo'n model duidelijk in hun paper 'Reversible aggregation in a lattice gas model using coupled diffusion fields'.¹⁵⁹

Shalizi merkt ook dat Prigogine vaak als belangrijk wordt beschouwd bij het ontstaan van de chaostheorie. Toch boekte hij zelf geen resultaten binnen de niet-lineaire dynamica, aldus Shalizi, maar maakte hij gewoon gebruik van resultaten verkregen door wiskundigen.

Prigogine was volgens Shalizi zelfs helemaal niet origineel bij zijn onomkeerbare thermodynamica. Los van de projecten van Boltzmann en Ehrenfest werd er binnen de thermodynamica reeds een doorbraak bereikt met de figuur van Lars Onsager, die resultaten boekte in 1920 en ze publiceerde in 1931, zo'n 20 jaar vóór Prigogine. Het leverde hem zelfs de Nobelprijs voor scheikunde op in 1968 omdat hij de niet-evenwichtsthermodynamica liet aanvangen. Toch heeft er nog bijna niemand van Onsager gehoord (buiten dit vakgebied), merkt ook Shalizi op, iets waarvan hij denkt dat

¹⁵⁶ C. SHALIZI, *Ilya Prigogine*, 2006, url: <http://www.cscs.umich.edu/~crshalizi/notebooks/prigogine.html> s.p.

¹⁵⁷ C. SHALIZI, *Ilya Prigogine*, s.p.

¹⁵⁸ P. HOGENBERG, "From Complexity to Perplexity", *Scientific American*, 1995, 5, s.p.

¹⁵⁹ R. D'SOUZA & N. MARGOLUS, *Reversible aggregation in a lattice gas model using coupled diffusion fields*, url: <http://arxiv.org/abs/cond-mat/9810258v1>, 1998, passim

het te wijten valt aan het feit dat Onsager niet de pretentie had om een metafysische meerwaarde aan zijn bevindingen toe te kennen.¹⁶⁰

Tenslotte zijn de zogenaamde nieuwigheden in het werk van Prigogine¹⁶¹ “[...] *in fact part of orthodox statistical mechanics, and [...] has been so ever since Boltzmann.*”¹⁶²

Wat de filosofische relevantie betreft, begrijpt Shalizi wel dat het onderscheid tussen een universum dat beheerst wordt door deterministische en omkeerbare wetten en een dat geregeerd wordt door onomkeerbare wetten, een discussie is die menig wetenschapper of filosoof bezighoudt. Maar hij ziet niet hoe dit enige invloed op ons mensbeeld of op ethiek kan hebben.

3.5.2 Een korte blik op dissipatieve structuren

Shalizi bekijkt ook de dissipatieve structuren, iets waar Prigogine uitermate veel belang aan toeschrijft. “*We call something dissipative if it loses energy to waste-heat. (Technically: if volume in the phase space is not conserved.)*”¹⁶³

Wanneer men systemen bekijkt die ver uit evenwicht zijn, worden niet-lineaire termen belangrijk. Er zijn echter geen algemene regels voor het oplossen van niet-lineaire differentiaalvergelijkingen, zo stelt Shalizi. Maar er kan echter een algemeen principe bestaan dat tot vruchtbare resultaten kan leiden.

“*What Prigogine claims to have done is to have found, if not another extremum principle, then at least an inequality (a "universal evolution criterion"), and to have used it to work out the theory of dissipative structures, according to which patterns are supposed to form when the uniform, uninteresting "thermodynamic branch" of the system becomes unstable.*”¹⁶⁴

In het artikel ‘Broken symmetry, emergent properties, dissipative structures, life: are they related’¹⁶⁵ tonen Philip Anderson en Daniel Stein, vertrekkend van een vergelijking tussen het breken van symmetrie bij systemen in thermodynamisch evenwicht en

¹⁶⁰ C. SHALIZI, *Ilya Prigogine*, s.p.

¹⁶¹ Shalizi heeft het hier onder andere over probabilistische benaderingen en het verlaten van individuele banen van partikels ten voordele van statistische ensembles.

¹⁶² C. SHALIZI, *Ilya Prigogine*, s.p.

¹⁶³ C. SHALIZI, *Dissipative structures*, url: <http://bactra.org/notebooks/dissipative-structures.html>, 1997, s.p.

¹⁶⁴ C. SHALIZI, *Dissipative structures*, s.p.

¹⁶⁵ PH. ANDERSON & S. DANIEL, “Broken symmetry, emergent properties, dissipative structures, life: are they related”, in: F. YATES (ed.), *Self-Organizing Systems: The Emergence of Order*, New York, Plenum Press, 1987, passim.

systemen ver van evenwicht, aan dat er geen goed ontwikkelde theorie van dissipatieve structuren bestaat, en dat er hoogstwaarschijnlijk zelfs geen stabiele dissipatieve structuren tout court bestaan. Zodoende kan speculatie hieromtrent ons ook niets meer vertellen over het leven of het ontstaan ervan, iets waarvan Prigogine dacht er wel in geslaagd te zijn.

3.5.3 Bespreking en bemerkingen

Eerder dan de conceptuele bemerkingen die we reeds in de vorige kritieken zagen, worden we hier gewezen - door Shalizi en door de papers van de overige bovenvermelde auteurs die handelen over hun bevindingen - op het bestaan van experimentele evidenties die een tegengewicht bieden voor door Prigogine en zijn school verkregen resultaten.

Shalizi echter meent uit dergelijke resultaten het falen van Prigogine z'n project te mogen besluiten. Dit lijkt nogal ondoordacht, alsof men opeens hét natuurkundige licht heeft gezien en een eindpunt heeft bereikt. Volgens mij zijn de gevolgen bescheidener. Deze recente experimentele resultaten wijzen ten hoogste enkele pijnpunten in de vroegere fysische en chemische theorieën aan en nodigen uit tot nieuwe vragen en andere klemtonen. Het is hier allerm minst het geval dat de ene bevinding genoeg draagkracht bezit om de andere zomaar te mogen weggooien. Eerder kan hun interactie aanleiding geven tot een vruchtbare discussie die ons uiteindelijk terug een stapje verder kan brengen in het wetenschappelijk discours.

Shalizi wijst er verder op hoe Onsager Prigogine voorging in het onderzoek naar onomkeerbare processen. Dit is inderdaad de geschiedkundige waarheid. Het is echter jammer dat Shalizi dit als argument gebruikt om de (eventuele) relevantie en originaliteit van Prigogine te kelderen. Dat Onsager niet veel naamsbekendheid meer heeft, is allerm minst de fout van Prigogine. Zelfs al zou Prigogine bekender geworden zijn door zijn theorieën in een metafysisch kleedje te steken, dan nog staat dat er los van dat Onsager niet zo bekend is.

Ook is het zo dat Onsager eerder verbonden is aan zijn 'principe van minste energiedissipatie', terwijl Prigogine geassocieerd wordt met het 'principe van minimale entropieproductie'.¹⁶⁶

¹⁶⁶ G. DICKEL, "The variational principles of Onsager and Prigogine in membrane transport", in: *Faraday Discussions of the Chemical Society*. 1984, 77, passim.

Algemeen is er in de klassieke theorie van de onomkeerbare thermodynamica nog steeds sprake van het lineaire Onsager-Prigogine principe.

Tenslotte was Prigogine zich bewust van het werk van Onsager.

*“Prigogine knew from the beginning that minimum entropy production was valid only for the linear region of irreversible phenomena, the one near equilibrium to which the famous reciprocity relations of Onsager are applicable. Prigogine’s next challenge was to extend his idea to states far from equilibrium, for which Onsager relations are not valid but which are still within the scope of macroscopic description.”*¹⁶⁷

Ook in werken als ‘Exploring complexity’ verwijst Prigogine expliciet naar het werk van Onsager. Tenslotte wordt Onsager in de presentatie die professor Stig Claesson over Prigogine gaf tijdens de Nobelprijzuitreiking als het ware bijna ‘bedankt’ voor zijn pionierswerk.

Wat Prigogine dus wou doen was voortbouwen op het werk van Onsager. In dezelfde lijn doen ook de verwijzingen van Shalizi naar Boltzmann of Ehrenfest geen afbreuk aan het oeuvre van Prigogine. Het zou eerder uitermate dubieus zijn moest een filosoof of wetenschapper gevrijwaard zijn van enige traditie waarin hij geplaatst is en waarop hij verder bouwt, zonder dogmatisch opgesloten te zitten.

3.6 Bricmont

3.6.1 Jean Bricmont en de notie ‘baan’

In deze sectie zal ik enkele kritieken van Jean Bricmont, professor in de theoretische fysica en verbonden aan de Université Catholique de Louvain, op het werk van Ilya Prigogine bespreken. Bricmont gebruikt een deel van deze argumentatie ook om zijn claim ter verdediging van het determinisme te onderbouwen, of althans dat er nog geen bevredigende argumenten zijn om het determinisme overboord te gooien. Omdat ik me hier probeer te beperken tot de discussie betreffende het project van Prigogine, zullen de opvattingen van Bricmont betreffende het determinisme later nog ruim aan bod komen, wanneer ik die thematiek bespreek.

¹⁶⁷ T. PETROSKY, “Obituaries: Ilya Prigogine, in: *SIAM News*”, 2003, 7, p. 11.

Wanneer we nu naar Prigogine (en geestesgenoten) kijken, zien we dat hij er op een cruciaal punt voor ijvert om de notie van een vaste baan te verlaten, ten voordele van waarschijnlijkheden.¹⁶⁸

Bricmont tracht de absurditeit van het verlaten van de notie van een vaste baan aan te tonen. Hij doet dit met een voorbeeld van een biljardbal die zich voortbeweegt op een oppervlak waarbij we *grosso modo* wrijving kunnen negeren en dat bezaaid is met obstakels zodat het systeem zich chaotisch gedraagt. Omdat we gebruik maken van een niet te reduceren probabilistisch beschrijving kennen we aan de bal geen positie toe, maar een verdeling van de waarschijnlijkheid. Echter, aangezien we te maken hebben met een chaotisch systeem, zal die verdeling van de waarschijnlijkheid zich na verloop van tijd uitsmeren over heel de biljardtafel, zodat we een uniforme waarschijnlijkheid hebben om de bal in gelijk welke regio van de tafel aan te treffen. Aldus lijkt het moeilijk hard te maken om de waarschijnlijkheidsverdeling na een bepaalde tijd als een waarlijk niet-reduceerbare beschrijving van het systeem te zien. Eerder beschrijft dit onze kennis van het systeem (of juist het gebrek eraan), gebaseerd op onze initiële informatie.¹⁶⁹

Niemand zal natuurlijk ontkennen dat de bal altijd érgens is, maar bovenstaand voorbeeld maakt wel duidelijk hoe men de notie van ‘baan’ kan elimineren, namelijk door de dynamiek uit te drukken op het niveau van de waarschijnlijkheidsverdelingen. Zo krijgt men wel te maken met de hoger vermelde problemen. Maar zelfs al wordt de dynamiek fundamenteel uitgedrukt in termen van banen, waarschijnlijkheden zijn zonder meer wel bruikbare werktuigen waarvan de eigenschappen wiskundig worden afgeleid van de eigenschappen van banen.

Wat bovenstaande (het voorbeeld van de biljardbal) eveneens aantoont, is de noodzaak om verschillende niveaus van analyse te onderscheiden. Zo vraagt Bricmont zich af waarom we omwille van onze (tijdelijke) onkunde om vergelijkingen voor de beweging van de bal op te lossen, meteen ook de notie ‘baan’ van tafel zouden moeten vegen. We kunnen eventueel eerst trachten exacte bewegingswetten te vinden en zo stapsgewijs onze kennis verder opbouwen.

¹⁶⁸ Hierbij hebben we dus te maken met een set van dergelijke ‘banen’.

¹⁶⁹ J. BRICMONT, *Science of chaos or chaos in science*, url: <http://arxiv.org/abs/chao-dyn/9603009>, 1996, pp. 7-8

“It would be wrong to attribute any constructive role to our ignorance.¹⁷⁰ And it is also erroneous to assume that the system must be somehow indeterminate, when we apply probabilistic reasoning to it.”¹⁷¹

Op dit punt kom ik later nog terug, wanneer ik het determinisme bespreek.

3.6.2 Irreversibiliteit

Een cruciale pijler voor de verdere bespreking van deze thematiek is het begrip ‘irreversibiliteit’. De basiswetten van de fysica zijn omkeerbaar.

Het is wel zo dat we bij bepaalde bewegingen nooit hun omgekeerde variant waarnemen.¹⁷² De tegenstanders van de omkeerbaarheid stellen dan ook dat de dynamica sinds haar oorsprong een radicale negatie van de tijd impliceerde, maar ze slagen er nooit in om de contradictie tussen de omkeerbaarheid van de basiswetten en het bestaan van onomkeerbare fenomenen te beargumenteren, aldus Bricmont. Dit komt doordat er helemaal geen sprake is van een contradictie.

Bricmont citeert Prigogine wanneer die zeg: “[...] *no body of knowledge ever claimed the equivalence between doing and undoing, [...]*”,¹⁷³ maar voegt er aan toe dat er ook helemaal geen sprake is van equivalentie. Wat telt is dat beide bewegingen verenigbaar zijn met de basiswetten van de fysica.

Hét grote probleem zit volgens Bricmont in een verwarrende vraagstelling omtrent de onomkeerbaarheid: *“The only real problem with irreversibility is not to explain irreversible behaviour in the future, but to account for the “exceptional” conditions of the universe in the past.”*¹⁷⁴ Deze bemerking zullen we in het volgende hoofdstuk ook nog tegenkomen.

Prigogine oppert dat dynamische systemen met duidelijke chaotische eigenschappen ‘intrinsiek onomkeerbaar’ zijn. Prigogine en z’n medewerkers trachten namelijk de ‘pijl van de tijd’ niet op te vatten als het resultaat van een fenomenologische benadering, maar

¹⁷⁰ Dergelijke argumentatie zullen we later ook nog bij de discussie rond het determinisme zien opduiken.

¹⁷¹ J. BRICMONT, *Science of chaos or chaos in science?*, p. 9.

¹⁷² Zo gaat een mens steeds van leven naar dood, niet omgekeerd. We verwachten we ook niet dat we bij een gas dat we vrijlaten in de linkerhelft van een ruimte, nadat het vervolgens de hele ruimte heeft ingenomen, alle partikels terug naar de linkerhelft zien gaan.

¹⁷³ J. BRICMONT, *Science of chaos or chaos in science*, p. 10.

¹⁷⁴ *Ibid.*, p. 16.

zien hem integendeel als een inherente eigenschap van klassen van onstabiele dynamische systemen.

Eerst en vooral bekritiseert Bricmont het feit dat men (Prigogine e.d.) de onomkeerbaarheid verklaart door te verwijzen naar systemen waar an sich niets onomkeerbaar gebeurt. Zo verklaren ze, aldus Bricmont, zaken waarvan er eigenlijk niets verklaard moet worden. Dit gaat onder andere op voor de befaamde bakkerstransformatie. Bricmont geeft toe dat er van een zekere onomkeerbaarheid sprake is, maar deze situeert zich op het niveau van de waarschijnlijkheidsverdeling. De waarschijnlijkheden verspreiden zich over de faseruimte en zullen binnen de kortste keren een uniforme verspreiding bereiken.¹⁷⁵ Dit wijst er op dat verschillende punten bij aanvang, ook al lagen die dicht bij elkaar, van elkaar zullen gescheiden worden door chaotische dynamica. Belangrijk is dan de vraag wat de fysische betekenis is van bovenstaande. Hierover is Bricmont duidelijk: “*A physical system, chaotic or not, is described by a trajectory in phase space, and is certainly not described adequately by the corresponding probability distributions.*”¹⁷⁶ De onomkeerbaarheid is dus geen fysische eigenschap van het systeem, maar komt voor uit onze onkunde om bepaalde banen te beschrijven.¹⁷⁷

Is de onomkeerbaarheid dan subjectief? Zoals we eerder zagen, heeft de notie van waarschijnlijkheid, zoals geïntroduceerd door Boltzmann, voor Prigogine een objectieve betekenis. Dit is dankzij het bestaan van onstabiele dynamische systemen. Het verklaren van onomkeerbaarheid met behulp van het gedrag van waarschijnlijkheidsverdelingen, zoals Prigogine dus doet, is volgens Bricmont een weg volgen die de begrenzingen van de menselijke kennis een fundamentele rol laat spelen in de fysica.¹⁷⁸

¹⁷⁵ J. BRICMONT, *science of chaos or chaos in science*, p. 16.

¹⁷⁶ Ibid., p. 17.

¹⁷⁷ Belangrijk is om in te zien dat de rol van de waarschijnlijkheden zoals hierboven opgevat verschilt van deze in de klassieke context. In deze laatste worden ze toegepast zoals in het experiment met het opwerpen van een muntstuk.

¹⁷⁸ Bricmont pakt de kwestie rond subjectiviteit dus op deze manier aan. Hij wil geen argument ondersteunen in de vorm van: als de microscopische variabelen zich omkeerbaar gedragen en als onomkeerbaarheid slechts opduikt wanneer we er voor kiezen ons te concentreren op macroscopische variabelen, dan is onze verklaring van onomkeerbaarheid sowieso onvermijdelijk geïnfecteerd door subjectivisme.

3.6.3 Recurrentietheorema van Poincaré

Een ander veelbesproken punt in deze kwestie is het recurrentietheorema van Poincaré. Toegepast op de situatie beschreven in noot 172 stelt dit dat wanneer de ruimte lang genoeg geïsoleerd blijft, alle verschillende partikels terug naar de linker helft van de container zullen gaan, vanwaar ze vertrokken zijn. Natuurlijk is de recurrentietijd die hieraan verbonden is (de tijd die voorbijgaat eer de partikels effectief terug in de linkerhelft van de ruimte zullen gesitueerd zijn) onnoemelijk groot. Zodoende gaf ook Prigogine toe dat wanneer men de onomkeerbaarheid enkel zou beschrijven in termen van een gas dat een hele ruimte inneemt, dit begrip ('onomkeerbaarheid') inderdaad slechts een illusie zou zijn, omdat het dan te wijten zou zijn aan ons gebrek aan geduld (om de oorspronkelijke toestand terug te zien verschijnen). We hebben hier bovenal te maken met een wiskundig probleem:

“[...] if one tries to rigorously derive an irreversible macroscopic equation from the microscopic dynamics and suitable assumptions on initial conditions, the Poincaré recurrence time will put a limit on the length of the time interval over which these statements can be proven.”¹⁷⁹

Maar men mag het feit dat men een begrenzing stelt aan de wiskundige gepastheid niet verwarren met de oorsprong van de onomkeerbaarheid.

3.6.4 Ergodiciteit

Een volgende uitspraak die men vaak hoort, is dat een systeem ergodisch¹⁸⁰ moet zijn of over een eigenschap die voor vermenging zorgt, moet beschikken, wil het evenwicht bereiken. Echter, zo vermeldt Bricmont, deze eigenschappen zijn noodzakelijk noch voldoende om een systeem tot evenwicht te brengen. Dit is in tegenstelling met de meer aanvaarde opvatting dat een dynamisch systeem, wanneer het ergodisch is, convergeert naar evenwicht. Daarom ziet Bricmont zich genoodzaakt enkele problemen weer te geven die opduiken bij de notie van ergodiciteit.

¹⁷⁹ J. BRICMONT, *Science in chaos or chaos in science*, p. 19.

¹⁸⁰ Het begrip ergodiciteit betekent dat de eigenschappen van een systeem voor elke verschijningsvorm (bijvoorbeeld over tijd, plaats, of andere variatie) hetzelfde blijven; als het systeem lang genoeg gevolgd wordt, dan komen alle mogelijke toestanden voorbij. Of in de woorden van Bricmont: “*A dynamical system is ergodic if the average time spent by a trajectory in any region of the phase space is proportional to the volume of that region.*” J. BRICMONT, *Science of chaos or chaos in science*, p. 20.

Vooreerst is het uitermate moeilijk om een wiskundig bewijs tot stand te brengen dat aantoonde dat een realistisch mechanisch systeem ergodisch is. Als we zulk een bewijs dan toch als gegeven beschouwen, rijst het probleem van hoe het in deze opvatting van ergodiciteit mogelijk is om een fenomeen te observeren of te meten dat niet in evenwicht is. Bricmont oppert dat er zich hier een conceptuele verwarring voordoet tussen de zogenaamde ‘relaxatietijd’ (van enkele moleculen) en de ‘ergodische tijd’. De ergodische tijd is veel groter dan de relaxatietijd. We kunnen zelfs de tijd die het duurt voor een baan om in elke cel te passeren enorm uitrekken richting oneindig, door steeds kleinere en kleinere cellen te nemen.¹⁸¹

Men kan dan aan bovenstaande toevoegen dat het gemiddelde van tijd en ruimte niet zozeer (ongeveer) gelijk moet zijn voor elke functie, maar alleen voor deze met fysische relevantie. Wat men dan verkrijgt, zo merkt Bricmont op, is dat ergodiciteit niet noodzakelijk is voor onomkeerbaarheid, waar we hoger al zagen dat het niet voldoende is. Al wat we nodig hebben is dat “[...] *the microscopic configuration evolves in phase space towards those regions where the relevant macroscopic variables take their equilibrium values.*”¹⁸²

Bricmont besluit uit deze aanpak dat dit geen zuivere mechanisch criterium is voor onomkeerbaar gedrag.¹⁸³ Aldus komen we tot een dilemma: ofwel geven we een plaats aan de distinctie tussen micro en macro, met een fundamentele rol voor de initiële condities in onze verklaring van onomkeerbaarheid, ofwel niet. Wat de tweede optie betreft, is er niemand die ooit een consistent alternatief¹⁸⁴ naar voor heeft gebracht. Kiezen we voor het eerste, dan zou er niet echt een probleem zijn met onomkeerbaarheid en spelen bepaalde eigenschappen van de dynamica (zoals ergodische eigenschappen) geen rol.

3.6.5 Bespreking en bemerkingen

Prigogine stelde dat de deterministische trajecten van onstabiele systemen idealisaties zijn. Hierover bestaat veel verwarring. Prigogine schreef dat deterministische trajecten niet bestaan in onstabiele systemen. Bricmont interpreteert dit als de totale afwezigheid van trajecten hoe dan ook, en argumenteert tegen de absurditeit hiervan. Robert Bishop

¹⁸¹ J. BRICMONT, *Science of chaos or chaos in science*, pp. 20-22.

¹⁸² *Ibid.*, p. 21.

¹⁸³ Dit gaat ook op voor andere ‘ergodische’ eigenschappen: K-systeem, Bernouilli,...

¹⁸⁴ Zijnde een verklaring van onomkeerbaarheid die opgaat voor alle initiële condities of toepasbaar is op alle functies van de configuratieruimte.

echter wijst erop dat dit foutief is. Prigogine en zijn school zetten zich slechts af tegen een bepaalde soort banen, namelijk “[...] *those which have unchanging width and are everywhere differentiable (“exact and smooth” in the Brussels-Austin nomenclature).*”¹⁸⁵

Een ander punt van kritiek op Bricmont wordt aangehaald door Leo Näpinen en Peeter Mürsepp.¹⁸⁶ Zo is het gebrek aan een duidelijke onderscheid tussen deterministische en kwantumchaos een obstakel om Prigogine goed te evalueren.¹⁸⁷ Het fundament van hun bezwaar tegen de aanpak van Bricmont is de volgende:

“It is shown that Jean Bricmont has missed the target in his critique of I. Prigogine's ideas, as the latter has concentrated his interest on systems consisting of infinite (arbitrarily large) number of particles in incessant mutual impact, the former on systems that have a finite (not necessarily large, although sometimes very large) number of particles, which move freely of any mutual impact or participate only in transient interaction.”

Het is opvallend hoe eenzijdig de kritiek van Bricmont is, temeer omdat hij veelal wordt gezien als een van de meest prominente critici van Prigogine. Dit laatste is ook de reden waarom ik hem nogal uitgebreid heb weergegeven. Maar tegelijkertijd is het ook opvallend hoeveel herhalingen wel niet opduiken. De rode draad doorheen zijn betoog is telkens opnieuw dat de fundamentele onomkeerbaarheid gelegd worden in onze onkunde om voldoende details te verwerken, in ons ongeduld en in onze onwetendheid. Het bestaan van onze beperkingen is dan wel een feit, het lijkt incorrect om dit aan te wenden ter ondersteuning van een bepaalde visie (zowel pro als contra), omdat het een argument betreft dat nogal gratis kan gebruikt worden, aangezien het het veelbesproken statuut onze eigen menselijke cognitie betreft.

Wat de resultaten van Prigogine betreft, deze zijn allerminst inferieur aan de opinie van Bricmont. Bricmont redeneert vanuit de alledaagse logica om duidelijk te maken hoe onvertrouwd, absurd en onreëel fundamentele waarschijnlijkheden wel lijken. Prigogine redeneert vanuit eenzelfde logica om eveneens duidelijk te maken hoe onvertrouwd, absurd en onreëel het wel niet is om de stroom van de tijd en de openheid van de

¹⁸⁵ R. BISHOP, *Brussels-Austin nonequilibrium statistical mechanics in the early years: similarity transformations between deterministic and probabilistic descriptions*, url: <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00001155/>, 2003, p. 5.

¹⁸⁶ L. NÄPINEN & P. MÜRSEPP, “The concept of chaos in contemporary science: on Jean Bricmont's critique of Ilya Prigogine's ideas”, in: *Foundations of Science*, 2002, 4, passim.

¹⁸⁷ L. NÄPINEN & P. MÜRSEPP, The concept of chaos in contemporary science: on Jean Bricmont's critique of Ilya Prigogine's ideas, p. 465.

toekomst vanuit ons menszijn niet te erkennen. Maar concrete en onderbouwde argumentatie, die blijkt bij Bricmont niet steeds aan de orde te zijn.

3.7 Besluit

Nu we enkele auteurs bekeken hebben die Prigogine onder handen namen, er enkele voorzichtige bemerkingen bij plaatsten en hun eventuele relevantie bevroegen, kunnen we ons afvragen wat de rode draad doorheen die bevindingen is.

Opvallend is dat besprekingen betreffende het werk van Prigogine zich zelden inlaten met technische details. In het beste geval linkt men experimentele resultaten aan de conclusies van Prigogine – om te ondersteunen dan wel te weerleggen - zonder dat deze eerste zich expliciet op deze laatste beroepen. Maar zoals we eerder al opmerkten is de interesse voor Prigogine niet zo heel groot.

Wat wel frequent voorkomt, is een conceptueel geworstel. Prigogine is zelf vaak onduidelijk over de draagwijdte en het belang van bepaalde stellingen. Ook bepaalde termen en concepten worden niet steeds even overzichtelijk en helder ingevuld. Hier komen we bij de algemene verdienste van bovenstaande opinies en kritieken: ze helpen het discours uit te zuiveren, of geven althans de aanzet hiertoe. Dit kan een goed begrip van en zodoende ook vooruitgang binnen dit wetenschappelijk domein alleen maar ten goede komen en helpt vele zinloze discussies te vermijden. De aanpakken verschillen natuurlijk wel: van directe bevraging (bijvoorbeeld Peter Gunter), over analyse (bijvoorbeeld David Bohm) tot een verkeerde interpretatie van de begrippen bij Prigogine (bijvoorbeeld Jean Bricmont), die aanleiding geeft tot een vorm van ‘metakritiek’. Natuurlijk mogen we het onderscheid tussen een juiste interpretatie en een foutieve ook niet strikt en definitief aflijnen. Het is vooral het vruchtbare proces van verheldering dat hier telt.

Zonder alle aangestipte punten van dit hoofdstuk opnieuw aan te halen, kunnen we algemeen stellen dat, in de opinies die we besproken hebben, Prigogine niet fundamenteel ondermijnd wordt. Maar er zijn wel enkele vaagheden in zijn project, alsook enkele zwakke plekken die vatbaar zijn voor verdere kritiek.

4. De pijl van de tijd, pro en contra

*"O let not Time deceive you, you cannot
conquer Time."*

W. H. Auden

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal ik enkele theorieën, opvattingen en prominente figuren aanhalen die een inzicht kunnen verschaffen in de discussie omtrent de pijl van de tijd. Zoals zal blijken schaarst de publieke opinie, ondanks een exponentiële groei in het aantal wetenschappelijke ‘revoluties’ de laatste decennia, zich nog grotendeels achter het vertrouwde idee van een tijdssymmetrische en omkeerbare wereld. Het is inderdaad goed mogelijk om een pijl van de tijd met behulp van experimenten te detecteren, maar de vraag blijft dan in hoeverre die pijl van de tijd op zichzelf een objectief en fundamenteel statuut mag toegeschreven worden.

Belangrijk is ook dat er verschillende ‘pijlen van de tijd’ kunnen onderscheiden worden, hoewel het opmerkelijk is dat vele auteurs zich toespitsen op één deelgebied en menen dat hun resultaten gratis mogen geëxtrapoleerd worden naar de andere domeinen. Naast de eventuele objectieve waarde van de pijl van de tijd, duikt dan ook de complementaire vraag op in hoeverre er sprake kan zijn van één unificerende pijl van de tijd.

Wanneer we die twee zaken beschouwen, wordt al snel duidelijk hoe problematisch dit alles is. Volstaat het om een pijl van de tijd experimenteel te bevestigen, of is er, deels omwille van dat experimentele opzet, reden om aan te nemen dat deze nog zou kunnen gereduceerd worden tot een symmetrische basis? En vervolgens, is het bewijs van één zogenaamde pijl van de tijd, verondersteld dat we hem als fundamenteel aanvaarden, voldoende om te besluiten dát er in de realiteit sprake is van een algemene en objectieve pijl van de tijd? Deze vragen zijn belangrijk omdat ze ons kunnen vertellen of Prigogine al dan niet de pijl van de tijd blootgelegd heeft.

Voor alle duidelijkheid vermeld ik de toch wel algemeen aanvaarde klassering en indeling, waarvoor ik verwijs naar Tony Rothman die in het Centre for Science In Society in het Bryn Mawr College op 19 februari 2003 een lezing tijdens het symposium

over 'A matter of time', gebaseerd op zijn boek 'The seven arrows of time'.¹⁸⁸ Dit zijn de manieren waarop de natuur een onderscheid maakt tussen heden en verleden.

- Er is de pijl van het geheugen. Het geheugen herinnert zich alleen het verleden, niet de toekomst.
- Er is de elektromagnetische pijl waarbij elektromagnetische oorzaken hun effecten voorafgaan.
- De kwantumpijl toont aan hoe golffuncties ineenstorten, maar nooit omgekeerd.
- De pijl van de zwarte gaten, of hoe zwarte gaten bestaan maar hun omgekeerde krachten dan weer niet.
- De kosmologische pijl wijst erop hoe we in een uitdijend universum leven en niet in een dat contracteert. Hierbij kan men zich de vraag stellen of de tijd in dat laatste geval van richting zou veranderen.
- Er bestaat een kaon-pijl die aantoont dat het verval van een kaon niet symmetrisch in de tijd verloopt..
- Tenslotte is er de pijl van de entropie die aanduidt dat entropie altijd stijgt (wat zoveel betekent als de Tweede Hoofdwet van de thermodynamica).

We zagen eerder ook al de notie van intrinsieke tijd opduiken. Het is belangrijk te weten dat er dus twee soorten onomkeerbaarheid zijn: extrinsieke en intrinsieke. Extrinsieke onomkeerbaarheid is onomkeerbaar gedrag dat te wijten is aan de interactie van een systeem met zijn omgeving, waarbij het systeem zich reversibel gedraagt als deze interactie wegvalt.¹⁸⁹ Intrinsieke onomkeerbaarheid wijst op onomkeerbaarheid die zijn oorsprong vindt in de dynamiek van een fysisch systeem, zonder expliciete referentie naar een interactie met de omgeving.¹⁹⁰ Prigogine zag deze laatste vorm van onomkeerbaarheid als de fundamentele onomkeerbaarheid.

¹⁸⁸ Hijzelf baseerde zich hiervoor op Poincaré.

¹⁸⁹ R. BISHOP, *Brussels-Austin nonequilibrium statistical mechanics in the early years: similarity transformations between deterministic and probabilistic descriptions*, p. 4.

¹⁹⁰ *Ibid.*, p. 4.

4.2 Het KteV- en CPLEAR-experiment

4.2.1 De experimentele opzet

In december 1998 verscheen het artikel ‘Experiment sees arrow of time: at last’ in ‘Physics World’ van de hand van Nick Mavromatos, medewerker van het Departement of Physics van de universiteit van Oxford. Daarin vermeldt hij het KteV-experiment van het Fermilab in de Verenigde Staten. Hierin kwam men tot resultaten van een experiment met zeldzame gebeurtenissen, het 1 op 10^7 verval van een enkel kaon tot elektronen en pionen. In een dergelijk proces wordt de omkeerbaarheid van de tijd duidelijk geschaad. “*Since changing the direction of time also reverses the direction of momentum of a particle, the KteV team detect violation of T^{191} symmetry by comparing the rates of some decays with other decays in which the particles emerge in the "time-reversed" direction.*”¹⁹²

Ook in het zogenaamde CPLEAR-experiment te CERN, het Europees laboratorium voor deeltjesfysica te Genève, toonde men een breuk in de symmetrische tijdsomkeer aan. Men deed dit door een asymmetrie te verifiëren tussen het aantal initiële anti-kaonen die vervallen tot positronen en het aantal initiële kaonen die vervallen tot elektronen. Deze experimenten zijn gebaseerd op ontdekkingen van Fitch en Cronin uit 1964.¹⁹³

Wat aangetoond werd met de experimenten van de schending van de tijdsomkeer is dat de transformatie van materie tot antimaterie asymmetrisch is in de tijd, vergeleken met het omgekeerde proces. Dit kan ook bijdragen tot een goed begrip van de kosmos, bijvoorbeeld waarom ons universum is opgebouwd uit materie eerder dan antimaterie, ondanks het feit dat van beide evenveel werd gecreëerd bij de big bang.

Maar, zo moet er aan dit alles worden toegevoegd: “[...]the discovery of the violation of time-reversal symmetry does not tell us if entropy is produced in the microcosmos. In simple terms, these experiments do not answer the question: do kaons grow old?”¹⁹⁴

Toch blijkt er op het niveau van de deeltjesfysica dus een pijl van de tijd te zijn. Het is (nog) niet aannemelijk dat het diezelfde pijl van de tijd is waarvan in de thermodynamica sprake is en waarvan het verouderingsproces een gevolg is, maar het is alleszins een pijl

¹⁹¹ T duidt tijdsomkering aan.

¹⁹² N. MAVROMATOS, “Experiment sees arrow of time: at last”. In: *Physics World*. 1998, 12, s.p.

¹⁹³ J. CRAMER, “Velocity reversal and the arrows of time”, in: *Foundations of Physics*, 1988, 12, s.p.

¹⁹⁴ N. MAVROMATOS, *Experiment sees arrow of time: at last*, s.p.

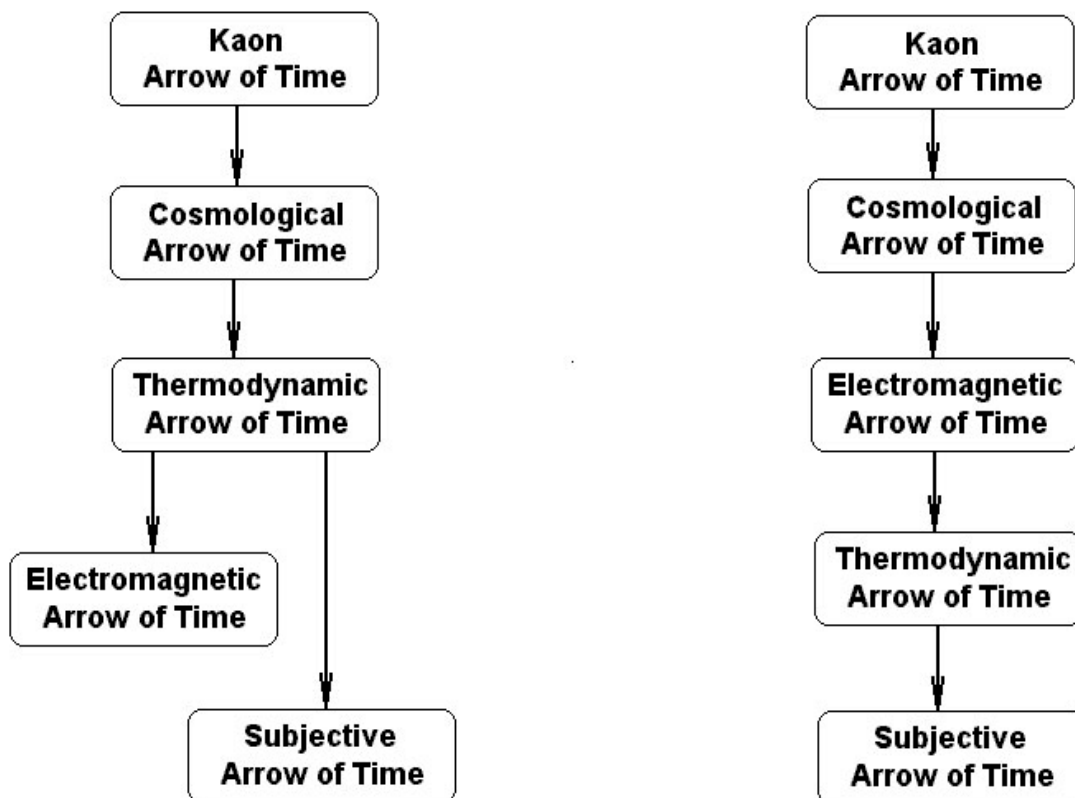
van de tijd die zich manifesteert in het feit dat er geen symmetrie in de tijd is tussen het proces van de vorming van materie tot antimaterie en omgekeerd.

4.2.2 Bespreking en bemerkingen

In dit experiment duikt er overduidelijk een pijl van de tijd op. Belangrijk is dat het kaonverval geplaatst wordt onder intrinsieke onomkeerbaarheid. Zoals we reeds eerder zagen, is het juist deze onomkeerbaarheid die bij Prigogine, en de hele Brussel-Austin-groep, een fundamenteel statuut heeft. Dat zogenaamde fundamenteel statuut heeft echter veel weg van een bewuste en eerder subjectieve keuze ten gevolge van het welbepaalde opzet en de doelstellingen van Prigogine.

Ook John Cramer stelt zich in het artikel 'Velocity reversal and the arrows of time' de vraag naar de onderlinge relatie tussen de verscheidene pijlen van de tijd. Welke pijlen zijn de oorzaken, welke zijn de gevolgen?

Hij onderscheidt twee modellen van interactie die het best de algemene gangbare opinies uitdrukken:



Bron: URL: http://www.npl.washington.edu/npl/int_rep/VelRev/VelRev.html

Ik vermeld bovenstaand schema omdat het opvallend is hoe de kaon-pijl in beide als dé fundamentele oorzaak beschouwd wordt. Het linkse schema is gerelateerd aan de opinie van figuren als Wheeler, Feymann en Hawking. John Cramer verdedigt het rechtse schema.¹⁹⁵

Ik zal de onderlinge verschillen tussen en argumentatie voor beide schema's niet bespreken. Wat waar ik wel op wil wijzen, is de relatie tussen de verschillende pijlen van de tijd. In de inleiding zagen we reeds de problematiek van hun onderlinge verhouding en van hun statuut ten opzichte van de realiteit. In bovenstaande schema's worden ze met elkaar verbonden vanuit oorzaak-gevolgrelaties. Wanneer men op zulke manier te werk gaat, is het evident de zogenaamde 'subjective arrow of time' (de pijl van het geheugen, van het bewustzijn) als minst fundamenteel te bekijken. Het belang van de kaon-pijl (en dus van de pijl van de deeltjesfysica) lijkt eveneens aannemelijk. Ook voor de verdere verhoudingen kan op onderbouwde wijze geargumenteed worden.

Maar deze werkwijze gaat reeds uit van enkele onbevraagde aannames. Is de oorzaak-gevolgrelatie wel de juiste en mogen alle pijllen van de tijd dus uiteindelijk geëxtrapoleerd worden uit één welbepaalde pijl? Dit zou een geünificeerd geheel kunnen opleveren. Toch wordt er nergens verklaard waarom juist deze relatie de juiste zou zijn. Het lijkt aanvaardbaar om bepaalde pijlen van de tijd als objectiever en fundamenteler te beschouwen dan andere, maar deze schikking van de onderlinge verhoudingen ondersteunt niet noodzakelijk een oorzaak-gevolgrelatie.

Dergelijke schikkingen lossen veel problemen op die rond de pijlen van de tijd hangen, maar zijn in wezen niet meer dan schijnoplossingen, omdat de fundamentele argumentatie ontbreekt. Ook Prigogine stelt deze vragen niet – hoewel hij in het gesprek met Peter Gunter in de buurt kwam door te stellen dat men de pijl van de tijd in elke wetenschappelijke subtak opnieuw moet zien te ontdekken – en kan aldus niet om deze problematiek heen.

¹⁹⁵ J. CRAMER, *Velocity reversal and the arrows of time*, s.p.

4.3 Paul Davies over de pijl van de tijd

4.3.1 Het alternatief van Davies

In september 2002 verscheen in het magazine *Scientific American* het artikel ‘That mysterious flow’¹⁹⁶ van Paul Davies. Hierin ontkent hij dat de pijl van de tijd als objectief aspect van de realiteit, een illusie is. Er is niets binnen het domein van de fysica dat stelt dat de tijd voortvloeit, zo zegt hij; integendeel, de tijd ‘is’. Zo moet ook het onderscheid tussen verleden, heden en toekomst van de hand worden gedaan. Dit was al geopperd door Einstein, wiens speciale relativiteitstheorie weigert om een absolute en universele waarde aan het heden toe te kennen. Zo is er ook geen eenduidig antwoord op de vraag: ‘Wat gebeurt er nu op Mars (dat 20 lichtminuten van de aarde verwijderd is)?’. De meest logische conclusie, aldus Davies, is dat verleden en toekomst vastliggen in een zogenaamde tijdslandschap (analoog met een klassiek ruimtelijk landschap). “

Completely absent from this description of nature is anything that singles out a privileged special moment as the present or any process that would systematically turn future events into present, then past, events. In short, the time of the physicist does not pass or flow.”¹⁹⁷

Ook filosofisch bekeken lijkt bovenstaande opvatting Davies de meest plausibele. Het concept van ‘flux’ refereert aan beweging. De beweging van een fysisch object kan men zinnig invullen, maar wat te doen met de beweging van de tijd zelf. Het concept van een vloeiende tijd is namelijk verbonden met de tijd zelf. “*Posing the simple question "How fast does time pass?" exposes the absurdity of the very idea.*”¹⁹⁸ Zo vallen ook referenties naar het verloop van de tijd binnen de taal als een verzameling van wereldlijke toestanden, met bijvoorbeeld verwijzingen naar data of uren, weer te geven.

Waar het voor Davies dus op neerkomt is dat de pijl van de tijd een illusoir gegeven is, maar dat hij daarmee niet wil zeggen dat zaken als ‘verleden’ en ‘toekomst’ geen fysische basis hebben. Gebeurtenissen in de wereld vormen wel degelijk een opeenvolging in één richting, meestal verbonden met de Tweede Hoofdwet van de thermodynamica. Zo lijkt de natuur vol van onomkeerbare processen die een asymmetrie

¹⁹⁶ P. DAVIES, “That mysterious flow”. In: *Scientific American*. 2002, 285, pp. 40-47.

¹⁹⁷ P. DAVIES, *That mysterious flow*, p. 42.

¹⁹⁸ *Ibid.*, p. 42.

veroorzaken tussen verleden en toekomst en waarbij de pijl van de tijd om conventionele redenen naar de toekomst wijst. Dit betekent echter niet dat de pijl van de tijd zich richting toekomst voortbeweegt. De pijl wijst op een asymmetrie, niet op beweging. Meer specifiek duidt de pijl van de tijd asymmetrie van de wereld binnen de tijd aan, geen asymmetrie of flux van de tijd. Zo kan men wel over verleden en toekomst spreken als men het over temporele richtingen heeft, net zoals men ‘boven’ en ‘onder’ kan toepassen binnen het ruimtelijke domein, maar zijn beide eigenlijk inhoudsloos.

Natuurlijk blijft het gevoel van een voortschrijdende tijd zo onverklaard. Davies verwijst in deze context naar Prigogine die suggereert dat de fysica van de onomkeerbare processen de stroom van de tijd tot een objectief fenomeen in de wereld maakt. Paul Davies zelf gelooft hier niet in, omdat we het verloop van de tijd niet waarnemen, maar eerder latere toestanden onderscheiden van eerdere. Ook het feit dat we ons als mensen het verleden herinneren en niet de toekomst, wijst op asymmetrie eerder dan op verloop. Het is zo dat *‘[...]nothing other than a conscious observer registers the flow of time. A clock measures durations between events much as a measuring tape measures distances between places; it does not measure the "speed" with which one moment succeeds another. Therefore, it appears that the flow of time is subjective, not objective.’*¹⁹⁹

Paul Davies ziet het als een taak voor de psychologie en de neurofysiologie (en eventueel zelfs de linguïstiek en de cultuurstudies) om de bron van deze illusie bloot te leggen.

Verder zijn er twee aspecten aan de asymmetrie van de tijd die ervoor kunnen zorgen dat het lijkt alsof de tijd vooruitgaat.²⁰⁰ Het eerste is een thermodynamisch onderscheid tussen verleden en toekomst. Omdat entropie verbonden is met het concept van informatie binnen een systeem, lijkt het geheugen in één richting te gaan (nieuwe herinneringen brengen informatie aan en verhogen de entropie van het brein). Dit eenrichtingsverkeer kan mogelijk opgevat worden als het verloop van de tijd. Een tweede mogelijkheid is dat onze perceptie van tijdsduur gelinkt is aan de kwantummechanica. Davies vat deze laatste op als iets waarin tijd inherent een belangrijke rol speelt en wat een indeterministische open toekomst waarborgt. Een kwantumtoestand kan dus vele mogelijke wegen inslaan en draagt verschillende potentiële realiteiten met zich. Wanneer een persoon een meting verricht, verkrijgt deze

¹⁹⁹ P. DAVIES, *That mysterious flow*, p. 43.

²⁰⁰ *Ibid.*, p. 47.

slechts één resultaat. Dit zou kunnen wijten zijn aan het bewustzijn van diegene die observeert. Verschillende fysici opperen zelfs dat het bewustzijn gerelateerd is aan kwantumprocessen in het brein. En ook al is dit nu nog niet het geval, aldus Davies, toch is het goed mogelijk dat in de (nabije) toekomst een neurologisch component zal kunnen aangewezen worden dat verantwoordelijk is voor ons besef van tijdsverloop. Davies kijkt uit naar de dag dat de wetenschap het gevoel van tijdsverloop kan elimineren, of toch tenminste verklaren. “*Perhaps we would no longer fret about the future or grieve for the past. Worries about death might become as irrelevant as worries about birth.*”²⁰¹

4.3.2 Bespreking en bemerkingen

Deze invalshoek van Davies doet sterk denken aan het alternatief voor het tijdsverloop dat Julian Barbour voorstelde in zijn originele werk ‘The end of time’.²⁰² Ook Barbour opperde de mogelijkheid van een tijdslandschap (‘Plationia’) waarin verleden en toekomst wel een fysische basis hebben, maar de eigenlijk stroom van de tijd te wijten is aan het bewustzijn. In de documentaire ‘Killing time’²⁰³ wordt dit nog eens duidelijk uiteen gezet.

Barbour stelt dat het vloeien van de tijd en beweging gecreëerd worden “[...] *by the brain from the juxtaposition of several subpatterns within one pattern.*”²⁰⁴

Dit roept terug enkele vragen op: is er in de hierboven geschetste situatie sprake van een pijl van de tijd? Ja en nee. Dit tweeledige antwoord geldt zowel voor Davies als voor Barbour. Er is een pijl van de tijd die in een bepaalde (voorkeurs)richting wijst, maar de pijl zelf beweegt niet. Er is slechts een statische ruimtelijke configuratie waarin een belangrijke plaats is weggelegd voor de pijl van het bewustzijn, omdat deze, in tegenstelling tot de andere pijlen van de tijd, de oorzaak is van de aanname dat ‘tijd voortvloeit’. Deze subjectieve pijl gaat hier dus vooraf aan de andere pijlen om de conclusie te ondersteunen dat de tijd voortschrijdt, maar heeft zelf ook geen objectieve en fundamentele dynamische basis. De pijlen van de tijd bestaan in de ruimtelijke statische configuratie, maar er is verder niet zoiets als het stromende bestaan van de tijd zelf.

²⁰¹ P. Davies, *That mysterious flow*, p. 47.

²⁰² J. BARBOUR, *The end of time: the next revolution in physics*, New York, Oxford University Press USA, 2000, passim.

²⁰³ 2000, in regie van Iisbrand van Veelen

²⁰⁴ J. BARBOUR, *The end of time*, p. 30.

We zullen verder nog zien hoe ook Huw Price het onderscheid maakt tussen eigenschappen van de tijd en fenomenen in de tijd.

4.4 Victor Stenger en zijn tijdloze realiteit

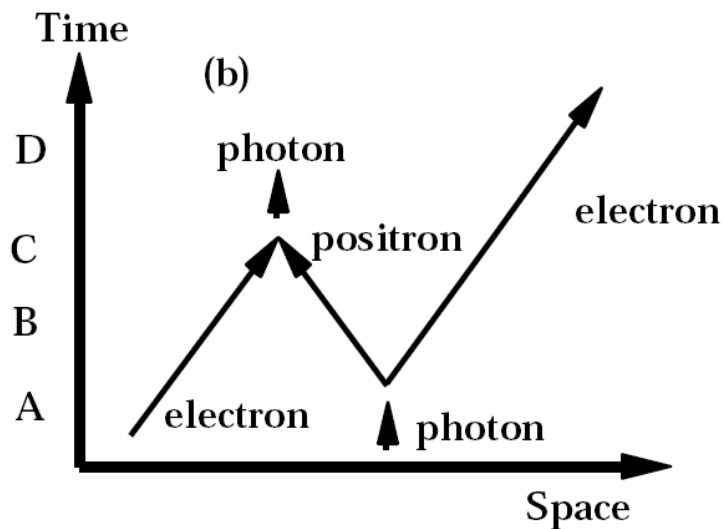
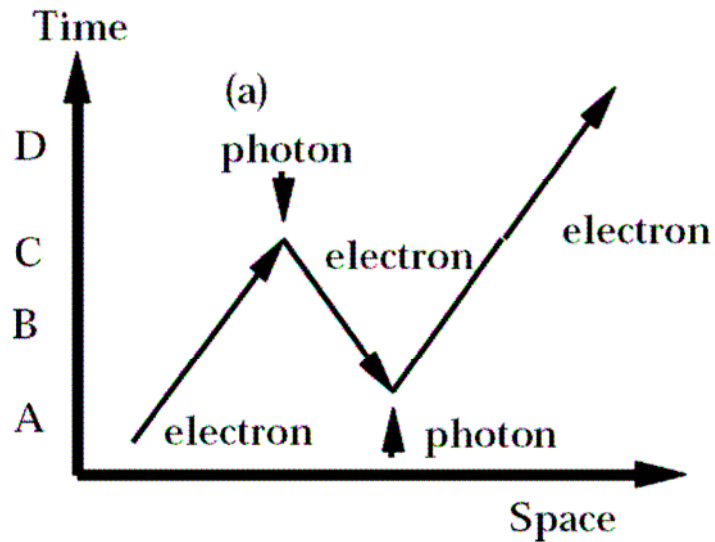
4.4.1 Zigzaggen

Victor Stenger doet in zijn boek 'Timeless reality' een verdediging van een tijdloos standpunt uit de doeken. Meer bepaald verwijst hij ook naar Coveney en Highfield en hun boek 'The arrow of time' en naar hun uitspraak dat de macroscopische pijl van de tijd kan verklaard worden door te verwijzen naar de kwantumparadoxen. Dit baseerden ze op werk van Ilya Prigogine die poogde om onomkeerbaarheid op microscopisch niveau af te leiden uit dynamische principes die ze eerst op macroscopische schaal toepasten.

Deze manier van werken is wat Price een dubbele standaard noemt, waarbij de onderzoekers niet beseften dat ze tijd niet symmetrisch behandelden en zo foutief dachten dat ze de bron van de pijl van de tijd gevonden hadden. Het is verder ook zo dat het besef dat de pijl van de tijd niet bestaat op kwantumniveau helpt om paradoxen van de kwantummechanica uit de weg te ruimen. Dus waarom zouden we die pijl van de tijd er dan weer krampachtig bij willen betrekken, aldus Stenger.²⁰⁵

Om de tijdssymmetrie te ontkennen, zou de pijl van de tijd zowel in het klassieke als in het kwantummechanische systeem van toepassing moeten zijn. Dit noemt Stenger een oneconomische zaak, omdat het additionele data vergt die niet door de huidige data en experimenten ondersteund wordt. Zodoende lijkt de omkeerbaarheid van de tijd nog steeds het meest plausibele alternatief. Dit biedt zelfs soelaas aan de kwantummechanische vraag hoe deeltjes specifieke banen kunnen volgen en toch op meerdere plekken tegelijk kunnen opduiken.

²⁰⁵ V. STENGER, *Timeless reality: symmetry, simplicity and multiple universes*. Amherst, Prometheus Books, 2000, s.p.



Bron: overgenomen uit Stenger Victor, *Timeless reality*, s.p.

In de bovenste figuur gaat een deeltje snel heen en weer in de ruimtetijd²⁰⁶ en verschijnt zo bijvoorbeeld op drie plaatsen op tijdstip B. In de conventionele opvatting (met een duidelijke richting van de tijd) schept een foton op tijdstip A een elektron-positron koppel en lost het elektron met het positron op tot een foton op tijdstip C. Stenger beseft dat we geen alledaagse ervaring hebben met deeltjes die heen en weer gaan in de ruimtetijd, maar stelt dat “[...] with space-time zigzagging, we can maintain a single ontological picture of pointlike photons that applies on all scales, from the subnuclear to the subgalactic.”²⁰⁷ Let vooral ook op het gebruik van ‘ontologisch’.

²⁰⁶ Het tijdsinterval waarin dit gebeurt wordt geschat op 10^{-22} seconde en de afstand waarover het elektron heen en weer gaat wordt geschat op de de Broglie golflengte van het deeltje.

²⁰⁷ V. STENGER, *Timeless reality*, s.p.

Dit kan ook gebruikt worden op de kwantumsprong tussen energieniveaus in een atoom aan te duiden. *“In the case of excitation to a higher energy level, one photon in figure 8.2 [zie bovenstaande figuren] comes in from the outside, the other from interaction with the rest of the atom, as the electron is viewed as jumping instantaneously from one orbit to another at time C.”*²⁰⁸

Feynman bedacht methodes om waarschijnlijkheden te berekenen van processen zoals deze in de figuur, vaak gebruikt bij bijvoorbeeld de ontwikkeling van het standaardmodel voor quarks en leptonen.²⁰⁹ Bij gebruik hiervan passen de meeste fysici ze toe op een tijdsverloop met één richting, maar ze blijken net zogoed op te gaan voor een tijdsymmetrisch systeem.

Wat het idee betreft van een deeltje dat zich op meerdere plaatsen tegelijk bevindt: dit is allerm minst revolutionair als men Einstein z'n opvatting in rekening brengt dat tijd niet absoluut is, en het begrip 'gelijktijdigheid' zodoende relatief is. Daarom, *“[...] no logical inconsistency exists in describing a particle to be several places at “the same time” as observed in some reference frame.”*²¹⁰ Het is echter ons zelfbewustzijn en besef van de pijl van de tijd tengevolge van onze persoonlijke existentie die bezwaar lijkt aan te tekenen tegen bovenstaande. Toch mogen we niet vergeten, aldus Stenger, dat ons persoonlijk bestaan gerelateerd is aan een object, bestaande uit veel dergelijke deeltjes.

*“Time symmetry at the quantum level makes it possible to draw a model of underlying reality that is simpler and more symmetric than the conventional view. This reality is timeless, with no beginning, no end, and no arrow of time. Observations at the smallest distances and highest energies reveal a picture of localized, discrete material bodies moving along definite spacetime paths in an otherwise empty void, with no fundamental distinction between past and future and no need to introduce “real” continuous fields. This is the picture revealed to us by the standard model of elementary particle and forces, which is fully consistent with all empirical data.”*²¹¹

4.4.2 Bespreking en bemerkingen

In een ander werk, 'The Unconscious Quantum: Metaphysics in Modern Physics and Cosmology', stelt Stenger hoe Prigogine meende dat de afwezigheid van een richting van de tijd op het vlak van de deeltjesfysica betekent dat we op het macroscopische niveau naar de fundamentele wetten van de natuur moeten zoeken. Stenger schrijft zichzelf een

²⁰⁸ V. STENGER, *Timeless reality*, s.p.

²⁰⁹ D. WHITE, *Phase conjugation Feynman diagrams*, url: <http://www.dpedtech.com/FD.pdf>, 2005, passim.

²¹⁰ V. STENGER, *Timeless reality*, s.p.

²¹¹ *Ibid.*, s.p.

consensus toe tussen de opvatting van Prigogine en die van Roger Penrose, die meende dat de fysische wetten incorrect waren tot wanneer tijdsasymmetrie op het diepste niveau van de werkelijkheid werd gevonden:

*“Two sets of natural laws exist, one at the elementary level of fundamental particles that possesses a high degree of symmetry, and another that emerges at the levels of many particles where the elementary symmetries are accidentally broken and new laws appear to describe the structures that thereby evolve.”*²¹²

Opvallend hier is het negeren van het kaon-verval, wat leidt tot een pijl van de tijd op het niveau van de deeltjesfysica. Verder bemerken we nog een opvallende uitspraak hierboven: Prigogine richt zich op het macroniveau om de fundamentele wetten van de natuur te zoeken. Op zulke manier wordt Prigogine vaak een grofkorrelige aanpak verweten.²¹³ Toch behoort die kaon-pijl, zoals we eerder zagen, tot de intrinsieke tijd, die Prigogine als fundamenteel beschouwde. Ook poogde Prigogine de tijd de incorporeren in het kwantumdomein. Andermaal kunnen we herhalen hoe Prigogine de pijl van de tijd wou extrapoleren naar het microniveau om deze uiteindelijk op elk niveau van de werkelijkheid terug te vinden.

Stenger vermeldt wel figuren als Penrose en Page in hun pogingen om de tijdsasymmetrie op het niveau van de kwantumkosmologie te introduceren. In hun artikel ‘Time symmetry and asymmetry in quantum mechanics and quantum cosmology’²¹⁴ tonen Murray Gell-Mann en James Hartle echter aan dat *“Time-symmetric quantum cosmologies*²¹⁵ *can be constructed utilizing a time-neutral generalized quantum mechanics of closed systems with initial and final conditions related by time-inversion symmetry.”*²¹⁶ Ze willen in hun paper echter niet een tijdssymmetrische kosmologie zonder meer verdedigen, maar een kader aanreiken “[...] for examining cosmologies with less asymmetric boundary conditions than the usual ones, so that the quantum

²¹² V. STENGER, *The unconscious quantum: metaphysics in modern physics and cosmology*, Amherst, Prometheus Books, S.p.

²¹³ Ook Stuart Kauffman uit deze kritiek op Prigogine; persoonlijke correspondentie.

²¹⁴ M. GELL-MANN & J. HARTLE, *Time symmetry and asymmetry in quantum mechanics and quantum cosmology*, url: arxiv.org/abs/gr-qc/9304023, 2005, passim.

²¹⁵ In het licht van de alledaagse kwantummechanica zijn deze echter hoogst ongebruikelijk.

²¹⁶ M. GELL-MANN & J. HARTLE, *Time symmetry and asymmetry in quantum mechanics and quantum cosmology*, p. 23.

*mechanical arrow of time [...] can be treated, or derived, as one possibility out of many [...]*²¹⁷

Naast het opmerkelijke resultaat dat de afwezigheid van de noodzaak van de kwantummechanische pijl is, maken Gell-Mann en Hartle nog een vaststelling met betrekking tot de pijlen van de tijd. Ze onderscheiden de kwantummechanische pijl van de overige pijlen van de tijd.²¹⁸ Deze laatste kunnen namelijk voortkomen uit tijdsymmetrische dynamische wetten die behandeld worden met tijdsymmetrische randvoorwaarden. De kwantummechanische pijl van de tijd vatten ze op als een tijdsymmetrie van de wetten zelf. Zo zien we hoe deze pijl het meest objectieve statuut aanneemt, daar waar hij in de schema's van Cramer die we hoger zagen zelfs volledig afwezig was. Maar zoals we daarjuist reeds vermeldden, hoeft de kwantummechanica²¹⁹ niet tijdsymmetrisch te zijn. De relatie tussen de pijlen van de tijd en hun al dan niet objectieve statuut is weerom een punt waar geen overeenstemming bereikt wordt.

Tenslotte nog even over Stenger z'n zogenaamde 'consensus'. Stenger stelt voor, zoals we zonet zagen, om twee intrinsiek verschillende soorten natuurwetten te gebruiken²²⁰ die complementair zijn aan elkaar. Dit lijkt echter niet meer dan een uiterst oneconomisch manoeuvre, temeer omdat dit nieuwe problemen met zich meebrengt. Ofwel komt de asymmetrie dan tot stand uit het symmetrische niveau door een vorm van emergentie – dit is nodig om niet te vervallen in de huidige reductionistische discussie, namelijk of de waargenomen asymmetrie kan herleid worden tot een symmetrische ondergrond; deze term is op zich echter ook allerminst onbediscussieerd – ofwel vervallen we in een dualisme.²²¹

²¹⁷ M. GELL-MANN & J. HARTLE, *Time symmetry and asymmetry in quantum mechanics and quantum cosmology*, p. 3.

²¹⁸ Ibid., p. 2.

²¹⁹ De kwantummechanica van de kosmologie, in dit geval.

²²⁰ Dit voorstel lijkt echter zijn beschrijving van de aanpak van Prigogine, hoewel hij net een consensus tussen die invalshoek en deze van Penrose wou bereiken.

²²¹ Dit is waar Prigogine zich tegen afzet, hoewel dat niet duidelijk blijkt uit de synopsis die Stenger van hem geeft.

4.5 Robert Bishop

Hierna zijn kritieke opmerkingen van Robert Bishop op het project van Prigogine geformuleerd. Men kan zich natuurlijk afvragen waarom dit deel niet in het vorige hoofdstuk is opgenomen. De reden hiervoor is dat er enkele specifieke en meer gedetailleerde aspecten worden besproken over het verloop en de richting van de tijd.

Bishop²²² wijst erop hoe Prigogine en zijn medewerkers een Λ -transformatie kiezen waaronder asymmetrie in de tijd gegarandeerd is. Er zijn twee verschillende transformaties, Λ_+ en Λ_- .²²³ Deze eerste correspondeert met een evolutie naar evenwicht richting toekomst (langs de positieve t -as), de tweede met een evolutie naar evenwicht richting verleden (langs de negatieve t -as). Toch observeren we geen evoluties richting verleden.

Hiertoe gebruikt Prigogine singuliere initiële waarschijnlijkheidsverdelingen, omdat niet-singuliere evenwicht in beide richtingen van de tijd evenwicht kunnen bereiken.

*“By translating their conception of entropy into information-theoretic language, [...] Prigogine [...] showed that their formulation of the second law requires infinite information for specifying the initial states of a singular distribution evolving in the negative t -direction, but only finite information for specifying the initial states for evolution in the positive t -direction.”*²²⁴

De initiële condities om evenwicht te bereiken langs de negatieve t -as zijn dus fysisch niet te realiseren. Zo kan een systeem geen evenwicht bereiken naar het verleden toe bereiken en is zijn invulling van de Tweede Hoofdwet een selectiemechanisme voor initiële condities. Bishop stelt dat de problematiek hier verscholen zit in een vermenging van epistemische²²⁵ met ontische²²⁶ concepten.²²⁷

Tevens is het zo dat er experimenten zijn waarbij moleculen onder invloed van een niet-uniform magnetisch veld in willekeurige richtingen beginnen draaien en bij omkering van het magnetisch veld terug allen in dezelfde initiële richting. Dit lijkt op anti-

²²² R. BISHOP, *Brussels-Austin nonequilibrium statistical mechanics in the early years*, pp. 16-18.

²²³ Deze komen overeen met twee verschillende semi-groepen.

²²⁴ R. BISHOP, *Brussels-Austin nonequilibrium statistical mechanics in the early years*, p. 16.

²²⁵ Zoals informatie, empirische toegang tot bepaalde toestanden,...

²²⁶ Bijvoorbeeld feitelijke toestanden en het gedrag van systemen.

²²⁷ R. BISHOP, *Brussels-Austin nonequilibrium statistical mechanics in the early years*, p. 17.

thermodynamisch gedrag dat Prigogine met zijn selectiemechanisme juist wou uitsluiten.²²⁸

Prigogine heeft hier wel een antwoord op. Als het magnetisch veld namelijk op een bepaald moment wordt omgedraaid, wordt de entropie van het systeem door deze interventie van buitenaf herleid tot een waarde die lager ligt dan de initiële waarde. De entropie begint dan zoals steeds aan haar monotonische toename, namelijk van haar nieuwe verlaagde waarde, en keert terug naar haar initiële waarde.²²⁹

Tenslotte is er nog een fundamenteel probleem met dit selectieprincipe. “*The conditions for the existence of the microscopic entropy operator M , and hence, for Λ , admit alternative notions of entropy that have the opposite temporal behavior to the Brussels-Austin Group definition.*”²³⁰ Zonder in detail te treden, houdt dit verband met de omkeerbaarheid van K-stromen.

Prigogine en zijn school reageren op deze bemerking door te verwijzen naar experimentele observaties van de asymmetrie van de tijd. Hierbij worden fenomenologische wetten als fundamenteel genomen en definities van entropie die anti-thermodynamisch gedrag ondersteunen, uitgesloten. Hierdoor gaan er veel potentiële verklaringen verloren, aldus Bishop. Het zijn juist deze experimentele observaties die zelf verklaard dienen te worden.²³¹ Zo verkrijgen we niet meer dan een puzzel rond de Tweede Hoofdwet en lopen we het gevaar te verzanden in circulaire definities.

4.6 Het symmetrische alternatief van Huw Price

4.6.1 ‘ μ Independence’ en tijdssymmetrie op microniveau

Huw Price neemt de tijdssymmetrie onder handen.²³² Hij merkt op dat het inderdaad vanzelfsprekend is om een feit te verklaren door te verwijzen naar iets wat ervóór gebeurd is. Correlaties lijken dus tot stand te komen op een asymmetrische wijze met

²²⁸ Dit argument wordt geopperd door Sklar. L. SKLAR, *Physics and chance: philosophical issues in the foundations of statistical mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1995, passim

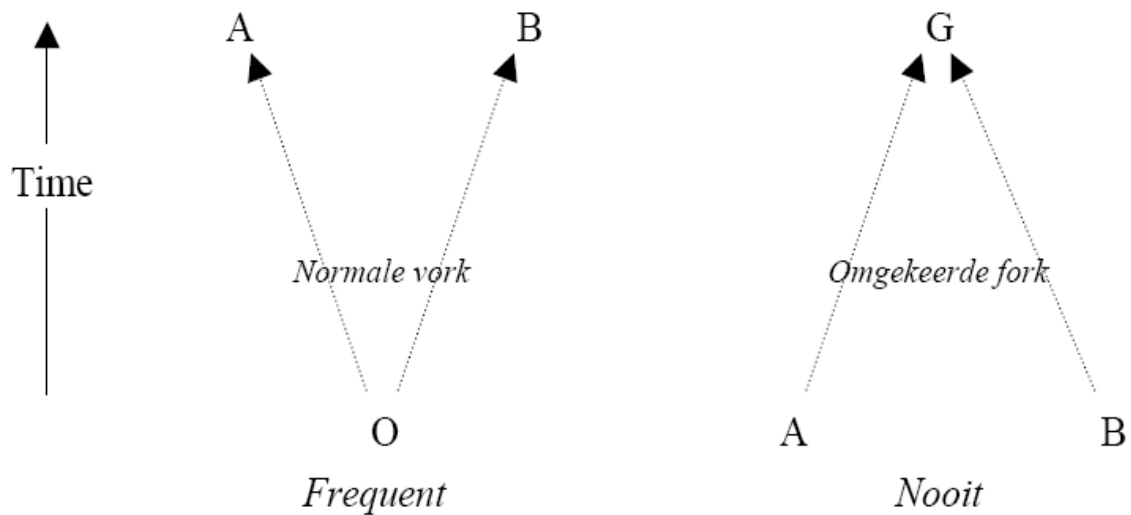
²²⁹ R. BISHOP, *Brussels-Austin nonequilibrium statistical mechanics in the early years: similarity transformations between deterministic and probabilistic descriptions*, p. 18.

²³⁰ *Ibid.*, p. 18.

²³¹ *Ibid.*, p. 18.

²³² H. PRICE, *The role of history in microphysics*, url: <http://www.usyd.edu.au/time/price/preprints/history.html>, 1998, passim.

betrekking tot de tijd, iets wat hijzelf het ‘No Teleology Principle’²³³ noemt. Echter, het blijft maar de vraag in hoeverre dit principe kan aarden wanneer we ons op het niveau van de microfysica begeven. Op macroscopische niveau is deze asymmetrie (ook vaak gezien als ‘fork-asymmetry’, omdat ze een V-vorm heeft en open is naar de toekomst) hoofdzakelijk verbonden met de asymmetrie van de thermodynamica.



Bron: URL: <http://www.phil.uu.nl/staf/lith/asymmetries/essays/RoaldSuurs.pdf>

Hierbij kan men het best denken aan de bekende onomkeerbare processen zoals het uitgieten van een fles vloeistof. Wanneer we een dergelijk proces omgekeerd afspelen, komt dit ons bevreemdend voor, omdat de entropie lijkt te dalen, terwijl ze in de richting van de toekomst juist alleen maar kan stijgen. Toch wijst Price er op dat de relatie tussen het No Teleology Principle en de Tweede Hoofdwet problematisch is. Zo kan zonder dergelijk asymmetrisch principe van de tijd het H-theorema van Boltzmann geen tijdsasymmetrische conclusie ondersteunen. Maar mét dergelijk principe “[...] *the H-theorem cannot do more than to shift the puzzle of the time-asymmetry of the Second Law from one place to another, for the time-asymmetry of the principle in question will be equally problematic, in the light of the apparent T-symmetry of the underlying laws.*”²³⁴

Er komen dan nog twee vragen bovendrijven: waarom is de entropie lager in het verleden en welk asymmetrisch principe doet dit stijgen naar de toekomst toe. Wanneer we echter

²³³Twee fysische systemen zijn onafhankelijk van elkaar, tenzij het ene een causale invloed uitoefent op het andere of beide beïnvloed worden door een gemeenschappelijke factor in het verleden. Bovendien is dit principe zelfs verenigbaar met tijdssymmetrie van onderliggende fysische wetten.

²³⁴H. PRICE, *The role of history in microphysics*, s.p.

erkennen dat dit geen twee onafhankelijke problemen zijn is er evenmin een reden om aan te nemen dat het No Teleology Principle prioritair is aan de Tweede Hoofdwet. Er zijn echter ook mogelijke intuïtieve toepassingen van het No Teleology Principle in de fysica die niets te maken hebben met de thermodynamische asymmetrie. Als dit het geval is, kan er een andere objectieve tijdsasymmetrie in de wereld zijn, los van deze van de thermodynamica. Máár, dit kan ook betekenen dat onze intuïties fout zitten. En het is dit laatste standpunt dat Price verdedigt.

Kijken we naar het kwantumniveau, dan zien we dat (op het eerste zicht) het No Teleology Principle ook hier standhoudt. Zo kunnen we de toestand van een polarisatiefilter bepalen aan de hand van een foton dat er doorheen gekomen is en is dit dus slechts mogelijk na de interactie. Maar de tijdsasymmetrie in het standaardmodel heeft niets te maken met deze in de thermodynamica en moet dus onderscheiden worden van de tijdsasymmetrie in andere domeinen van de fysica. Bovendien, aldus Price, is ze hier niet verenigbaar met de tijdssymmetrie van de onderliggende fysische wetten, iets wat in andere domeinen (en vooral dan op macroniveau) wél het geval was. Daarom ziet hij het No Teleology Principle als onbetrouwbaar wanneer we ons op het terrein van de kwantummechanica begeven.²³⁵

Eerst en vooral, vooraleer concreet binnen het domein van de kwantummechanica te vertoeven, is het aangeraden de reeds hoger vermelde intuïties met betrekking tot het No Teleology Principle te kijken. Die intuïtie vat Price zelf samen: *“We take it to be intuitively obvious that interacting systems will be ignorant of one another until the interaction actually occurs, at which point each system may be expected to “learn” something about the other.”*²³⁶ Het microscopische geval van dit intuïtieve principe noemt hij ‘ μ Independence’. Kenmerkend hiervoor is de individualistische²³⁷ post-interactieve correlatie, zoals in het geval van het foton. En het voorbeeld van het foton is niet afhankelijk van de thermodynamische geschiedenis van een systeem dat foton en polarisatiefilter verzoent of van welk ander ruimer systeem dan ook waarvan het deel zou uitmaken. Thermodynamische asymmetrie staat er dus helemaal los van.

²³⁵ H. PRICE, *The role of history in microphysics*, s.p.

²³⁶ Ibid., s.p.

²³⁷ Hiermee doelt Price op een eenvoudige interactie tussen één entiteit en een andere.

Hiermee wil Price de ‘ μ Independence’ onderscheiden van de zogenaamde ‘H-Independence’. In het geval van ‘ μ Independence’ is er geen waargenomen asymmetrie die een verklaring behoeft. We nemen dus niet waar dat een foton niet gecorreleerd is met de polarisatiefilter waardoor het zich weldra zal begeven. Het enige wat we doen is “[...] *rely on a principle of No Teleology, but in a context in which it has nothing to do with the principle that entropy does not decrease.*”²³⁸ Aldus lijkt ‘ μ Independence’ geen a posteriori principe, afgeleid uit de ervaring, te zijn, maar een wetmatig principe op zichzelf. Rest dan wel nog de vraag waarom we in deze context blijven steunen op een asymmetrisch principe, als zou de ‘ μ Independence’ post-interactieve correlaties ondersteunen en pre-interactieve uitsluiten. Prince ziet twee soorten argumenten in het voordeel hiervan, maar weerlegt ze beide.

Het eerste vraagt zich af of ‘ μ Independence’ geen plausible hypothese over de initiële toestand van fysische systemen inhoudt, namelijk dat ze volledig willekeurig zijn. Het wordt namelijk vaak gesuggereerd dat ‘ μ Independence’ afhangt van het principe dat alle initiële condities gelijkwaardig zijn. “*After all, wouldn’t pre-interactive correlations require that the initial condition of the system concerned be chosen from a very special subset of its phase space.*”²³⁹ Maar dit argument²⁴⁰ bekijkt de zaken langs de verkeerde kant, aldus Price, door de zaak in het voordeel van de ‘ μ Independence’ te bekijken “[...] *by assuming that the phase space is such that only a special subset of trajectories would display pre-interactive correlations.*”²⁴¹

Het tweede argument stelt dat we door ‘ μ Independence’ te postuleren observeerbare zaken kunnen verklaren die anders voor problemen zorgen. Zo wordt er gezegd dat men de typische verspreiding van deeltjes kan verklaren die voortkomt uit botsende paren van deeltjes, wanneer men aanneemt dat er geen eerdere correlaties tussen deze deeltjes waren. Maar ‘ μ Independence’ is hier noodzakelijk noch voldoende, zo oppert Price. “*The explanation rests entirely on the absence of entropy-reducing correlations between incoming beams—i.e., on H-Independence—not on μ Independence at the level of individual*

²³⁸ H. PRICE, *The role of history in microphysics*, s.p.

²³⁹ Ibid., s.p.

²⁴⁰ Dit argument is bijvoorbeeld geopperd door Lebowitz.

²⁴¹ H. PRICE, *The role of history in microphysics*, s.p.

pairs.”²⁴² Het enige wat hier dus het geval is, is de thermodynamische asymmetrie, waarvan ‘ μ Independence’ zich juist onderscheidt.

Als intuïtieve bevestiging van de asymmetrie van het gedrag van een foton in het standaardmodel van de kwantummechanica, is de ‘ μ Independence’ géén a posteriori principe dat uit de observatie wordt afgeleid, maar een op zichzelf staande meta-wet. “*We do not observe that the incoming photon is not correlated with polariser through which it is about to pass. Rather, we rely on the prior principle that laws enforcing pre-interactive correlations would be unacceptably teleological.*”²⁴³ Voorts veronderstelt Price dat verder onderzoek van de mogelijkheid van ‘ μ Independence’ onze intuïties misschien wat dieper zal verklaren, maar zeker niet zal rechtvaardigen. Price zegt dat onze intuïties fout zitten.

Kijken we nu naar de kwantummechanica, dan zien we dat de ‘ μ Independence’ een belangrijke aanname is om te tonen dat de kwantumwereld zich niet klassiek gedraagt. Een voorbeeld hiervan is het theorema van Bell,²⁴⁴ dat veronderstelt dat kwantumsystemen niet gecorreleerd zijn met de meetinstrumenten vóór hun interactie. Dit is ook van toepassing op meer recente beschouwingen in verband met non-lokaliteit.²⁴⁵ Er zijn ook nog andere niet-klassieke aspecten. Zo is er de nog steeds invloedrijke Kopenhaagse interpretatie van de kwantummechanica waarin “[...] *measurement was said to force reality to take on a definite condition, where none existed before.*”²⁴⁶ ‘ μ Independence’ speelt hierbij dus een belangrijke rol. Zoals Price het schematiseert:

- QM + μ Independence -> Non-locality + Indeterminacy + ...

²⁴² H. PRICE, *The role of history in microphysics*, s.p.

²⁴³ Ibid., s.p.

²⁴⁴ Dit handelt over non-lokaliteit. “[...] *als een fysicus een bepaald atoom onderzoekt, het niet alleen verstoord raakt door het onderzoek, maar door een hele reeks verre gebeurtenissen [...]*” A. LEMKOW, *Het heelheid principe*, Amsterdam, Theosofische Vereniging in Nederland, 1993, p. 106.

²⁴⁵ Price vermeldt zelf de Greenberger-Horne-Zeilinger-toestand, wat een verstrengelde kwantumtoestand is. Een observatie hiervan wordt beschreven in het artikel ‘*Observation of Three-Photon Greenberger-Horne-Zeilinger Entanglement*’ van de hand van Bouwmeester, Pan, Daniell, Weinfurter en Zeilinger zelf, verschenen in *Physical Review*, februari 1999

²⁴⁶ H. Price, *The role of history in microphysics*, s.p.

Price stelt dat wanneer de ‘ μ Independence’ vanaf het begin uit de kwantummechanica zou geweerd zijn, de kwantummechanica juist een bevestiging zou geworden zijn van het feit dat de ‘ μ Independence’ faalt en zouden we niet te maken hebben met deze “absurditeiten”, zoals Price ze noemt, zoals non-localiteit,... “*Against this imagined background, then, experimental confirmation of the Bell correlations would have seemed to provide empirical data for which the only reasonable explanation is that μ Independence does fail, as already predicted on symmetry grounds.*”²⁴⁷ Daarom besluit de auteur dat het de moeite waard kan zijn om de inspanning te leveren onze vooringesteldheid en ons als vanzelfsprekend aanvaard wereldbeeld te willen aanpassen. Hij pleit er voor dat op een fundamenteel fysisch en microscopisch niveau evenzeer aandacht dient besteed te worden aan zowel de toekomst als het verleden van een systeem. De notie ‘geschiedenis’ speelt dus een tijdssymmetrische rol in de microfysica.

4.6.2 Thermodynamisch gepuzzel

In het bovenstaande eerste deel werd meermaals verwezen naar de (Tweede Hoofdwet van de) thermodynamica. Dit werd onderscheiden van de ‘ μ Independence’ en werd zelfs door Price fundamenteel asymmetrisch genoemd. Toch is deze thermodynamisch pijl van de tijd volgens Price ook niet zonder problemen.²⁴⁸ De hoofdvraag is vooral hoe het komt dat vele fenomenen één richting in de tijd hebben, terwijl de onderliggende mechanische wetten geen voorkeursrichting onderschrijven. Hoewel vele onderzoekers dit als verleden tijd beschouwen of omschrijven als ‘een kwestie van statistiek’, meent Price dat de problematiek geenszins opgelost is.

Men kan opwerpen dat de dynamische wetten geenszins symmetrisch in de tijd zijn, getuige bijvoorbeeld de schending van de symmetrie in zwakke interacties door K-mesonen.²⁴⁹ Dit gaat niet op volgens Price: “*If the time-asymmetry of thermodynamics were associated with the T-symmetry violation displayed by the neutral K meson, then anti-matter would show the reverse of the normal thermodynamic asymmetry.*”²⁵⁰

²⁴⁷ H. PRICE, *The role of history in microphysics*, s.p.

²⁴⁸ H. PRICE, *The thermodynamic arrow: puzzles and pseudo-puzzles*, url: <http://www.usyd.edu.au/time/price/preprints/Price2.pdf>, 2006, passim.

²⁴⁹ Dit is een synoniem voor kaonen.

²⁵⁰ H. PRICE, *The thermodynamic arrow*, p. 2.

Deze thermodynamische thematiek kent ook verscheidene problemen die te wijten zijn aan verwarringen en foutief gebruik van bepaalde termen. Price onderscheidt vier verschillende aspecten.²⁵¹

Vooreerst is er de betekenis van ‘onomkeerbaarheid’. Omdat de thermodynamische pijl deze eigenschap krijgt toegedicht, lijkt het alsof het probleem is dat we processen niet in de omgekeerde richting kunnen laten gaan.²⁵² Het belangrijke punt is volgens Price de numerieke ongelijkheid tussen processen waarbij de entropie stijgt, en hun tegenpolen, niet de praktische onomkeerbaarheid van individuele processen.

Het tweede punt is dat vaak vergeten wordt dat de thermodynamische asymmetrie een asymmetrie van fysische processen in de tijd is en géén asymmetrie ván de tijd.

Vervolgens mogen we, aldus Price, de entropie-gradient niet gelijkstellen met de toename van entropie. Aangezien de richting van de tijd (het bepalen van wat zogenaamde ‘positieve tijd’ is) conventioneel bepaald is, is het ook een conventie of de entropie toe- of afneemt. Omwille van de huidige conventie neemt de entropie toe, maar ze zou evenzeer kunnen afnemen indien we een ander etiket op de tijd zouden plakken. Dit betekent evenwel niet dat de thermodynamische asymmetrie louter conventioneel is. Het is conventioneel of de hoeveelheid entropie stijgt of daalt, maar de entropie-gradiënt zelf is objectief.

Tenslotte is het zo dat er veel onenigheid bestaat over hoe de term ‘entropie’ nu juist moet ingevuld worden. Het is echter niet zo dat de zogenaamde ‘thermodynamische puzzel’²⁵³ wordt veroorzaakt door deze discussie. We kunnen deze puzzel aanschouwen en beschrijven zonder het begrip ‘entropie’, vooral omdat we ons op andere termen kunnen beroepen.²⁵⁴ De notie ‘entropie’ is dus in zekere zin onessentieel en niet cruciaal.

Met deze verheldering in het achterhoofd maakt Price het onderscheid tussen twee mogelijke oplossingen voor het thermodynamisch probleem, een onderscheid dat volgens hem veel te vaak genegeerd of overkeken is. *“This is a distinction between two very different conceptions of what it would take to explain the asymmetry – so different, in fact, that they disagree on how many distinct violations of T-symmetry it takes to explain*

²⁵¹ Ibid., pp. 3-5.

²⁵² Bijvoorbeeld dat we een gas niet uit zichzelf terug in een fles kunnen doen gaan.

²⁵³ Dus het contrast tussen systemen met slechts één oriëntatie en systemen die ook een omgekeerde richting hebben.

²⁵⁴ We kunnen bijvoorbeeld eenvoudigweg aangeven dat er vele gevallen zijn waarin een gas onder druk ontsnapt uit een fles, maar dat een gas niet vanzelf onder druk komt te staan door een fles binnen te gaan.

the observed asymmetry.”²⁵⁵ Eén benadering beroept zich op twee-asymmetrie,²⁵⁶ een andere op één-asymmetrie.²⁵⁷ Price verkiest de tweede optie, omwille van haar eenvoud. Het belangrijkste punt is dát er twee benaderingen zijn en dat de kwestie niet opgelost is zolang er moet gekozen worden.

*“If the one asymmetry view is correct, the puzzle of the thermodynamic arrow is really the puzzle of the low entropy boundary condition.”*²⁵⁸ Zoals we eerder zagen wees ook Jean Bricmont reeds in deze richting. Price stelt dat het kan lijken alsof deze hypothese, vooral uitgewerkt door Boltzmann en Schuetz, insinueert dat de verklaring voor de lokale asymmetrie van de thermodynamica kan gebeuren in termen die op grote schaal symmetrisch zijn, en wel omwille van onze menselijke gerichtheid die een richting bepaalt vanuit het gebied met lage entropie waarin we ons bevinden. Echter, omwille van de link die Boltzmann maakte tussen entropie en probabiteit, volgen er enkele problemen uit deze benadering. Zo is er het feit dat “[...] *the Boltzmann-Schuetz hypothesis implies that our apparent historical evidence is almost certainly unreliable.*”²⁵⁹ Tevens is het zo dat die hypothese aangeeft dat “[...] *as we look further out into space, we should expect to find no more order than we already have reason to believe in.*”²⁶⁰ Maar we kunnen nu meer van het universum observeren dan mogelijk was ten tijde van Boltzmann en we zien overall lage entropie.

We zagen al eerder dat thermodynamische asymmetrie vereist dat de entropie laag was in het verleden. Belangrijk hierbij is dat materie in het vroege universum gelijk verdeeld werd.²⁶¹ Dan duikt de vraag op waarom het universum er zo uitzag, kort na de big bang.²⁶² En zo zien we hoe de ‘thermodynamische puzzel’ een ‘kosmologische puzzel’ is geworden. Bovendien brengt deze vele andere nog open vragen met zich mee, zoals de vraag op de entropie zou dalen in een ineens stortend universum of de vraag of een toekomstig laag entropisch grensgeval nú effecten heeft.

²⁵⁵ H. PRICE, *The thermodynamic arrow*, p. 6.

²⁵⁶ Een voorbeeld hiervan is het befaamde H-theorema.

²⁵⁷ Boltzmann bracht zo’n benadering naar voor, als reactie op de kritiek van Loschmidt.

²⁵⁸ H. PRICE, *The thermodynamic arrow*, p. 9.

²⁵⁹ *Ibid.*, p. 11.

²⁶⁰ Die knelpunten werden voor het eerst geopperd door von Weizsäcker in zijn ‘Annalen der Physik’.

²⁶¹ De relatie tussen beide is te wijten aan het feit dat ons universum gedomineerd wordt door een attractieve kracht zoals de zwaartekracht.

²⁶² In zijn artikel ‘On the origins of the arrow of time: why there is still a puzzle about the low entropy past’ bespreekt Price enkele mogelijke antwoorden, zoals het antropisch argument, het belang van inflatie en de Weyl-hypothese van Penrose.

We hebben dus gezien dat er binnen deze thematiek nog vele bedenkingen, vaak genegeerde problemen en onopgeloste kwesties zijn. De gepaste houding hiertegenover is “[...] *a kind of healthy scepticism about the universality of the second law of thermodynamics.*”²⁶³

4.6.3 Chaostheorie

Tot slot kan er ook nog iets gezegd worden over chaostheorie, omdat door de invloed hiervan velen menen duidelijke verschillen tussen verleden en toekomst te mogen poneren. Peter Coveney en Roger Highfield hangen deze opvatting aan, bijvoorbeeld in hun werk ‘The arrow of time’. Daar stellen ze dat “[...] *the past is fixed but the future remains open and we rediscover the arrow of time.*”²⁶⁴ omdat dynamische chaos overall aanwezig is in onze wereld. Ook Prigogine en Stengers hebben het over een onomkeerbaarheid die opduikt uit de willekeur, waarbij ze refereren aan onvoorspelbaarheid die gerelateerd is aan chaostheorie en niet-lineaire dynamica. Huw Price bestempelt deze redeneringen als foutief.²⁶⁵

Andermaal: De eigenlijke puzzel bestaat erin dat de entropie om te beginnen laag is, niet dat deze later stijgt. De niet-lineaire aanpak kan ons dan eventueel wel vertellen hoe bepaalde systemen uit evenwicht zich gedragen (aangenomen dat er zulke bestaan, voegt Price er aan toe), het verklaart niet hoe de entropie-gradiënt in de eerste plaats is ontstaan. Aldus slaagt de chaostheorie er niet in om het schijnbare conflict tussen de thermodynamica en de klassieke mechanica op te vangen.

Stel nu dat “[...] *the proponents of the non-linear dynamical methods [...] claim that despite the fact that it is a symmetric theory, it produces asymmetric consequences in thermodynamics.*”²⁶⁶ We kunnen dan een fysisch systeem beschrijven waarop dit van toepassing is,²⁶⁷ zo stelt Price voor, met een gespecificeerde toestand op tijdstip t . We kunnen vervolgens aan de voorstanders van bovenstaande theorie vragen om de toestand van het systeem op tijdstip $t+1$ te beschrijven, zonder erbij te vertellen of $t+1$ vroeger of

²⁶³ H. PRICE, *The thermodynamic arrow*, p. 13.

²⁶⁴ P. COVENEY & R. HIGHFIELD, *The arrow of time: the quest to solve science's greatest mystery*. Londen, Flamingo, 1990, p. 38.

²⁶⁵ H. PRICE, *Chaos theory and the difference between past and future*, url: <http://www.usyd.edu.au/time/price/preprints/ISST.html>, 1995, s.p.

²⁶⁶ H. PRICE, *Chaos theory and the difference between past and future*, s.p.

²⁶⁷ Wat volgt is in wezen niet meer dan een toepassing van de kritiek op Boltzmann door Culverwell.

later is dan t . Als men dit kan beantwoorden zonder extra informatie, dan is hun theorie symmetrisch in de tijd. Als men nood heeft aan supplementaire informatie, dan betekent dit dat hun theorie op een bepaald punt de twee richtingen van de tijd verschillend behandelt. “[...]in neither case do we get what the advocates of this approach call “symmetry-breaking”: a temporal asymmetry which arises where there was none before. Either there is no temporal asymmetry at any stage, or it is there from the beginning.”²⁶⁸

4.6.4 Bespreking en bemerkingen

Price legt enkele misconcepties bloot waar best aandacht aan kan besteed worden. Zijn eerder conceptueel gegoochel mist dan misschien wat overtuigingskracht om als uitgangspunt te dienen voor de ontkenning van de tijdsstroom (vooral bij de ‘ μ Independence’, het nodigt wel uit tot verheldering en goed begrip van de betreffende thematische onderdelen.

Zoals blijkt heeft Price het vooral moeilijk met de ‘dubbele standaard’, zoals we ook al even aanhaalden bij de bespreking van Stenger. Dit is ook het cruciale punt dat hij in zijn bespreking van de ‘ μ Independence’ duidelijk wou stellen. Toch beaamt Prigogine dit frequente gebruik van de ‘dubbele standaard’. Máár, de Brussel-Austin-school wou niet zomaar asymmetrie afleiden uit symmetrische premissen. Echter was hun betrachting de tijdsomkeerbare wetten uit te breiden in situaties waarin men asymmetrie kon verwachten, omdat men bijvoorbeeld in bepaalde gevallen, geassocieerd met chaos, semi-groepen terugvindt die een onderscheid tussen verleden en toekomst waarborgen.²⁶⁹ Price verwijt Prigogine ook de hoger vermelde twee-asymmetrie benadering (van het thermodynamische probleem) te ondersteunen.²⁷⁰ Deze laatste gebruikt enerzijds een asymmetrisch wet die stelt dat de entropie toeneemt²⁷¹ en anderzijds een asymmetrische randvoorwaarde die de entropie vaststelt op een bepaald punt.

Het debat tussen Prigogine en Price heeft dus veel weg van een discussie rond het reductionisme. Voor Price is de hamvraag waarom er een pijl van de tijd is, gezien het symmetrische microscopische domein. Hierin zit meteen ook de assumptie verscholen

²⁶⁸ H. PRICE, *Chaos theory and the difference between past and future*, s.p.

²⁶⁹ B. EDENS, *Semigroups and symmetry: an investigation of Prigogin’s theories*, url: <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000436/>, 2001, p. 136.

²⁷⁰ B. EDENS, *Semigroups and symmetry*, p. 137.

²⁷¹ Dit is de Tweede Hoofdwet.

dat dit laatste een prioritair statuut heeft op en belangrijker is dan macroscopische asymmetrie. “*For Prigogine, this is no more puzzling than asking why there are symmetrical laws at all.*”²⁷² Prigogine verwijt Price dat hij eenvoudigweg de voorkeur geeft aan symmetrie.

Toch is de vraag naar het eigenlijk statuut van de tijd iets wat niet zomaar mag genegeerd worden. Hoger zagen we hoe ook Paul Davies reeds wees op het verschil van iets wat (schijnbaar) voortgaat in de tijd en de voortgang van de tijd zelf. Het gebruik van dit laatste concept lijkt, althans op het eerste zicht, verleidelijker om door te dringen tot de wáre objectieve status van de tijd. En dergelijke visie wordt ook ondersteund door Paul Horwich.²⁷³ De tijd schrijdt dan wel niet voort, toch zien we een anisotroop gedrag.

4.7 Besluit

In de inleiding van dit hoofdstuk stelde ik me enkele vragen die naar mijn mening cruciaal zijn voor een goede discussie rond de pijl van de tijd. Ondertussen hebben we een redelijke hoeveelheid informatie de revue zien passeren. We kunnen nu terugblikken en diezelfde vragen opnieuw stellen. Draagt de informatie die we gezien hebben bij tot een grondig en fundamenteel begrip van de pijl van de tijd? Valt er reeds een consensus te bespeuren in deze discussie? Of pakt men de problematiek om te beginnen eenvoudigweg op de verkeerde manier aan?

We zagen dat de natuur op verschillende manieren een onderscheid maakt tussen verleden en toekomst. Ik noem deze even ‘pijlen van de tijd’, hoewel ik daar zodadelijk op terugkom. Hoe deze zich onderling verhouden, blijkt nog steeds dubieus te zijn. Vaak worden sommige als fundamenteeler beschouwd dan andere, zodat men aan de hand hiervan een hiërarchie tracht op te stellen. Het komt natuurlijk geloofwaardig over om pakweg een pijl in de deeltjesfysica als meer cruciaal te zien dan een pijl die zich vormt omwille van het menselijke bewustzijn.

Toch kan er nog geen sluitende argumentatie gegeven worden over de juiste verhoudingen. Meestal hangt men een schema aan dat past binnen de eigen bevindingen, vakgebied en doelstellingen. Verder wordt de onderlinge relatie, om toch te trachten om

²⁷² B. EDENS, *Semigroups and symmetry*, p. 138.

²⁷³ P. HORWICH, *Asymmetries in time: problems in the philosophy of science*, London, MIT Press 1987, passim.

te gaan met de verschillende diverse pijlen van de tijd, dikwijls gestoeld op oorzaak-gevolg-verhoudingen. Dit leidt er natuurlijk toe dat men het belang van één bepaalde pijl van de tijd (of enkele) gaat generaliseren en unificeren – als men het bestaan van meerdere pijlen van de tijd al expliciteert.

Zoals blijkt duiken er in deze hele thematiek vele willekeurige en ongefundeerde aannames op. Leren we op deze manier iets bij over dé pijl van de tijd? Het valt te betwijfelen. Op dit moment heeft men slecht fragmentatie, waaruit men graag tracht te besluiten tot geünificeerde én objectieve inzichten in de tijd.

Het is niet moeilijk te begrijpen hoe het alternatief van een statische en tijdloze achterliggende ruimtelijke configuratie – ondanks dat er voor deze optie niet direct overtuigender evidentie is – véél economischer lijkt. Waar de voorstanders van het expliciete bestaan van de tijd²⁷⁴ vaak in gepuzzel verzanden (bijvoorbeeld door hun concepten en interconceptuele relaties) – en meermaals een louter subjectieve oplossing hiervoor aanreiken – lijkt het voorstel van bijvoorbeeld Davies en Barbour om deze eigenschappen van de tijd op te vatten als secundaire fenomenen binnen een bewegingsloos tijdslandschap veel problemen uit de weg te gaan; problemen die aldus ook de theorie van Prigogine betreffen. Er zijn dan wel nog asymmetrieën, de tijd zelf is niet langer iets wat zich voortbeweegt maar in het bijzonder het resultaat van de pijl van het geheugen.

Ik schrijf hier geenszins de overwinning aan het statische alternatief toe. Ik tracht gewoon duidelijk te maken hoe dit alternatief enkele voordelen lijkt te bezitten. Natuurlijk heeft deze theorie veel populariteit te danken aan haar quasi-religieuze overtuigingskracht die veel menselijke problemen die gepaard gaan met tijdelijkheid, lijkt te nuanceren. Zoals we zagen ziet ook Davies hierin een potentieel om niet langer met angst en verdriet tegenover de dood te staan. Maar toen ik eerder de kritiek van John Maynard Smith op Prigogine besprak, beaamde ik reeds het feit dat een bepaalde theorie geen degelijke ondersteuning krijgt door ze te baseren op esthetische of emotionele motieven.

²⁷⁴ In de zin dat deze een pijl is met zowel een richting als een beweging.

5. Determinisme

“...And free I gotta be, but I don't know where I'm bound.”

Johnny Cash

5.1 Inleiding

We zagen reeds in het eerste hoofdstuk hoe Ilya Prigogine meende de pijl van de tijd blootgelegd te hebben en door een nieuwe fundamenteel probabilistische benadering van de werkelijkheid de draagkracht van het determinisme te ondergraven. Om nog even te recapituleren: Prigogine zocht een middenweg tussen het determinisme enerzijds en het radicale uiterste van het toeval anderzijds (en dacht die eveneens gerealiseerd te hebben). Hij ondersteunde dus kortweg de hypothese van het indeterminisme.

Opvallend is echter dat Prigogine deze termen nogal gratis lijkt te gebruiken en nooit echt aan conceptuele verheldering doet, hoewel hij zich toch een filosoof in hart en nieren noemde. Hij associeert het determinisme met symmetrie in de natuur(wetenschappen), waarbij er geen onderscheid meer kan gemaakt worden tussen verleden en toekomst.²⁷⁵ Het objectieve bestaan van een pijl van de tijd zou dit aldus kunnen verbreken. Wanneer hij het begrip ‘determinisme’ toch enigszins tracht te definiëren, zien we in zijn werk maar al te vaak de invulling van de term door Pierre-Simon Laplace opduiken. Ik vermeld deze bekende definitie nog even:

“Stel u een intelligentie voor die voor een gegeven moment alle krachten in de natuur en de respectieve toestand van de wezens die samen de natuur vormen zou kennen, en stel dat die intelligentie zo alomvattend zou zijn dat ze al die gegevens kon analyseren, dan zou ze zowel de bewegingen van de grootste lichamen van het universum als die van de kleinste atomen in één formule kunnen omschrijven: niets zou voor haar onzeker zijn en zowel toekomst als verleden zouden in haar ogen tegenwoordig (heden) zijn.”²⁷⁶

Er moet wel bij vermeld worden dat een dergelijke invulling van onvermijdelijkheid reeds een tijdje ervoor was geopperd door Leibniz.

Deze definitie is dan wel overzichtelijk en illustratief, voor we verdergaan wil ik ze toch nog even aanvullen met een gangbare hedendaagse definitie, verwoord door Peter Van

²⁷⁵ De typische eigenschap van de (vergelijkingen van de) klassieke natuurkunde.

²⁷⁶ Geciteerd in A. SOKAL & J. BRICMONT, *Intellectueel bedrog. Postmodernisme, wetenschap en antiwetenschap*. Antwerpen-Breda, EPO De Geus, 1999, p. 125.

Inwagen. Determinisme is dan de stelling dat “[...] *there is at any instant exactly one physically possible future.*”²⁷⁷ Later in dit hoofdstuk zal blijken waarom er behoefte was aan deze complementaire definitie.

De relatie tussen toeval en determinisme was (en is) vaak de reden van vele discussies, niet in het minst tussen René Thom en Ilya Prigogine. “*But it is interesting to note that when one comes to the specifics of observable phenomena, there is no disagreement between serious scientists.*”²⁷⁸ aldus David Ruelle. Thom zegt dat aangezien het de taak van de wetenschap is om wetten te formuleren, een wetenschappelijke studie van de tijdsevolutie van het universum noodzakelijk een deterministische formulering met zich meebrengt. Dit hoeft echter geen determinisme in de zin van Laplace te zijn. Net zogoed zijn er deterministische wetten mogelijk die waarschijnlijkheidsverdelingen met zich meedragen. Het belang van toeval en willekeur kan dus niet zomaar van de hand gedaan worden.

Over het determinisme zijn al veel woorden gevallen. Ik zal dan ook niet de hele voorgeschiedenis van de discussie weergeven. Ik zal het niet hebben over de vrije wil (alhoewel deze heel even ter sprake zal komen). Ik zal dus het gebruikelijk betoog omtrent het determinisme – met bijvoorbeeld ruimte voor de bespreking van keuzemogelijkheden, moraal,... - niet volgen; dat is op andere plaatsen door andere auteurs al overzichtelijk en goed gedaan. Evenmin wil ik definitieve besluiten trekken, temeer omdat die in deze kwestie nog uitgesloten lijken.²⁷⁹ Wat ik wel zal trachten weer te geven is een reflectie - met de nodige nuances - over de invulling van het concept; nuances die mogelijks Prigogine z’n geponeerde relatie tussen zijn bevindingen en de thematiek van het determinisme kunnen relativeren, omdat ik net stellingen vanuit het vakgebied van Prigogine (en de afgeleide filosofische gevolgen door hemzelf) naast het determinisme zal leggen.

²⁷⁷ P. VAN INWAGEN, *An essay on the free will*, New York, Oxford University Press, 1983, p3

²⁷⁸ D. RUELLE, *Chance and chaos*, p. 31.

²⁷⁹ C. McGinn oppert zelfs dat deze kwestie cognitief gesloten is.

5.2 Determinisme en voorspelbaarheid

In een eerste manier van definiëren wordt het determinisme vaak gelijkgesteld aan voorspelbaarheid.²⁸⁰ Hierbij heeft ‘determinisme’ te maken met de manier waarop de werkelijkheid zich gedraagt; ‘voorspelbaarheid’ is dan gelinkt aan hoe de mens over de mogelijkheid beschikt om zaken rondom hem te observeren, te analyseren en te berekenen. Wat men zo verkrijgt heeft veel weg van een onderscheid tussen ontologie en epistemologie. Om voorspelbaarheid te bekomen, moeten we in staat zijn de huidige toestand van een systeem (en dus de initiële condities) met voldoende precisie te meten en zowel over de geschikte formule beschikken als capabel zijn om er op juiste wijze gebruik van te maken.

Toch heeft zowat niemand, zelfs zij niet die een universeel determinisme aanhingen, ooit een realistisch geloof gehecht aan de mogelijkheid van een ultieme voorspelbaarheid, inclusief Laplace zelf.

Harold Ofstad vermeldt enkele problemen in zijn boek ‘An inquiry into the freedom of decision’.²⁸¹ Zo is er de ontzaglijke hoeveelheid te controleren variabelen, onzekerheid die eigen is aan alle empirische uitspraken en de interactie tussen de waarneming en het object dat de elementen van het determinantenveld wijzigt.

Aansluitend bij dit laatste kunnen we het volgend principieel bezwaar plaatsen: ultieme voorspelbaarheid is sowieso onmogelijk, omdat ik, wanneer ik een voorspelling wil doen, die voorspelling eveneens als determinant in rekening dien te brengen. Hieruit volgt dan dat ik de voorspelling van de voorspelling ook in rekening moet brengen. En zo gaat het verder. Dit is een proces ad infinitum.²⁸²

Bricmont illustreert de tekortkoming van voorspelbaarheid als ultiem kenmerk van het determinisme met een voorbeeldje in zijn artikel ‘Determinism, chaos and quantum mechanics’. Veronderstel, zo schetst Bricmont, een perfect deterministisch en in principe voorspelbaar systeem, zoals een klok, en plaats dit op een ontoegankelijke plek, zoals in een kluisje of op de top van een berg, zodat de initiële condities niet langer beschikbaar

²⁸⁰ Dit is de zogenaamde “Mind Projection Fallacy” van Jaynes. E. JAYNES, “Clearing up mysteries – the original goal”, in: SKILLING, Jeffrey (ed.), *Maximum-entropy and bayesian methods*, Dordrecht, Kluwer, 1989, passim.

²⁸¹ H. OFSTAD, *An inquiry into the freedom of decision*. Oslo, Norwegian University Press, 1961, p. 88.

²⁸² Dit is gerelateerd aan de kritiek op de demon van Laplace, voor het eerst geopperd door Turing en verder besproken door Popper en MacKay.

zijn. “*This renders the system triavially unpredictable, yet it seems difficult to claim that it becomes non-deterministic.*”²⁸³ Er zijn dus fysische systemen die deterministisch zijn, maar toch niet voorspelbaar. Hoe leidt men dan af dat er onvoorspelbare systemen zijn die waarlijk niet-deterministisch zijn?

Het lijkt dus fout om te besluiten tot iets – in dit geval het indeterminisme – enkel en alleen op basis van onze onwetendheid. Dit is zelfs het geval indien onze onwetendheid fundamenteel zou zijn. Tot die conclusie komt ook Robert Bishop in zijn essay ‘On Separating Predictability and Determinism’.²⁸⁴ Zoals Hugo Van den Enden het verwoordt in zijn essay ‘Morele oordelen en de vrije wil’: “*Maar zelfs wanneer wij aannemen dat het empirische bewijs voor het determinisme principieel onmogelijk zou zijn om methodologische redenen, dan kunnen wij daarin geen argument zien tegen de thesis van de universele causatie.*”²⁸⁵

5.3 Determinisme en chaostheorie

5.3.1 Inleidende beschouwing

We kunnen nu een fysisch systeem beschouwen waarvan de toestand wordt gekenmerkt door een aantal getallen (die wijzigen naarmate de tijd verstrijkt). Het systeem is dan deterministisch als er een welbepaalde functie F ²⁸⁶ bestaat die de waarden van de variabelen aanduidt van het systeem op tijdstip t_1 en aangeeft wat deze zullen zijn op tijdstip t_2 , vervolgens op tijdstip t_3 , enzovoort.²⁸⁷ Dit doet vertoont natuurlijk gelijkenissen met de definitie van Laplace. In dit geval is er in principe ook voorspelbaarheid mogelijk, hoewel die niet kan gerealiseerd worden, omwille van bovenstaande opmerkingen. Maar dit doet niet terzake, want wat telt is dát het systeem zich zo gedraagt, onafhankelijk van menselijke kennis.

Veronderstel dat een systeem zich op twee verschillende tijdstippen in een gelijke toestand bevindt, maar op de tijdstippen die respectievelijk op de twee voorgaande tijdstippen volgen, in een verschillende toestand. Dan zou een dergelijke functie F niet kunnen bestaan. Maar deze invulling van het determinisme kan niet zo eenvoudig over

²⁸³ J. BRICMONT, *Determinism, chaos and quantum mechanics*, url: <http://www.fyma.ucl.ac.be/files/Turin.pdf>, p. 2.

²⁸⁴ R. BISHOP, “On separating predictability and determinism”, in: *Erkenntnis*, 2003, 2, passim.

²⁸⁵ H. VAN DEN ENDEN, *Op het scherp van de rede. Veertig jaar kritisch denken*, Antwerpen-Apeldoorn, Garant, 2003, p. 66.

²⁸⁶ Een differentiaalvergelijking,...

²⁸⁷ J. BRICMONT, *Determinism, chaos and quantum mechanics*, p. 3.

boord gegooid worden. “*As far as we know, there exists only one world and it never occurs twice in the same state (if it is described in sufficient detail).*”²⁸⁸

De wetenschap is in zekere zin begaan met instanties van zo’n functie F om zo goed mogelijk voorspellingen te maken, maar wanneer we determinisme als universeel bekijken, zien we dat de invulling van dit begrip eigenlijk van weinig belang is voor de menselijke leefwereld of voor de wetenschap. In dit geval is determinisme opgevat als voorspelbaarheid duidelijk vals. En wanneer determinisme wordt ingevuld op een manier die gerelateerd is aan de definitie van Laplace heeft ze dan misschien wel veel kans om waar te zijn, maar levert ze ons overduidelijk geen interessante meerwaarde. Toch is het interessant deze thematiek eens te bekijken, omwille van de vele misverstanden die er rond bestaan.

Toch is er een duidelijke (culturele en sociologische) vijandigheid tegenover het determinisme, vooral wat het menselijk gedrag betreft. Die vijandigheid komt vaak voort uit een neiging om de zogenaamde ‘vrije wil’ te kunnen redden, temeer omdat het bestaan hiervan samen lijkt te hangen met talloze morele, politieke en filosofische assumpties.

Maar menselijk gedrag is dan wel hoogst onvoorspelbaar, we beschikken niet over voldoende gedetailleerde kennis om een ontologisch determinisme zomaar van tafel te vegen. En wanneer we zoeken naar een alternatief voor het determinisme binnen de fysica, oppert Bricmont dat “*As far as I can see, nothing has ever been proposed, except pure randomness.*”²⁸⁹ In dit geval is er natuurlijk evenmin sprake van de vrije wil, want beslissingen veroorzaakt door willekeur en toevalligheden staan even ver van bewuste en doordachte keuzes die we aan de vrije wil toeschrijven en die als het ware boven elk fysisch proces uitstijgen. Hierbij moeten echter een bemerking gemaakt worden – ik doe dat in het volgende subhoofdstuk – maar op dit moment gaan we eerst verder met hetgeen waarmee we bezig zijn.

²⁸⁸ J. BRICMONT, *Determinism, chaos and quantum mechanics*, p. 4.

²⁸⁹ *Ibid.*, p. 5.

5.3.2 Argumentatie tegen het verband tussen chaostheorie en determinisme

Natuurlijk is er zoiets als de huidige chaostheorie met haar chaotische systemen, gevoelig voor de beginwaarden.²⁹⁰ Voorspelbaarheid wordt hier meer dan ooit onmogelijk. Toch is dit een uitermate interessant domein met verscheidene nieuwe studieobjecten,²⁹¹ geschikt voor een statistische en probabilistische benadering die ons in plaats van de voorspelling van het gedrag van systemen²⁹² veelal kennis van die systemen zelf kan verschaffen. En kennis opdoen en inzichten verkrijgen, dat is evenzeer een belangrijk doel van de wetenschap.

Bricmont stelt dat het bestaan van chaotische dynamische systemen en deterministische chaos²⁹³ wel compatibel is met het determinisme. En het is op dit punt dat hij ook ingaat tegen Prigogine. Het is namelijk juist omdat een dergelijk systeem zich volgens een deterministische wetmatigheid gedraagt, dat we kunnen inzien hoe een kleine wijziging van de initiële condities dergelijke gevolgen kan hebben. Stel bijvoorbeeld dat we een theorema hebben dat zegt dat geen enkel klassiek mechanisch systeem zich chaotisch kan gedragen, maar integendeel verkondigt dat het zich op een periodieke wijze moet gedragen. Dit zou de klassieke visie ondermijnen. We zien namelijk rondom ons verscheidene niet-periodieke systemen, zodat we zouden moeten besluiten dat de klassieke mechanica onbruikbaar is om dergelijke systemen te beschrijven. We zouden zelfs kunnen suggereren dat er een inherent indeterminisme aanwezig is in de basiswetten van de natuur.²⁹⁴ Ook Daniel Dennett beaamt dit punt: *“In het algemeen is er geen tegenspraak in de opmerking dat bepaalde fenomenen gedetermineerd zijn om veranderlijk, chaotisch en onvoorspelbaar te zijn [...]”*²⁹⁵ Dit is bijvoorbeeld van toepassing op de bifurcatiepunten waarvan sprake in het werk van Prigogine.

Bricmont vermeldt wel enkele verwarringen rond het begrip ‘chaos’.²⁹⁶

²⁹⁰ Poincaré vermeldde reeds in 1909 het geval van meteorologie en weersvoorspelling.

²⁹¹ Vreemde attractoren, Lyapunov-exponenten,...

²⁹² Bijvoorbeeld het gedrag van gassen.

²⁹³ Zulke systemen kunnen resultaten genereren die testen kunnen doorstaan die uitzoeken of een serie getallen ‘random’ (willekeurig) is of niet, iets wat Bricmont zelf ook ziet als een duidelijk bewijs tegen het idee dat een bepaald fenomeen ‘intrinsiek random’ is.

²⁹⁴ J. BRICMONT, *Science of chaos or chaos in science*, pp. 5-6.

²⁹⁵ D. DENNETT, *De evolutie van de vrije wil*, Amsterdam-Antwerpen, Uitgeverij Contact, 2004, p. 110.

²⁹⁶ J. BRICMONT, *Science of chaos or chaos in science*, pp. 11-13.

Chaostheorie wordt vaak tegenover de Newtoniaanse mechanica geplaatst, waarbij de eerste als niet-lineair en de laatste als lineair wordt beschouwd. Toch wordt er in de Newtoniaanse theorie reeds gebruik gemaakt van vergelijkingen die zuiver niet-lineair zijn. Een niet-lineair systeem is dus ook niet noodzakelijk chaotisch.

Er duiken ook vele problemen op wanneer men de wiskundige constructie die de chaostheorie is, op concrete situaties in de realiteit probeert toe te passen. *“To do this in a sensible way, one must first have some idea of the relevant variables and of the type of evolution they obey.”*²⁹⁷

Verder wordt chaostheorie vaak verward met de theorieën betreffende complexiteit en zelforganisatie. Zo wordt chaostheorie ook dikwijls gelijkgesteld met de zinsnede dat ‘kleine oorzaken grote effecten kunnen hebben’ en wordt dit vervolgens toegepast op de geschiedenis van de mensheid. Dit noemt Bricmont een populariserende intuïtie. Tenslotte zien we, wat deels in dezelfde lijn ligt als voorgaande, hoe de verschillende invullingen van de term ‘chaos’ door elkaar gebruikt worden, met de meeste aandacht voor de brede toepassing in domeinen zoals politiek, sociologie,... waar deze gelijk wordt gesteld aan ‘wanorde’.

Hierop voortbouwend zegt Bricmont dat *“[...] we can assign [...] a probability distribution on microstates, given some information that we have on the initial macrostate of the system. Since, for each microstate, the deterministic evolution leads to a well-defined evolution of the macrostate, we can, in principle, compute the probability, relative to our initial distribution on the microstates, of a given macrostate.”*²⁹⁸

In het tijdschrift ‘Kultuurleven’ bekijkt Gorik De Samblanx in het artikel ‘Chaostheorie – over voorspelbaarheid en determinisme’ ook de relatie tussen deze termen. Hij besluit dat precieze voorspelbaarheid uitgesloten lijkt, maar zoals we hoger zagen, is deze kwestie sowieso niet enorm relevant. De relatie tussen chaostheorie en determinisme is wel aan de orde in het huidige wetenschappelijke landschap. *“Indeterminisme zou zo essentieel nieuw zijn, dat het begrijpelijk is dat sommige chaoswetenschappers graag suggereren dat ze het als resultaat verkrijgen.”*²⁹⁹ De Samblanx besluit voorzichtig dat er binnen de chaostheorie eigenlijk helemaal (nog) niet wordt aangetoond dat gebeurtenissen al dan niet deterministisch zijn.

²⁹⁷ J. BRICMONT, *Determinism, chaos and quantum mechanics*, p. 12.

²⁹⁸ Ibid., p. 20.

²⁹⁹ G. DE SAMBLANX, “Chaostheorie: over voorspelbaarheid en determinisme”, in: *Kultuurleven*, 1997, 1, p 63.

Wat nu dit determinisme betreft, geeft ook Bricmont grif toe dat de huidige wetenschappelijke onderzoeken nog steeds geen uitsluitel kunnen bieden over het al dan niet waar zijn ervan op een fundamenteel niveau van de realiteit. Zelf heeft hij reeds het voor hemzelf meest plausibele standpunt ingenomen, maar hij voegt er aan toe dat de discussie, wil ze vruchtbaar zijn, zich moet richten op een analyse van de fundamentele fysische wetten.³⁰⁰

In dezelfde zin stelt David Ruelle dat er geen incompatibiliteit hoeft te zijn tussen toeval en determinisme, in de zin die ook René Thom op het oog had.³⁰¹ Er is bijvoorbeeld geen logische incompatibiliteit tussen toeval en determinisme, zo stelt Ruelle. De initiële staat van een systeem kan een zekere waarschijnlijkheidsverdeling hebben. In dit geval zal het systeem ook willekeurig zijn op andere tijdstippen. Die willekeur kan dan op zijn beurt beschreven worden door nieuwe waarschijnlijkheidsverdelingen, die deterministisch kunnen afgeleid worden door de wetten van de mechanica. In de realiteit kan de toestand van een systeem op een initieel tijdstip nooit met oneindige precisie gekend zijn. Er moet dus wat speling gelaten worden. Dit kan echter een veel grotere willekeur opleveren op een later tijdstip. Het determinisme sluit het toeval dus niet uit. Het enige wat blijkt is dat we de klassieke mechanica kunnen beschrijven zonder noties als toeval en willekeur te vermelden.

5.4 Indeterminisme

We zagen daarjuist hoe Bricmont stelt dat er als alternatief voor het determinisme nog nooit iets voorgesteld is, behalve totale willekeur. Dat is een uitermate opmerkelijke uitspraak voor een criticus van Prigogine, omdat deze laatste juist met zijn indeterminisme een middenweg wil bieden tussen het determinisme enerzijds en het toeval / willekeur anderzijds en dat zelfs letterlijk zo zegt. Moeten we aannemen dat dit een (eenmalige) uitschuiver zonder meer is van Bricmont? Of gebruikt Prigogine deze term verkeerdelijk? Om misverstanden te vermijden, alsook discussies waarin men naast elkaar praat, is het zinvol om het indeterminisme te proberen definiëren, temeer omdat dit een term is die vaak gratuit gebruikt wordt. Dikwijls wordt dit begrip ook onder de mat

³⁰⁰ Dit is volgens Bricmont de quantummechanica. Dit onderzoek voert hij concreet in *Contre la Philosophie de la Mécanique Quantique*, in *Les Sciences et la Philosophie. Quatorze Essais de Rapprochement*.

³⁰¹ D. RUELLE, *Chance and chaos*, pp. 27-33.

geveegd. Robert Bishop publiceerde een artikel getiteld ‘Determinism and indeterminism’.³⁰² De hele paper door bespreekt hij het determinisme (binnen het huidige fysische framework, in relatie met de relativiteitstheorie, vanuit de invulling van Laplace,...) zonder het de notie indeterminisme zelfs te vermelden. In de laatste paragraaf stelt hij zich de vraag: “*Finally, what of broader implications of determinism and indeterminism in physical theories?*”³⁰³ om vervolgens enkel de filosofische gevolgen van een eventueel determinisme aan te halen.

Indeterminisme wordt vaak op de volgende manier ingevuld: een gebeurtenis zou of kon zich niet voorgedaan hebben (zou dus anders geweest zijn), zelfs als de hele configuratie van het universum tot aan de tijdstip van die (potentiële) gebeurtenis dezelfde is.³⁰⁴ Indeterminisme gaat dus vaak samen met een objectieve waarschijnlijkheid. We kunnen er ons nu iets bij voorstellen, maar deze definitie werpt nog geen verhelderend licht op de hierboven geschetste problematiek

William James zegt in zijn artikel ‘The dilemma of determinism’ het volgende over indeterminisme: “*Indeterminism thus denies the world to be one unbending unit of fact. It says there is a certain ultimate pluralism in it [...]*”³⁰⁵ Hierop verder bouwend stelt James dat indeterminisme toeval en willekeur lijkt te impliceren. Lijkt te impliceren! Hij hoopt dat er een verschil is tussen het harde, blinde toeval en het indeterminisme, maar voegt eraan toe dat we nog niet in staat zijn een wezenlijk verschil aan te duiden. Toch wil hij deze eigenschappen behouden, wat hem ertoe noodzaakt ze een andere invulling te geven. James ijvert ervoor om onder ‘chance’ te verstaan dat “[...]it may also fall out otherwise.”³⁰⁶ Dit brengt ons terug naar de definitie van Anscombe.

Timothy Shanahan onderzoek de relatie tussen evolutie / evolutionaire biologie en het indeterminisme en besluit dat er in een evolutionair proces willekeurige toevalssprongen aan het werk zijn die voortkomen uit een inherent biologisch indeterminisme.³⁰⁷

Indeterminisme wordt ook dikwijls als voorwaarde voor de mogelijkheid tot vrije wil gezien.³⁰⁸ Dit impliceert dat het indeterminisme best niet verbonden kan zijn met

³⁰² R. BISHOP, *Determinism and indeterminism*, arxiv.org/pdf/physics/0506108, passim.

³⁰³ R. BISHOP, *Determinism and indeterminism*, s.p.

³⁰⁴ E. ANSCOMBE, “Causality and determination”, in E. SOSA & M. TOOLEY (eds.), *Causation and conditionals*, New York, Oxford University Press, 1975, s.p.

³⁰⁵ W. JAMES, *The dilemma of determinism*, url: <http://csunx4.bsc.edu/bmyers/WJ1.htm>, s.p.

³⁰⁶ W. JAMES, *The dilemma of determinism*, s.p.

³⁰⁷ T. SHANAGAN, *The evolutionary indeterminism thesis. (Thinking of biology)*, url: http://www.accessmylibrary.com/coms2/summary_0286-22498842_ITM, 2003, passim.

‘randomness’, want een menselijke beslissing die tot stand komt op basis van een willekeurige (kwantum)sprong naar één bepaalde optie waarborgt even weinig vrijheid van de actor als een zogenaamde beslissing die tot stand kwam in een deterministisch universum (volgens de incompatibilistische opinie).

De noodzaak dient zich aan om indeterminisme als een totaalpakket te zien. Ik wil graag benadrukken dat ik hier met enige voorzichtigheid op insister, gezien de speling waarmee deze term algemeen beschouwd wordt toegepast.

Willekeur en toeval lijken inherent te zijn aan het indeterminisme. Verder stelt het indeterminisme dat bepaalde gebeurtenissen niet onderworpen zijn aan deterministische causaliteit. Dit impliceert dat er in bij het indeterminisme wel plaats is voor gedetermineerde processen. En hier zijn we de analogie opduiken met het bifurcatiediagram dat Prigogine voorstelde. Enerzijds zijn er de bifurcatiepunten die een indeterminisme lijken te waarborgen, anderzijds zijn er de deterministische gebieden tussen de bifurcatiepunten in.

5.5 Determinisme en de pijl van de tijd

Milic Capek bekijkt in ‘The Unreality and Indeterminacy of the Future in the Light of Contemporary Physics’ wat de pijl van de tijd en de realiteit van de tijd als een proces van worden³⁰⁹ ons kunnen vertellen over de een (in)determinisme met betrekking tot de toekomst. Hierbij kan men zich afvragen of de realiteit van de tijd impliceert dat de toekomst reëel is en als dit laatste het geval zou zijn, of die toekomst dan ongedetermineerd is of wel degelijk gedetermineerd kan zijn. Dit kan verschillende antwoorden opleveren die elk in een bepaalde periode van de geschiedenis hun belang hebben gehad.

³⁰⁸ Natuurlijk zijn er ook de compatibilisten, met figuren als Denett, die het determinisme trachten te verenigen met de vrije wil. Voor de relatie tussen indeterminisme en vrije wil: R. KANE, “Responsability, luck and chance: reflections on free will and indeterminism”, in: *The Journal of Philosophy*, 1996, 5, passim. Hierin raakt hij echter ook niet verder dan indeterminisme als een technische term op te vatten die bovenal deterministische causaliteit uitsluit, en een term als ‘toeval’ invult als een woord uit het alledaagse taalgebruik waarmee een persoon wil aanduiden dat iets ‘buiten zijn controle’ gebeurt.

³⁰⁹ De auteur benadrukt dit aspect om te vermijden dat tijd hier zou kunnen opgevat worden als een soort vierde dimensie, analoog aan de ruimtedimensies.

Het gevoel van de stromende tijd is een consistente en krachtige ervaring in elk menselijk wezen die hem het gevoel bezorgt van een toekomst die nog niet gerealiseerd is. “*The distinction is due to the fact that even the most concrete representation of an anticipated situation does not have the full sensory intensity of the present perception [...]*”³¹⁰ Ook de dieren beschikken over zulke tijdservaring, althans de hoger ontwikkelde. In de Westerse traditie heerste echter lang de overtuiging dat de toekomst een voorgegeven iets is, iets wat zich ver(der) weg in de tijd bevindt, maar toch voor sommige geesten reeds transparant is.³¹¹ Zo is de goddelijke voorkennis een wezenlijk aspect en dogma van de meeste religies. Zelfs buiten de religies om werd het dit concept aanvaard, zoals in het gesecculariseerde pantheïsme van Bruno of Spinoza. Parmenides ontkende als een van de eerste expliciet het bestaan van de tijd en hoewel zijn uitgesproken radicale mening niet meteen veel bijval kreeg, geloofde toch zowat elke filosoof sinds Plato in een ware realiteit voorbij de tijd zelf, waarbij deze laatste te maken heeft met het imperfecte karakter van onze zintuigen. “[...] *the future is determined and real.*”³¹², zo werd er algemeen aangekeken tegen de vragen die Capek zich in het begin stelde.

Aristoteles plaatste zich hier buiten, althans wat de ondermaanse wereld betreft.³¹³ Wanneer men een uitspraak doet over bijvoorbeeld iets wat morgen zal plaatsvinden, dan is die waar noch vals. De waarheid ervan is namelijk nog onzeker, niet omwille van menselijke onwetendheid, maar omdat de toekomst zelf nog objectief ambigu is. De toekomst is dus nog geen realiteit en ongedetermineerd. Zijn afwijzing van het determinisme kwam echter wel vooral voort uit morele overwegingen. Tweeduizend jaar later werd zijn visie gedeeld door William James.

In tegenstelling tot de meeste theologen en filosofen aanvaardden de meeste wetenschappers de realiteit van tijd (en hiermee ook het niet reëel zijn van de toekomst). Dit was zelfs het geval bij hen die een deterministische visie aanhingen. De meeste klassieke atomisten en middeleeuwse kosmologen verkozen de relationele theorie van de tijd. Tijd was hier dus onlosmakelijk verbonden met concrete gebeurtenissen en had geen

³¹⁰ M. CAPEK, “The unreality and indeterminacy of the future in the light of contemporary physics”, in: GRIFFIN, David (ed.), *Physics and the ultimate significance of time*, Albany, State university of New York press, 1986, p. 298.

³¹¹ Denk hierbij ook aan de spanning bij Augustinus tussen de goddelijke voorzienigheid en predestinatie aan de ene kant en de vrijheid om al dan niet volgens het woord van God te leven anderzijds.

³¹² M. CAPEK, *The unreality and indeterminacy of the future in the light of contemporary physics*, p. 299.

³¹³ Aristoteles was veel meer een procesdenker dan Heraclitus. Deze verbond zijn dynamische filosofie aan een theorie van de eeuwige wederkeer, waardoor hij het worden kon transformeren naar het zijn.

substantiële realiteit.³¹⁴ De gelijkenis tussen deze visie en het verwerpen van de Newtoniaanse absolute tijd is echter eerder kunstmatig. Newton zelf zag dus zowel tijd als ruimte als twee ontologische frames, alomtegenwoordig én eeuwig.³¹⁵ Toch verwierpen zowel zijn voorganger, Gassendi, als zijn opvolger, Samuel Clarke, reeds het idee van een eeuwig ‘nu’ en benadrukten ze het belang van het temporele. De impact van dergelijke visies was echter eerder beperkt.

Met de opkomst van het wetenschappelijk determinisme werd tijd vervolgens helemaal gedegradeerd.

*“With the coming of mathematical physics the deductive concept of causality prevailed; the causal relation was viewed as a relation of logical implication. In other words, every state of a mechanical system was regarded as being locally contained in its antecedent state, from which all its features can be deduced [...]”*³¹⁶

Zo wees Spinoza er reeds op dat alles wat gebeurt, noodzakelijk gebeurt en op geen enkele andere manier kan gebeuren. Zo is er an sich ook geen menselijke vrijheid. Verder was Spinoza een van de eerste die inzag dat “[...] *the deductive concept of causality virtually eliminates time.*”³¹⁷ Alles volgt uit de eeuwige substantie van God, aldus Spinoza.³¹⁸ Dit laatste impliceert reeds alles. Ook Galileo ging daarin mee. Deze deterministische stroming kende een culminatiepunt in Laplace. De deductieve theorie van de causaliteit raakte wijdverspreid, ondanks Hume z’n twijfels hieromtrent³¹⁹ (en anticepeerde zo in zekere zin Bergson). Hume kreeg niet veel navolging, vooral omwille van de successen van voorspellingen op basis van deductie.

Heden ten dage is het klassieke determinisme niet langer een dogma in de fysica, zo merkt ook Capek op, en kan dit ook niet meer gebruikt worden om de realiteit van de toekomst te ondersteunen.

Wat dan met de relativiteitstheorie, die nog steeds van toepassing is evenzeer deterministisch is als vroegere theorieën en opinies? Capek stelt dat dit komt door haar macroscopische karakter. Planck zijn constante, h , die staat voor discontinuïteit en indeterminisme, kan namelijk makkelijk genegeerd of weggewerkt worden op

³¹⁴ B. RUSSELL, *Geschiedenis van de westerse filosofie*, p. 98.

³¹⁵ Volgens de atomisten bestaat er in de wereld enkel de materie en de ruimte waarin deze beweegt. Door de aanname van beweging werd meteen ook tijd geïmpliceerd.

³¹⁶ M. CAPEK, *The unreality and indeterminacy of the future in the light of contemporary physics*, pp. 301-302

³¹⁷ Ibid., p. 302.

³¹⁸ ‘Volgen uit’ wordt hier niet in temporele zin opgevat.

³¹⁹ *Geschiedenis van de filosofie*, pp. 695-698

macroscopische schaal. Capek verwijst naar de Russische fysicus J. Frenkel³²⁰ die bewijs leverde dat de atomiciteit van actie geïmpliceerd wordt door de Lorenztransformatie.

*“Since the indivisibility of action implies the indeterminacy of microphysical processes, this would indicate that [...] the alleged incompatibility of the relativity and the quantum theories simply does not exist.”*³²¹

Dit is van belang omdat belangrijke conclusies van de relativiteit plaatsvinden in gebieden met hoge snelheden, dus in microstructuren waar de atomiciteit van de actie een beslissende rol speelt.

Toch wordt het relativistische concept van ruimte-tijd nog steeds aangewend om het aspect van het worden van de fysische realiteit van de hand te doen en een determinisme naar de toekomst toe te onderstrepen. Capek vermeldt hier de theorie van het worden dat afhankelijk is van de geest. Hij onderscheidt twee versies. Een eerste verbindt de tijdloosheid aan de predeterminatie van de toekomst, iets wat logisch consistent is. Deze visie gaat terug op onder andere Laplace en Spinoza. Een andere versie ondermijnt het worden maar voegt er aan toe dat dit geen volledige determinatie van de toekomst inhoudt. Capek noemt deze paradoxale relatie eenvoudigweg een mysterie, maar merkt op dat men in het verleden vaak wegkwam met contradictorische stellingen, zoals de goddelijke predestinatie die hand in hand ging met de menselijke vrijheid.³²²

Wat het argument zelf betreft: er is geen ‘nu’ in de relativistische ruimte-tijd. De ‘nu-lijn’ die het verleden van de toekomst scheidt, is dus verschillend voor verschillende toeschouwers en aldus is er geen objectief ‘nu’. Toch gaat deze conclusie niet volledig op, aldus Capek, ondanks het feit dat er inderdaad geen objectief ‘nu’ is. De hele vierdimensionale regio “Elsewhere” (of “Elsewhen”) is namelijk gesitueerd tussen het causale verleden en de causale toekomst. Deze regio wordt op verschillende wijze verdeeld door verschillende toeschouwers. Maar geen enkele ‘nu-lijn’ van mezelf kan m’n eigen verleden of m’n eigen toekomst doorsnijden. Bovendien is de notie “nu-lijn” niet veel meer dan een fictie, ontdaan van elke fysische realiteit. Tevens, ook al is er geen absoluut ‘nu’, er is wel zoiets als een absolute toekomst. Ik kan namelijk geen zicht krijgen op toekomstige gebeurtenissen van mezelf, omdat er nu eenmaal geen

³²⁰ M. CAPEK, *The unreality and indeterminacy of the future in the light of contemporary physics*, p. 305.

³²¹ *Ibid.*, p. 305.

³²² *Ibid.*, p. 306.

achterwaartse causaliteit is en omdat er dan snelheden groter dan het licht mogelijk zouden moeten zijn, iets wat de relativiteitstheorie uitsluit. En bovendien kan mijn eigen causale toekomst door geen enkele andere waarnemer opgemerkt worden. Dit maakt toekomstige gebeurtenissen intrinsiek niet-observeerbaar.³²³

Capek geeft toe dat het niet is omdat iets niet te observeren valt, dat het ook niet te postuleren valt, maar voegt er aan toe dat in dit concrete geval de theorie als zou het worden afhankelijk zijn van de geest, de hele situatie uitermate complex maakt. Zo duikt er een sterk dualisme op: “[...] *a realm of becomingless physical being existing concurrently with a realm of subjective becoming.*”³²⁴ En er lijkt geen enkele manier te zijn om deze twee te linken aan elkaar. De toekomst is dus reëel noch gedetermineerd, want zowel conceptuele analyse als empirische evidentie wijzen in die richting, zo besluit Capek.

Heel bevredigend lijkt deze verklaring niet te zijn. Capek maakt gewag van een dualisme³²⁵ – een statisch ‘zijn’ tegenover een subjectief ‘worden’ – maar verwerpt dit om economische redenen, maar overweegt de mogelijkheid niet om dat ‘worden’ te plaatsen in en af te leiden uit het ‘zijn’.

Capek hangt ook objectieve pijl van de tijd aan en verdedigt het ‘worden’. Hieruit volgt, zoals hijzelf ook zegt, dat de toekomst nog niet reëel is, en bovendien niet gedetermineerd. We horen Prigogine dit ook vaak zeggen. De pijl van de tijd als objectieve realiteit verbreekt de symmetrie van de tijd en maakt ook zo komaf met het determinisme. Natuurlijk wordt het determinisme meestal beschreven vanuit een statisch standpunt, bijna vereenzelvigd met het ‘zijn’, waarin alles gegeven is. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de demon van Laplace. Nemen we nu de een wijdverspreide gangbare definitie van het determinisme, duidelijk verwoord door Van Inwagen, die we reeds bij aanvang van dit hoofdstuk zagen. Zelfs wanneer we de definitie niet uitbreiden met kenmerken zoals ‘een toestand die noodzakelijk uit een vorige toestand volgt’³²⁶ of

³²³ M. CAPEK, *The unreality and indeterminacy of the future in the light of contemporary physics*, p. 307.

³²⁴ *Ibid.*, p. 307.

³²⁵ Dit lijkt natuurlijk enorm op het Bergsoniaanse dualisme.

³²⁶ Denett stelt echter dat het determinisme een leer over toereikendheid is. D. DENNETT, *De evolutie van de vrije wil*, p. 103.

linken aan causaliteit met bijhorende temporele prioriteit, zien we dat de invulling ervan niet hoeft te vloeken met de verbreking van de tijdssymmetrie.

Zelfs wanneer er een duidelijk onderscheid is tussen verleden en toekomst, zelfs wanneer tijd niet illusoir is, de vergelijkingen van de natuurkunde niet langer symmetrisch zouden zijn en de onomkeerbaarheid dus fundamenteel – en niet langer fenomenologisch – blijkt, kan dit geen argumentatie tégen het determinisme betekenen.

De equivalentie tussen de ene richting in de tijd en de andere, tussen toekomst en verleden, wordt dan wel ingevoerd voor een goed begrip in deze thematiek, determinisme heeft maar één richting nodig om zich te manifesteren, zelfs al is die verbonden met een objectief ‘worden’.

5.6 Irrationale getallen

5.6.1 Wiskunde op de bres tegen determinisme

In het boek ‘The arrow of time’ brengen de auteurs Peter Coveney en Roger Highfield een verdediging van de pijl van de tijd. Ze vermelden hoe de situatie in de werkelijke wereld het determinisme zowel als de eeuwige terugkeer (vermeld door Poincaré) ondermijnt. Ze stippen tevens aan hoe de bevindingen van de Brussel-Austin-school het startpunt vormen voor hun onderzoek. Ilya Prigogine schreef het voorwoord bij dit werk. Ik spits me hier toe op een argument tégen het determinisme.

Belangrijk is, zoals we ook al eerder zagen, dat de toepassing van Newton z’n vergelijkingen een perfecte kennis van de beginwaarden vereist, wil het determinisme standhouden. Dit impliceert echter oneindigheid: de zoektocht naar deze perfectie blijft en blijft maar verdergaan.

Veronderstel dat de snelheid van een metalen bal in een flipperkast wordt weergegeven door bijvoorbeeld een getal tussen 0 en 1.³²⁷ Dit houdt volgens de auteurs een probleem in. “*For any number we take to describe that initial condition is very special and atypical.*”³²⁸ Dit is omdat we enkel met de zogenaamde rationale getallen kunnen werken, terwijl wiskunde aantoont dat er een overvloed aan (overaftelbare) irrationale getallen is. Er is dan wel een oneindig aantal rationale getallen tussen 0 en 1, er zijn

³²⁷ P. COVENEY & R. HIGHFIELD, *Arrow of time*, p. 273.

³²⁸ *Ibid.*, p. 273.

oneindig meer irrationale getallen. “*Thus the rationals themselves, which are all we are able to handle (the irrationals must always be approximated by rational numbers), form a highly abnormal selection.*”³²⁹ Het is dus oneindig keer waarschijnlijker dat wanneer het balletje in de flipperkast in beweging wordt gebracht, zijn snelheid gegeven wordt door een irrationaal getal. Elke benadering zal dus na verloop van tijd tot een heel verschillend resultaat leiden.

De ontwikkeling van de ergodische theorie zorgde ervoor dat het makkelijker werd om complexiteit en de pijl van de tijd in de faseruimte, voor te stellen. Ook het gedrag van chaos kan aangetoond worden door portretten in de faseruimte, waarbij men eerder gebruik maakt van een vlek dan van een enkel punt; een vlek waarvan de beweging kan beschreven worden door de Liouville-vergelijking. De vlek bevat de mogelijke trajecten (van bijvoorbeeld de metalen bal in een flipperkast) die compatibel zijn met de onzekerheid van de initiële condities. Opvallend is dat er hier een evenwicht en dus een eindtoestand van de tijdsevolutie kan bereikt worden, omdat elk deel van de ruimte is ingenomen. Er blijkt dus andermaal dat de deterministische trajecten opgegeven moeten worden in het voordeel het werken met probabiliteit. Verder heeft deze conclusie “[...] *considerable significance for time’s arrow, since statistical mechanics was one of the principal routes by which scientists, most notably Boltzmann, have attempted to express the irreversible Second Law of Thermodynamics in terms of molecular actions.*”³³⁰

Sinai toonde eerder reeds aan dat dergelijke ergodische systemen ook van toepassing zijn vanaf wanneer we bijvoorbeeld meer dan 2 lichamen in een ruimte hebben (denk aan een spelletje snooker).³³¹

5.6.2 Bespreking en bemerkingen

De auteurs lijken in het begin even determinisme gelijk te zullen stellen met voorspelbaarheid, maar wijzen uiteindelijk toch op een fundamentele onbepaaldheid.

Dit lijkt een degelijke argumentatie tegen het determinisme, maar ze vertrekt reeds van een vooronderstelling die door de auteurs zelf niet vermeld wordt. Het betreft hier het

³²⁹ P. COVENEY & R. HIGHFIELD, p. 273.

³³⁰ Ibid., p. 277.

³³¹ L. BUNIMOVICH & Y. SINAI, “The fundamental theorem of the theory of scattering billiards”, in: *Math USSR*, 1973, 19, passim.

statuut van de wiskunde en de relatie tussen wiskundige symbolen en objecten in de werkelijkheid.

Er kunnen namelijk verschillende visies onderscheiden worden³³² en hoewel sommige heden ten dage minder houdbaar geworden zijn dan andere, is er nog steeds geen consensus over de juiste te volgen weg.

Zo zijn er de intuïtionisten³³³ die stellen dat wiskundige objecten maar bestaan in zoverre het mentale constructies zijn. Deze houding ondermijnt natuurlijk het hele argument van Coveney en Highfield, die het gebruiken om een ontologisch determinisme af te wijzen en een objectieve intrinsieke waarschijnlijkheid te verdedigen. Hetzelfde geldt voor het formalistische standpunt,³³⁴ waarbij de wiskunde wordt opgevat als een spel met symbolen.³³⁵

Coveney en Highfield lijken een standpunt te verdedigen dat aansluit bij het wiskundig realisme (dat vaak in verband wordt gebracht met het platonisme), waarbij wiskunde tevens noodzakelijk is voor de empirische wetenschappen. Quine valt ook onder deze stroming.

Het is echter foutief (of op zijn minst voorbarig) één dergelijke invalshoek als waar te bestempelen en die keuze bovendien niet eens te expliciteren.

Voorgaande heeft nog een slotbemerking. Hoewel deze indeling vooral van toepassing is op het wiskundig domein, bestaat de controverse ook, hoewel in mindere mate, bij de overige (harde) wetenschappen. Deze discussie heb ik in deze scriptie echter niet aangebracht.

³³² M. REILLY, *A postmodern direction in mathematics*, url: www.michelereilly.net/paper/postmodern.pdf, passim.

³³³ De bekendste intuïtionist is misschien wel de Nederlander Brouwer.

³³⁴ Verdedigers hiervan zijn Carnap en Tarski.

³³⁵ Een verschil met het intuïtionisme is bijvoorbeeld dat bij het formalisme de notie 'oneindig' aanvaardbaar is.

5.7 Besluit

We hebben in dit hoofdstuk niet de hele problematiek rond het determinisme uitgespit. We hebben wel enkele relevante punten en stellingen aangestipt die we onderweg waren tegengekomen en die enige nuance nodig hadden.

Ik heb geen uitgesproken stelling ingenomen in het debat voor of tegen het determinisme. Ik heb wel laten zien dat zowel de voor- als tegenstanders heel happig zijn om conclusies hieromtrent te verbinden aan wetenschappelijke, theoretische en experimentele bevindingen. Vaak gebeurt dit nogal ondoordacht en zodoende ook onterecht of op zijn minst foutief. Dit hangt samen met de opmerking die ik eerder al maakte: veelal neemt men niet de moeite bepaalde concepten duidelijk te specificeren of in te vullen, zodat men op termijn verkeerde relaties tussen bepaalde zaken gaat poneren. Ofwel maakt men de gehanteerde betekenis niet expliciet, wat dan weer aanleiding geeft tot discussies waarin men meermaals naast elkaar praat.

Wat de eigenlijke bevindingen betreft, kan ik verrassend kort zijn.

Prigogine plaatst het determinisme nergens uitgesproken gelijk aan de (on)mogelijkheid tot voorspelbaarheid, maar neemt deze termen in filosofische opwellingen af en toe in de mond. Zoals we zagen kunnen deze twee begrippen makkelijk van elkaar losgekoppeld worden.

Prigogine meent verder dat chaoswetenschap en probabiliteit de teloorgang van het determinisme hebben aangetoond. Ook deze gevolgtrekking bleek veel te voorbarig te zijn. De chaoswetenschap kan ons geen definitief uitsluitsel bezorgen inzake de deterministische kwestie.

Tenslotte zou het bewijs van een pijl van de tijd het determinisme al helemaal ondergraven. Ook al kan dit aanleiding geven tot verdere discussie, naar mijn mening hoeft dit niet zo te zijn.

Dan rest er nog de problematiek van het indeterminisme. We zagen dat er geen rechtlijnigheid in de definitie ervan zit. Daarom stelde ik ook voor om het als een totaalpakket op te vatten. Het indeterminisme waar Prigogine zich achter schaarde wordt zo, eerder dan een tussenweg tussen het determinisme en toeval / willekeur, een culminatiepunt waarin plaats is voor beide. De consequentie is dan wel dat het

determinisme niet volledig ondermijnd is, maar dat dit zich op bepaalde punten eenvoudigweg niet laat gelden.

6. Conclusie en eindbeschouwingen

“Il faut n’appeler science que l’ensemble des recettes qui réussissent toujours. Tout le reste est littérature. »

Paul Valéry

We zijn op het eindpunt aangekomen. We hebben onderweg veel informatie te verwerken gekregen en argumentatie vanuit diverse invalshoeken gezien. Ook werden er tussendoor reeds verscheidene zaken besproken en geconcludeerd. Het zou dus onzinnig zijn deze stuk voor stuk nog eens te herhalen. Ik zal wel de belangrijkste punten van dit werk als geheel hieronder uiteen zetten, echter zonder nog gebruik te maken van de data die we in de loop van deze scriptie tegenkwamen.

Eerst zal ik de conclusies met betrekking tot het project van Prigogine samenvatten. Daarna wil ik aanhalen hoe er tijdens het uitwerken van deze scriptie nog een tweede conclusie kwam bovendien, een met betrekking tot een algemene trend bij het bedrijven van wetenschap of wijsbegeerte.

We maakten kennis met de bijdrage van Ilya Prigogine tot de thermodynamica en zijn studie van niet-lineaire systemen ver uit evenwicht. We besteedden vooral ook aandacht aan Prigogine zijn latere periode, waarbij zijn wetenschappelijke bevindingen gerelateerd werden aan wijsgerige implicaties.³³⁶ In het bijzonder zijn dit de pijl van de tijd en het indeterminisme.

We bekeken enkele (meer conceptuele) kritieken op Prigogine. Deze slagen er an sich niet volledig in om het werk of het belang van Prigogine te ontcrachten. De meerwaarde die ze wel hebben is dat ze de aanzet geven tot een vruchtbaar interactief discours door pijnpunten bloot te leggen die herziening nodig hebben of nood hebben aan conceptuele verheldering. Sommige zaken blijken namelijk té snel als vanzelfsprekend of beargumenteerd beschouwd te worden, ook al zijn ze dat niet, zowel bij Prigogine als bij de secundaire auteurs. Denken we bijvoorbeeld aan de ambiguïteiten waar David Bohm op wees. Het project van Prigogine heeft productieve bijdrages geleverd tot de natuurkunde, maar moet vooral een open theorie blijven waarbij bepaalde zaken zullen

³³⁶ Dit is vooral zo vanaf de jaren '80. Zie ook Appendix.

weerlegd worden en op andere kan voortgebouwd worden. Hiervoor is naast conceptuele kritiek nood aan experimentele resultaten. Degene die we zagen in deze scriptie hadden vooral de maken met de thematiek van de pijl van de tijd.

We namen dus vervolgens de standpunten van Prigogine over onomkeerbaarheid onder de loep en plaatsen deze in een breder kader. Bij een lezing van Prigogine merkt men al snel hoe deze meermaals claimt evidentie voor dé pijl van de tijd gevonden te hebben. Zijn bevindingen situeren zich echter hoofdzakelijk binnen het thermodynamische vakgebied. In een antwoord op bemerkingen van Peter Gunter stelt Prigogine wel (in een eerder zeldzaam opwelling) hoe de pijl van de tijd op dezelfde wijze moet teruggevonden worden binnen de andere wetenschappelijke gebieden (biologie, subtakken van de fysica...). Het is dus allerm minst zo dat Prigogine dé pijl van de tijd heeft blootgelegd, want zoals we zagen is dit een gecompliceerd concept. Wat Prigogine heeft bereikt, is een voorbeeld van onomkeerbaarheid binnen een bepaald facet van de ons omringende realiteit (of correcter: van het onderzoek náár de ons omringende realiteit), waarvan we zelf ook deel uitmaken. Er zijn namelijk verschillende manieren waarop de natuur een onderscheid maakt tussen heden en verleden. Ik wees erop hoe het verband tussen deze verschillende zogenaamde pijlen van de tijd veel moeilijkheden met zich meebrengt, temeer omdat het bestaan van deze diverse pijlen van de tijd vaak niet uitgesproken erkend wordt. En wanneer men deze toch expliciteert, worden ze vaak op een ononderbouwde wijze aan elkaar verbonden. Maar het meest opmerkelijke misschien wel dat we zagen hoe bepaalde auteurs (in het bijzonder Davies en Price) erop wezen hoe er een onderscheid kan gemaakt worden tussen fenomenen in de tijd en eigenschappen van de tijd (en hoe dit een voedingsbodem kan zijn voor de opvatting dat de stroom van de tijd in wezen niet bestaat). De discussie rond de pijl van de tijd heeft dus nood aan een conceptueel verhelderend fundament. Zodoende zagen we ook Prigogine zijn conclusies hieromtrent genuanceerd.

Tenslotte gingen we even dieper in op het determinisme-indeterminisme dilemma. Prigogine meende dat zijn resultaten navenant waren voor deze kwestie. Hij zag het determinisme onthoofd en de hypothese van het indeterminisme – als middenweg tussen het determinisme en het toeval – niet langer ontkenbaar. De conclusies hierbij waren dubbel.

Eenzijds wat betreft het determinisme: chaostheorie hoeft het determinisme helemaal niet gratuit te verbannen. Tevens is het determinisme (althans bepaalde invullingen ervan) compatibel met de pijl van de tijd. Omdat Prigogine door het bestaan van probabiliteiten ook enkele malen refereert naar de (on)mogelijkheid tot voorspelbaarheid, keken we ook even naar de relatie van dit laatste met het determinisme. We merkten dat voorspelbaarheid sowieso om principiële redenen uitgesloten lijkt, maar dat dit geen afbreuk doet aan het statuut van het determinisme.

Anderzijds is er het indeterminisme dat Prigogine ondersteunt. Zoals we zagen is dit een problematisch concept met onduidelijke en vaak contrasterende eigenschappen. Voor Prigogine hield het indeterminisme midden tussen determinisme en toeval. Hoewel de nuance kan betwist worden, besloot ik dat het noodzakelijk lijkt om het indeterminisme als een totaalpakket te zien, waarin beide aspecten afwisselend een rol spelen.

De natuurkunde van Prigogine heeft ongetwijfeld in positieve zin bijgedragen tot het wetenschappelijke wereldbeeld. Zijn wijsgerige conclusies (vooral over het determinisme en in zekere zin ook over de pijl van de tijd) lijken echter vaak haastig getrokken en minimaal onderbouwd te zijn. Ilya Prigogine wijsgerige armoede verwijten zou misschien wat cru en ongenueanceerd zijn, maar zijn filosofie lijkt alleszins nood te hebben aan enige revisie en onderbouw.

Dit brengt me tenslotte tot mijn tweede conclusie, waar ik hoger reeds naar verwees, over de wetenschappelijke en wijsgerige praktijk. Het is eigenlijk een soort meta-conclusie. We zagen deze reeds eerder opduiken in deze scriptie, en ook in het eerste deel van deze slotbeschouwing was het reeds impliciet vervat. Ik resumeer even kort.

Veel wetenschappers en filosofen maken in hun persoonlijk discours gebruik van concepten en begrippen die ze niet (gericht) invullen. Een vermenging van ontologische en epistemologische termen komt ook vaak voor. Dit komt het duidelijkst tot uiting wanneer er aan wetenschappelijke resultaten wijsgerige conclusies worden verbonden. Criteria vinden waaraan iets moet voldoen om ‘wetenschap’ genoemd te worden is reeds een problematische zaak, en wanneer termen binnen dit gebied dan ook nog niet gespecificeerd worden, leidt dit tot meer problemen dan nodig.

Op grond hiervan worden incorrecte gevolgtrekkingen afgeleid, duiken er conceptuele misverstanden op of ontstaan er discussies waarin verschillende personen naast elkaar of naast de kwestie argumenteren.

Ik bedoel hier geenszins mee dat we ervoor moeten zorgen enkel nog gebruik te maken van statische en afgesloten definities. Zo'n afgesloten definitie heeft vaak ook iets doods over zich, verstoken van creatief potentieel naar een verder discours toe. Maar sommige zaken kunnen beter geëxpliciteerd worden, temeer omdat dit vele schijnproblemen uit de wereld zou helpen. En andermaal, bewust zijn van deze problematiek is de eerste stap.

Ik zou hier graag bij wijze van slot van deze scriptie een vergelijking aan toevoegen tussen het bedrijven van wetenschap of filosofie en het fascinerende maar hier niet zo bekende Oost-Aziatische bordspel Go,³³⁷ dat wordt beschouwd als een microkosmos van ons universum. Het bord heeft 19 horizontale en 19 verticale lijnen die elkaar snijden. De spelers mogen om beurt op een snijpunt naar keuze een steentje van hun eigen kleur plaatsen (zwart of wit). Het uiteindelijke doel is met je eigen stenen zoveel mogelijk territorium af te bakenen. Je kan grote gebieden inpalmen, waarin je tegenstrevers als tegenhandeling zelf een kleiner gebied tracht in te palmen. Je kan stenen van de ander omsluiten, die je dan van het bord mag halen. Je sluit in terwijl je tegelijkertijd wordt ingesloten.

Net zoals bij wetenschap en filosofie, zijn de mogelijkheden quasi oneindig, maar legt het kader (of dit universum) wel een zekere begrenzing op. Iedere volgende zet die kan genomen, dient overdacht te worden en mag niet gratis zijn. Zo dient het ook bij wetenschap of filosofie te gaan. We zitten reeds midden in een spel, midden in een discours. We moeten ons bewust zijn van de configuratie die reeds bestaat, we moeten er een grondige kennis van bezitten, omdat een volgende stap, wil die vruchtbaar en zinvol zijn, er moet op inspelen, als in een holistische³³⁸ interactie. En tegelijkertijd is er ruimte om vanuit dat samenspel een deel van de configuratie te wijzen en bepaalde zaken te elimineren. Andermaal, dit zou de schijnproblemen helpen minimaliseren, waarover ik het hierboven had.³³⁹

³³⁷ Go is hoogstwaarschijnlijk 4000 jaar geleden ontstaan in China, waar het gekend is onder de naam Weiqi. Go strijdt met Backgammon om de titel van oudste spel ter wereld dat nog steeds in zijn originele vorm wordt gespeeld.

³³⁸ Ik gebruik deze term hier niet in ontologische zin om iets over het statuut van de realiteit te zeggen.

³³⁹ Voor meer informatie over Go: gobase.org.

Korte (academische) biografie van Ilya Prigogine

Ilya Prigogine werd geboren op 25 januari 1917 in Moskou. Zijn familie verliet Rusland in 1921, uit onvrede met het heersende regime. Na een periode van acht jaar als migranten in Duitsland vestigden ze zich in 1929 definitief in België. Het zou echter nog tot 1949 duren eer Ilya Prigogine de Belgische nationaliteit verwierf.

Prigogine studeerde chemie aan de Université Libre de Bruxelles. Daarna focuste hij zich op de thermodynamica en de aanwezigheid van de tijd in dit domein en behaalde met deze thematiek in 1941 zijn doctoraat. Daarna werkte hij in Brussel met verscheidene fysici, wat uiteindelijk de befaamde Brusselse School werd genoemd. Toch is dit geen strikt afgelijnde beweging, maar eerder een benaming voor het onderzoek dat Prigogine verrichtte of dat rondom hem gecentreerd was. In deze vroege periode werkte hij ook nauw samen met zijn vroegere docent Théophile De Donder.

Van 1946 tot 1967 hield Prigogine zich expliciet bezig met de vraag wat er ver van evenwicht gebeurt bij niet-lineaire systemen. 1967 was een cruciaal jaar: Prigogine kwam met de notie ‘dissipatieve structuur’ naar voren, wat hem in 1977 de Nobelprijs voor Chemie opleverde. In dat zelfde jaar werd hij eveneens aangesteld als hoofd van het Texas Institute of Technology in Austin en richtte hij het Center for Statistical Mechanics op, later herdoopt tot het Ilya Prigogine Center for Studies in Statistical Mechanics and Complex Systems.

In de eerste jaren in Austin onderzocht Prigogine vooral de relatie tussen zijn theorieën en andere vakgebieden. In die periode verscheen een hele hoop artikels waarin hij verbanden legde met de theorema’s van Gödel, de filosofie van Bergson,...

Met de publicatie van ‘La nouvelle alliance’ (1979), dat hij schreef samen met co-auteur Isabelle Stengers, kwam er een zekere popularisering van zijn ideeën. Filosofische implicaties werden bij zijn bevindingen betrokken en het geheel werd gefundeerd op de ‘clash der culturen’ met het determinisme en het toeval, het statische en het evoluerende. Er was zelfs ruimte voor de problematiek van de vrije wil. Voorzichtig werd het Prigoginianisme als oplossing voor deze vraagstukken aangereikt. Deze invalshoek werd doorgetrokken in ‘Entre le temps et l’éternité’ (1988) en ‘La fin des certitudes’ (1996).

In 1989 werd Prigogine door de Belgische koning benoemd tot burggraaf. Hij overleed op 28 mei 2003. In totaal was hij 42 keer doctor honoris causa.

BRONNEN:

EDENS, Bram, *Semigroups and symmetry: an investigation of Prigogine's theories*, 2001, url: <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000436/>

Officiële site van de Nobelprijs: url: http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1977/prigogine-autobio.html

Officiële site van het Center for Complex Quantum Systems (voorheen gekend als het Ilya Prigogine Center for Studies in Statistical Mechanics and Complex Systems): url: <http://order.ph.utexas.edu/Prigogine.htm>

BIBLIOGRAFIE

Gebruikte boeken, artikels, papers

ANDERSON, Philip & STEIN, Daniel. "Broken symmetry, emergent properties, dissipative structures, life: are they related". In: YATES, Eugene (ed.). *Self-organising systems: the emergence of order*. New York, Plenum Press, 1987, pp. 445-457.

ANSCOMBE, Elisabeth. "Causality and determination". In: SOSA, Ernest & TOOLEY, Michael (eds.). *Causation*. New York, Oxford University Press, 1993, pp. 88-104.

BARBOUR, Julian. *The end of time: the next revolution in physics*. New York, Oxford University Press USA, 2000, 384 p.

BERGSON, Henri. *La pensée et le mouvant*. URL: http://classiques.uqac.ca/classiques/bergson_henri/pensee_mouvant/pensee_mouvant.html, s.p.

BISHOP, Robert. *Brussels-Austin nonequilibrium statistical mechanics in the early years: similarity transformations between deterministic and probabilistic descriptions*, url: <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00001155/>, 2003, 22 p.

BISHOP, Robert. *Determinism and indeterminism*. URL: arxiv.org/pdf/physics/0506108, s.p.

BISHOP, Robert. "On separating predictability and determinism". In: *Erkenntnis*. 2003, 2, pp. 169-188

BODIFÉE, Gerard. *Ruimte voor vrijheid*. Kapellen, Uitgeverij Pelkmans, 1988, 236 p.

BOHM, David. "Comments on Ilya Prigogine's program". In: GRIFFIN, David (ed.). *Physics and the ultimate significance of time*. Albany, State university of New York press, 1986, pp. 261-264.

BOUWMEESTER, Dik & PAN, Jian-Wei & DANIELL, Matthew & WEINFURTER, Harald & ZEILINGER, Anton. "Observation of three-photon greenberger-horne-zeilinger entanglement". In: *Physical Review Letters*. 1999, 82, pp. 1345-1349.

BRICMONT, Jean. *Determinism, chaos and quantum mechanics*. URL: <http://www.fyma.ucl.ac.be/files/Turin.pdf>, 30 p.

BRICMONT, Jean. *Science of chaos or chaos in science?* URL: <http://arxiv.org/abs/chao-dyn/9603009>, 1996, 50 p.

BUNIMOVICH, Leonid & SINAI, Yakov G. "The fundamental theorem of the theory of scattering billiards". In: *Math USSR*, 1973, 19, pp. 407-423.

- CAPEK, Milic. "The unreality and indeterminacy of the future in the light of contemporary physics". In: GRIFFIN, David (ed.). *Physics and the ultimate significance of time*. Albany, State university of New York press, 1986, pp. 297-308.
- COHEN, Jack & STEWART, Ian. *Chaos geordend: de ontdekking van eenvoud in complexiteit*. Amsterdam-Antwerpen, Uitgeverij Contact, 1994, 526 p.
- COVENEY, Peter & HIGHFIELD, Roger. *The arrow of time: the quest to solve science's greatest mystery*. Londen, Flamingo, 1990, 378 p.
- CRAMER, John. "Velocity reversal and the arrows of time". In: *Foundations of Physics*. 1988, 12, pp. 1205-1212.
- D'SOUZA, Raissa & MARGOLUS, Norman. *Reversible aggregation in a lattice gas model using coupled diffusion fields*. URL: <http://arxiv.org/abs/cond-mat/9810258v1>, 1998, 13 p.
- DAVIES, Paul. "That mysterious flow". In: *Scientific American*. 2002, 285, pp. 40-47.
- DENNETT, Daniel C. *De evolutie van de vrije wil*. Amsterdam-Antwerpen, Uitgeverij Contact, 2004, 367 p.
- DE SAMBLANX, Gorik. "Chaostheorie: over voorspelbaarheid en determinisme". In: *Kultuurleven*. 1997, 1, pp. 56-63.
- DICKEL, Gerhard. "The variational principles of Onsager and Prigogine in membrane transport". In: *Faraday Discussions of the Chemical Society*. 1984, 77, pp. 157-168.
- EDENS, Bram. *Semigroups and symmetry: an investigation of Prigogin's theories*. URL: <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000436/>, 2001, 162 p.
- GELL-MANN, Murray & HARTLE, James. *Time symmetry and asymmetry in quantum mechanics and quantum cosmology*. URL: arxiv.org/abs/gr-qc/9304023, 2005, 32 p.
- GIBBS, Josiah W. *Elementary principles in statistical mechanics*. New York, Scribner, 1960, s.p.
- GOLDBETER, Albert. *Rhythmes et chaos dans les systèmes biochimiques et cellulaires*. Paris, Masson, 1990, 304 p.
- GUNTER, Peter. "Some questions for Ilya Prigogine". In: GRIFFIN, David (ed.). *Physics and the ultimate significance of time*. Albany, State university of New York press, 1986, pp. 256-257.
- HICKEY, Thomas. *History of the twentieth-century philosophy of science*. URL: <http://www.philsci.com/index.html>
- HOGENBERG, Pierre. "'From Complexity to Perplexity". In: *Scientific American*. 1995, 5, s.p.

HORWICH, Paul. *Asymmetries in time: problems in the philosophy of science*. Londen, MIT Press, 1987, 234 p.

JAMES, William, *The dilemma of determinism*. URL: <http://csunx4.bsc.edu/bmyers/WJ1.htm>, s.p.

JAYNES, Edwin. "Clearing up mysteries – the original goal". In: SKILLING, Jeffrey (ed.). *Maximum-entropy and bayesian methods*. Dordrecht, Kluwer, 1989, pp. 1-27.

KANE, Robert. "Responsability, luck and chance: reflections on free will and indeterminism". In: *The Journal of Philosophy*. 1996, 5, pp. 217-240.

LEMKOW, Anna. *Het heelheid principe. De dynamiek van heelheid in wetenschap, religie en samenleving*. Amsterdam, Theosofische Vereniging in Nederland, 1993, 416 p.

LUYTEN, Anna. "Ilya Prigogine". In: *Knack*. 2007, 28-29, pp. 30-31.

MAVROMATOS, Nick. "Experiment sees arrow of time: at last". In: *Physics World*. 1998, 12, pp. 20-21.

NÄPINEN, Leo & MÜÜRSEPP, Peter. "The concept of chaos in contemporary science: on Jean Bricmont's critique of Ilya Prigogine's ideas". In: *Foundations of Science*. 2002, 4, pp. 465-479.

OFSTAD, Harold. *An inquiry into the freedom of decision*. Oslo, Norwegian University Press, 1961, 391 p.

PETROSKY, Tomio. Obituaries: Ilya Prigogine. In: *SIAM News*, 2003, 7, pp. 10-11.

PRICE, Huw. *Chaos theory and the difference between past and future*. URL: <http://www.usyd.edu.au/time/price/preprints/ISST.html>, 1995, s.p.

PRICE, Huw. *The role of history in microphysics*. URL: <http://www.usyd.edu.au/time/price/preprints/history.html>, 1998, s.p.

PRICE, Huw. *The thermodynamic arrow: puzzles and pseudo-puzzles*. URL: <http://www.usyd.edu.au/time/price/preprints/Price2.pdf>, 2006, 16 p.

PRIGOGINE, Ilya. "De pijl van de tijd bestaat echt". In: *Filosofiemagazine*. 1997, 3, s.p.

PRIGOGINE, Ilya. *Het einde van de zekerheden: tijd, chaos en de natuurwetten*. Tielt, Lannoo, 1996, 176 p.

PRIGOGINE, Ilya. "Le futur n'est pas donné". In: PRIGOGINE, Ilya (ed.). *L'homme devant l'incertain*. Paris, Editions Odile Jacob, 2001, 377, pp. 13-30.

PRIGOGINE, Ilya. "Response to Peter Gunter". In: GRIFFIN, David (ed.). *Physics and the ultimate significance of time*. Albany, State university of New York press, 1986, pp. 258-261.

PRIGOGINE, Ilya. "Time, structures, and fluctuations". In: *Science*. 1978, 4358, pp. 777-785.

PRIGOGINE, Ilya & NICOLIS, Grégoire. *Exploring complexity*. New York, W. H. Freeman and Company, 1989, 313 p.

PRIGOGINE, Ilya & KESTEMONT, Edouard & MARESCHAL, Michel. "Velocity correlations and irreversibility: a molecular dynamics approach". In: MARKUS, M. & MÜLLER, S. C. (eds.). *From chemical to biological organisation*. Heidelberg, Springer-Verlag, 1988, pp. 22-26.

PRIGOGINE, Ilya & STENGERS, Isabelle. *Orde uit chaos: de nieuwe dialoog tussen de mens en de natuur*. Amsterdam, Bakker, 1985, 352 p.

PRIGOGINE, Ilya & STENGERS, Isabelle. *Tussen tijd en eeuwigheid: de nieuwe plaats van de mens in de natuurwetenschap*. Amsterdam, Bakker, 1989, 269 p.

M. REILLY. *A postmodern direction in mathematics*. URL: www.michelereilly.net/paper/postmodern.pdf, 15 p.

RODRIGUEZ, Amardo. *Culture to culturing, re-imagining our understanding of intercultural relations*. URL: <http://www.immi.se/intercultural/nr5/rodriguez.pdf>, 2002, 10 p.

RUELLE, David. *Chance and chaos*. New Jersey, Princeton University Press, 1991, 195 p.

RUSSELL, Bertrand. *Geschiedenis van de westerse filosofie*. Cothen, Servire Uitgevers, 1990, 924 p.

RUSSELL, Robert. "The physics of David Bohm and its relevance to philosophy and theology". In: *Zygon*. 1985, 2, pp. 135-158

SHALIZI, Cosma. *Dissipative structures*. URL: <http://bactra.org/notebooks/dissipative-structures.html>, 1997, s.p.

SHALIZI, Cosma. *Ilya Prigogine*. URL: <http://www.cscs.umich.edu/~crshalizi/notebooks/prigogine.html>, 2006, s.p.

SHANAGAN, Timothy. *The evolutionary indeterminism thesis. (Thinking of biology)*. URL: www.accessmylibrary.com/coms2/summary_0286-22498842_ITM, 2003, s.p.

SINAI, Yakov G. "Dynamical systems with elastic reflections dynamical systems with elastic reflections". In: *Russian Math Surveys* 25. 1970, 2, pp. 137-89.

SMITH, John Maynard. *Games, sex and evolution*. New York-Londen-Tokyo-Sydney-Toronto, Harvester Wheatsheaf, 1988, 264 p.

SOKAL, Alan & BRICMONT, Jean. *Intellectueel bedrog. Postmodernisme, wetenschap en antiwetenschap*. Antwerpen-Breda, EPO De Geus, 1999, 287 p.

SPIRE, Arnaud. *La pensée-Prigogine*. Paris, Desclée de Brouwer, 1999, 206 p.

STENGER, Victor, *The unconscious quantum: metaphysics in modern physics and cosmology*. Amherst, Prometheus Books, 1995, 322 p.

STENGER, Victor. *Timeless reality: symmetry, simplicity and multiple universes*. Amherst, Prometheus Books, 2000, 396 p.

VAN DEN ENDEN, Hugo. *Op het scherp van de rede. Veertig jaar kritisch denken*. Antwerpen-Apeldoorn, Garant, 2003, 246 p.

VAN HAMME, Franky & DUMEZ, Erik. "Het verhaal van Ilya Prigogine". In: *De Financieel-Economische tijd*, 17/05/2003, s.p.

VAN INWAGEN, Peter. *An essay on free will*. New York, Oxford University Press, 1983, 248 p.

WHITE, Douglass. *Phase conjugation Feynman diagrams*. URL: <http://www.dpedtech.com/FD.pdf>, 2005, 14 p.

Persoonlijke correspondentie

SHALIZI, Cosma. cshalizi@stat.cmu.edu. 23/05/2007.

KAUFFMAN, Stuart. skauffman@ucalgary.ca. 22/05/2007.

Aangehaalde films en documentaires

BRESS, Erik & GRUBER, Mackye. *The Butterfly Effect*

SEKULA, Andrzej. *Cube 2: Hypercube*. 2002

TYKWER, Tom. *Lola Rennt*. 1998

VAN VEELLEN, Ysbrand & WARNER, Mark. *Killing Time*. 2000

