

REDUCTIONISME OF HOLISME?

1. Ervaringen Rond een Mierenhoop (± 1947).

Bij de bestudering van fourageerpaden rond een mierenhoop tijdens mijn jeugd werd ik, ondanks het feit dat ik mij op enige afstand van hoop en paden bevond, onverwachts gebeten door een "loslopende" mier. Mijn geërgerde reactie: "stomme mier!". Ik verkeerde kennelijk in de overtuiging dat het insect de weg kwijt was geraakt zonder dat daar een reden voor was. Ik keek met een "reductionistisch" oog naar het mieren-gewriemel. De nu volgende uiteenzetting is een toelichting op deze mysterieuze mededeling.

2. Achtergrond van een Filosofisch Debat.

Aristotelische Natuur-filosofie. Volgens Aristoteles is het doel van alle wetenschap het vergroten van ons inzicht in de *ware aard* der dingen. Biologie stond daarbij voor hem model voor wetenschappelijk onderzoek. Als bijvoorbeeld van een orgaan van een organisme de structuur zowel als het materiaal, waar het uit gemaakt is, gekend zijn kunnen de belangrijkste twee vragen beantwoord worden: *Wat is de functie van het orgaan in kwestie (waartoe dient het) én wie/wat heeft de ontwikkeling (of "beweging") van het orgaan bewerkstelligd.* Door generalisatie leidt deze opvatting tot het organistische beeld van het Universum.- Holisme is in deze context de metafysische- en methodologische opvatting dat uiteindelijk de werking van de onderdelen van een systeem pas vanuit het gehele systeem goed begrepen kunnen worden, omdat het geheel meer is dan de som der delen.

De aantrekkingskracht van dit beeld kan worden verklaard uit:

- (i) de grote mate van bevestiging van dit beeld in onze dagelijkse ervaringen: veel gebeurtenissen en processen lijken plaats te vinden met een *doel*, zoals wijzelf met wat wij doen *bedoelingen* hebben;
- (ij) het esthetische-/metafysische verlangen naar het "deel zijn van dat immense en wonderschoon harmonische zinvolle geheel, te weten het Universum". Vgl. de liefdes-verklaring van Lorenzo aan Shylock's dochter Jessica in Shakespeare's "Koopman van Venetië" (5e bedrijf, 1e tafereel).

Klassieke Natuurfilosofie. Vanaf het begin van de 17e eeuw wordt de Mechanica de "voorbeeld-wetenschap". Wetenschap wordt naast het zoeken naar een adequaat beeld van de fysische realiteit in toenemende mate een speurtocht naar mogelijkheden om technisch-mechanische artefacten te ontwerpen. De bestudering van een fysisch systeem *S* wordt vanaf dat moment vooral geleid door vragen zoals: *Hoe werkt S en hoe is dat te verklaren uit de wijze waarop S in elkaar zit, d.i. uit de werking van de onderdelen van S?*

elkaar zit, d.i. uit de werking van de onderdelen van S?

Anders gezegd: Bij de bestudering van een systeem komt de nadruk te liggen op de interne wisselwerkingen tussen de componenten van een systeem. De klok is hiervan een typisch en veel gebruikt voorbeeld.

Ook deze opvatting wordt naar analogie met de klok gegeneraliseerd tot een algemeen beeld van het Universum, nl. de voorstelling van het heelal als een mechanistisch systeem.- In dit verband kan het opkomende reductionisme gekarakteriseerd worden als *het deduceren van de eigenschappen van een systeem uit het gedrag resp. uit de werking van de samenstellende delen*. Daarmede verbonden is het metafysische geloof dat deze methodologie gerechtvaardigd wordt door de wijze waarop de realiteit in werkelijkheid is opgebouwd.

Ook dit beeld van Natuurwetenschap is aantrekkelijk:

(i) De "nieuwe" fysica leidt tot spectaculaire toepassingen en technologische successen.

(ij) Een logisch perfecte God (Leibniz) en een "wetenschappelijke" verklaring van God's voorzienigheid m.b.v. de "demon" van Laplace maken rationeel begrijpelijk hoe Hij met zijn onbeperkte verstand al het toekomstige gedrag van het universum m.b.v. de wetten van Newton ab initio tot in alle details heeft kunnen begrijpen en derhalve deze "beste van alle mogelijke werelden" heeft kunnen scheppen (1).

Nochtans blijft het Aristotelische beeld voor velen zijn aantrekkelijkheid behouden. De nieuwe mathematische en experimentele methoden leiden in het licht van onze alledaagse ervaringen tot contraintuïve beginselen (vgl. Newton's 1e hoofdwet over eenparige beweging). En het beeld van een Universum dat ontluisterd is door de eliminatie van alle teleologische waarden heeft weinig aantrekkelijks voor wie in dat Heelal zin en schoonheid hoopt te vinden. De strijd tussen Aristotelici en bewonderaars van de nieuwe Natuurwetenschap zal dan ook over een langere periode voortwoeden. Ook de pogingen in de 16e en 17e eeuw om een occulte Natuurwetenschap te ontwikkelen (een combinatie van neo-Platonisme en antieke Alchemie) moet tegen de achtergrond van verzet tegen de "schrane" natuuropvatting van de nieuwe fysica worden gezien.

Tijdens de Verlichting citeren de tegenstanders van de "achterlijke" Aristotelici veelvuldig de Romeinse filosoof Lucretius. Hij immers moedigde mensen aan zich alleen door kennis van de aard der dingen te laten leiden en niet door datgene wat zij graag zouden willen geloven; volgens hem vereist dit bovendien dat wij moeten trachten de herkomst van de diepe verankering van mythologisch geloof in ons denken te doorgronden (2)!

3. Biologen contra Fysici.

Een Speciaal Levensbeginsel? Wij maken een sprong naar het begin van de vorige eeuw, waarin zowel biologie als fysica zelfstandige, niet-filosofische wetenschappen zijn. De bioloog Paul Gros verhaalt hoe hij in de 50er jaren biologie studeerde aan een amerikaansche universiteit. Reeds op de "undergraduate-school" wenste hij college's te volgen in (bio-)chemie en fysica. De hoogleraren van de biologische faculteit raadde hem dat sterk af: Chemici bedienen zich immers primair van analytische methoden; doch zodra het levende protoplasma aan zulke methoden wordt onderworpen verliest het juist *die* eigenschappen, die het levend doen zijn (3).

Gros' anecdote is een wat late echo van een wetenschappelijk(!) debat dat aan het begin van de vorige eeuw werd gevoerd over het mogelijk principiële verschil tussen biologie en fysica. Een aantal biologen meenden dat voor levende systemen geldt: Het gedrag van het geheel is *niet* deduceerbaar uit de eigenschappen van de componenten. Zo meende Hans Driesch, dat voor zulke systemen een afzonderlijk krachtbeginsel (de zgn. entelechie) moet worden geïntroduceerd. Daarmee is dan te verklaren hoe de werking van de diverse fysisch-chemische krachten worden geïntegreerd om de ontwikkeling van een organisme tot stand te brengen cf. een soort-specifieke blauwdruk. Deze zgn. "vitalistische hypothese" heeft een manifest *holistisch karakter*: de entelechie-kracht opereert als sturende en doelgerichte kracht op het niveau van het hele organisme. Ook is hier nog steeds sprake van een "metafysische geur": De holistisch opererende kracht *bestaat* op een of andere manier in de werkelijkheid (4).

De bezwaren die vanuit een meer reductionistische opvatting werden geformuleerd liggen voor de hand: Entelechie is een non-verklaarder zolang niet kan worden gespecificeerd waar resp. hoe de blauwdruk is opgeslagen en hoe deze mysterieuze kracht nu eigenlijk werkt. Bovendien levert biochemisch en moleculair-genetisch onderzoek in de loop van de 20e eeuw steeds meer evidentie voor de reductionistische verwachting dat Darwin's evolutietheorie verklaard kan worden uit de moleculaire structuren van het erfelijke materiaal.

Toch zijn deze reductie's niet zonder problemen: (i) Het geven van een exacte definitie van 'reductie' is bijzonder lastig (5).

(ij) De rol van het kansbegrip is dubieus. Het Neo-Darwinisme claimt immers dat het "mechanisme" van de evolutie bestaat uit random mutatie + adaptatie m.b.v selectie. Het is niet goed in te zien hoe de extreme en tóch ordelijke complexiteit van de biologische soorten kan zijn voortgebracht door "een serie toevallige ongelukjes" (4).

Tenslotte is er de puzzle van Monod (6) over een mogelijke volledige

reductie. Hoe is coherent verenigbaar dat

- enerzijds individuele moleculen reageren onder invloed van lokaal opererende krachten cf. fysisch-chemische wetten;
- anderzijds die moleculen in genen-circuits samenwerken op een schaal die de moleculaire schaal extreem ver overtreft? Deze huiver voor een "action on distance" werd al door Newton uitgesproken!

4. Holisme in Hedendaagse Fysica en Biologie.

In 1970 waren in de natuurkunde reeds geruime tijd verschijnselen bekend die dezelfde vraag opriepen. Te denken valt aan verschijnselen zoals de draaikolk of het optreden van een bepaald type convectie-cellen, de zgn. Bénard-cellen. Kenmerkend voor dit type verschijnselen is: "The interaction of components on one scale can lead to complex behaviour on a much larger scale that in general *can not be deduced* from knowledge of *the individual components*" (7). Hier is sprake van de emergentie van wetmatigheden die betrekking hebben op de orde-structuren die in fysische systemen kunnen optreden op macro-niveau. Voor verschijnselen van dit type is de term 'zelf-organisatie' ingevoerd: Het systeem genereert op macro-niveau ordelijke patronen (zgn. dissipatieve structuren), die onder normale evenwichts-toestanden hoogst onwaarschijnlijk zijn. Het gaat hierbij steeds om ver-uit-evenwicht-gedreven systemen, die bij de doorvoer van energie of materie een dergelijke dissipatieve structuur voortbrengen.

Holisme betekent nu: Het ontstaan en handhaven van zulke structuren is i.h.a. *niet te verklaren* uit het micro-gedrag van de moleculen van het systeem.

Een gedurfde hypothese: Stuart Kauffman heeft de veronderstelling geopperd dat de evolutie van levende systemen ook gezien zou kunnen worden als een dynamisch proces, waarbij naast random mutatie en selectie ook het mechanisme van zo'n zelforganisatie een rol speelt. Een aantal puzzle's die het Neo-Darwinisme aankleven (zie boven) zou hiermede wellicht verklaard kunnen worden (8). Levende systemen zijn daarbij te beschouwen als dissipatieve structuren die zich op de grens van 'chaos' en rigide orde handhaven (9). Met name zou die hypothese het ontstaan moeten verklaren van systemen, die in hoge mate stabiel zijn t.a.v. interne- zowel als externe storingen, nochtans over een zekere mate van adaptieve flexibiliteit beschikken. Een passende combinatie van die twee tegengestelde eisen (stabiliteit en flexibiliteit) is immers karakteristiek voor biologische systemen. Juist de fysische toestanden die karakteristiek zijn voor het optreden van dissipatieve structuren zouden dan het subtiele "compromis" van die beide eisen kunnen verklaren.

Dit alles betekent overigens, dat het verschil tussen fysica en biologie alleen nog wordt gezien als de relatief grotere complexiteit van biologische systemen.

Modern Holisme: Het is van belang om zich af te vragen hoe deze holistische aanname zich verhoudt tot de eerder beschouwde vorm van holisme (vgl. het Vitalisme). Dat holisme impliceert een metafysisch dualisme: Er bestaan twee *wezenlijk verschillende* soorten realiteit, nl. die van de levenloze en die van de levende materie. Als er in het *hedendaagse holisme* sprake is van dualisme, dan heeft dat uitsluitend methodologisch-descriptief karakter. Dit dualisme is te vergelijken met het onderscheid tussen software- en hardware beschrijvingen van een rekenautomaat: Eén en hetzelfde systeem is vanuit twee verschillende perspectieven te beschrijven. Daarmee zijn alle metafysische ambitie's van het klassieke holisme geëlimineerd; wat over blijft zijn methodologische suggestie's, die betrekking hebben op de wijze waarop gezocht kan worden naar *die* wetmatigheden, die typisch *emergeert op het macro-niveau*. M.a.w.: De wetten die op macro-niveau de conditie's beschrijven waaronder zelforganisatie kan optreden hebben onmiskenbaar een holistisch karakter doch impliceren geenszins metafysische opvattingen.

Het zoeken naar zulke wetten vindt plaats met een combinatie van methoden, ontleend aan wiskunde, algoritme-theorie, complexiteits-theorie, fysica en chemie. Ook computersimulatie's spelen hierbij een grote rol; er is daarom bij het modelleren sprake van een fascinerende vorm van "experimentele" wiskunde!

De computer-simulatie's hebben betrekking op de dynamica van de evolutie van complexe systemen. De dynamica van processen waarbij zelf-organisatie optreedt worden daarbij gemodelleerd als *opeenvolgingen van informatie-toestanden*. Een informatie-toestand wordt in een computertaal weergegeven door een eindige rij van 0'en en 1'en. Iedere opeenvolging van 2 toestanden in een evolutie kan derhalve worden gerepresenteerd als een operatie waarbij in de reeks 0en en 1en die met de eerste informatie-toestand correspondeert een aantal nullen worden gewijzigd in enen vice versa volgens een vooraf vastgelegd programma. Dit programma moeten wij ons daarbij voorstellen als een aantal regels die op de 0,1-reeksen opereren; in algoritme-theorie spreken wij in dit geval van het modelleren van een proces m.b.v. zogenaamde "cellulaire automaten" .

In de volgende paragraaf wordt deze methode van computer-simulatie kort geschetst. Lezing van die wat meer technische paragraaf kan overigens worden overgeslagen.

5. Een Voorbeeld.

De Oorsprong van het Leven. Kauffman (zie noot 8) stelt dat het hierbij meestal draait om de vraag hoe de chemische conditie's voor een spontane evolutie van leven op aarde op een natuurlijke wijze tot stand zijn gekomen.

Eén van de kenmerken van een levend systeem is het vermogen om de eigen reproductie door autokatalytische chemische reactie's (d.z. reactie's die m.b.v. katalyse tot stand komen dankzij de aanwezigheid van moleculen die door *hetzelfde* reactie-systeem worden geproduceerd) te bewerkstelligen.

Kauffman veronderstelt dat dit kenmerk van "katalytische geslotenheid" van groot belang is voor inzicht in het ontstaan van leven. Zijn idee is ingegeven door een curieuze stelling uit de grafentheorie (Erdos en Renyi [1959]). Een graaf is een systeem bestaande uit knopen en verbindingen tussen die knopen (vgl. een boom: de vertakkingspunten en de eindpunten van takken zijn knopen; de takken vormen de verbindingen). Beschouw nu een uit N knopen bestaande graaf, die door het leggen van knoop-verbindingen aldus wordt voortgebracht: Kies *random* (!) 2 knopen en verbindt hen met een "tak"; kies vervolgens weer *random* 2 knopen en verbindt hen; herhaal deze procedure. Indien geldt dat

$$\text{de ratio 'aantal verbindingen:N'} \geq 0.5$$

dan ontstaat een "fase-overgang": *Plotseling* zijn de meeste knopen onderling verbonden tot één groot web. Er ontstaat wat Kauffman een "giant cluster" noemt.

Het plotselinge karakter van de overgang is een typisch contra-intuïtief resultaat; computer-simulatie's laten zien, dat deze fase-overgang bij een toename van N steeds meer "discontinu" plaats vindt. Kauffman suggereert een analogie met het ontstaan van leven: Wanneer voor een chemisch reactie-systeem het aantal gekatalyseerde reactie's groot genoeg is zal *plotseling* een uitgebreid web van zulke reactie's "uitkristalliseren". Onder enkele toegevoegde vooronderstellingen is zo'n web bijna zeker "auto-catalytisch", en dus zichzelf in stand houdend op analoge wijze als een "levend systeem".

De Computer-simulatie: Een computer-simulatie van dit proces zal een mogelijke evolutie van een collectie polymeren uit 2 monomeren modelleren door de monomeren als 0 resp. 1 te representeren; een polymeer is dan een rij bestaande uit nullen en enen. Met de simulatie wordt onderzocht hoe een *metabolische reactie-graaf* (d.i. een graaf die voortdurend wordt "gevoed" met nieuwe "voedselmoleculen" 0 en 1) zich gedraagt. Nieuwe knopen zijn "verbindingen" zoals 00, 01, 101, 110, etc.; sommige van die nieuwe "moleculen" zullen de in de graaf bestaande "reactie's" zoals bv.

$$010 + 10 \longrightarrow 01010$$

katalyseren. Aangenomen wordt dat er steeds langere "moleculen" ontstaan door de toenemende kans dat reeds ontstane "moleculen" nieuwe reactie's katalyseren. Zij nu een *autokatalytisch systeem* die subgraaf van een metabolische reactie-graaf, waarin alle katalysatoren voorkomen welke voor de instandhouding van de subgraaf nodig zijn. Kauffman verdedigt de volgende these:

Computer-simulatie's van het spontane ontstaan van een auto-katalytisch metabolisme-systeem uit een mengsel van chemicaliën tonen aan, dat de emergentie van zulke autokatalytische systemen bijna onvermijdelijk is!

Dit is aldus in te zien. In de computer-simulatie worden langzaam reeksen uit reeds beschikbare rijen van 0en en 1en gevormd; sommige ontstane rijen zullen reeds bestaande "reactie's" katalyseren, die dus sneller verlopen volgens een vooraf gespecificeerde regel over de snelheidstoename. Dat katalyseren kunnen wij ons alstvolgt voorstellen. Laat onze uit de monomeren 0 en 1 bestaande polymeren werken als RNA-reeksen (waarbij 0 en 1 als twee complementaire basen opereren); dan kan het molecuul-type 111111 werken als een ribozyme om de twee substraten 101000 en 00011010 te binden tot het molecuul 10111111111010.

Met de toename van complexiteit (langere "moleculen") en diversiteit (ongelijke 0,1-rijen) neemt de ratio

aantal reactie's : aantal verschillende type's moleculen
in de reactie-graaf toe. Vgl. bijvoorbeeld de verschillende manieren waarop in ons voorbeeld de polymeer 11011 kan ontstaan (bv. uit $1 + 10 + 11$ resp. $11 + 0 + 11$ etc. alsmede door het verbreken van bindighen). Wanneer de collectie van "moleculen" een kritische diversiteit heeft bereikt kan mede op basis van een nader te bepalen aanname over de kans, dat een "nieuw" molecuul op kan treden als katalysator voor een reeds in het systeem voorkomende reactie, worden verwacht dat *plotseling* een gigantische katalytische subgraaf uitkristalliseert cf. het eerder geschetste wiskundige resultaat. Deze "gigantische component" simuleert een metabolisch systeem dat in staat is om zichzelf samen te stellen en te handhaven op basis van een passende toevoer van voedselmoleculen.-

Deze computer-simulatie's zijn uitgevoerd onder verschillende aanname's over de genoemde details en bevestigen de these van Kauffman betreffende het *mogelijk* spontane ontstaan van leven door een soort zelforganisatie.

P.M.: Met computer-simulatie's worden overigens slechts mogelijkheids- of onmogelijkheids-resultaten verkregen. Nochtans is deze gedeeltelijk "experimentele wiskunde" een krachtig hulpmiddel bij het beoordelen van veronderstellingen van hypothesen over het ontstaan en de handhaving van complexe systemen!

6. Van Convectie-cel naar Mierenhoop.

Aandacht voor verschijnselen zoals convectie-cellen en draaikolken hebben ons geleerd om naast het onderzoeken van individuele eenheden (bv. moleculen) ook naar globale structuren te kijken die door zelf-organisatie zijn ontstaan. En dat had ik dus ook na de onaangename ervaring bij de mierenhoop moeten doen (10). De *globale structuur* van het systeem bestaande uit mierenest + omgeving (d.i. de hoop + alle geordende fourageerpaden + de distributie van een grote minderheid van schijnbaar random loslopende mieren + de distributie van voedselbronnen) had object van mijn onderzoek moeten zijn! Mijn verbazing over de "domheid" van de mier houdt namelijk verband met de eerder genoemde Monod-puzzle. Ik nam aan dat individuele insecten zich strikt gedragen volgens een genetisch programma, dat o.a. het recruterings-gedrag dat voor het fourageren is ontwikkeld, geheel vastlegt. Zij werken echter kennelijk samen op een oppervlakte-schaal, die naast een grote mate van coherentie van de fourageer-paden zijn ook de schijnbaar curieuze random afwijkingen toont. Hoe is het "domme gedrag" van die afwijkingen te verklaren? Ook in dit geval leiden computer-simulatie's tot interessante verklaringen van dit complexe gedrag waarin kennelijk wederom zelf-organisatie een rol speelt. In het mathematische model waarmee de afhankelijkheid van de mierenhoop mbt de omgeving wordt onderzocht, worden verschillende aanname's getest over beschikbare voedselbronnen in de omgeving en hun duurzaamheid. Een exploitatie-gedrag, waarbij alle beschikbare mieren worden ingezet om na ontdekking allereerst de rijkste voedselbron te exploiteren kan een catastrofe voor de gemeenschap betekenen als die bron (bv. een omvangrijke bladluizen-kolonie) door een externe oorzaak plotseling geheel wegvalt; de tijd, nodig voor het ontdekken en exploiteren van een nieuwe bron zou het einde van de gemeenschap kunnen betekenen. De simulatie's tonen aan dat het optimaal exploiteren van een *variabele* omgeving een zekere randomness in het recruteergedrag voor het fourageren vereist. Juist daardoor is een vruchtbaar compromis mogelijk tussen duurzame exploitatie van een stabiele voedselbron en het incidenteel snel kunnen ontwikkelen van nieuwe fourageerstructuren voor de exploitatie van incidenteel gunstige bronnen. De *randomness* in de distributie van een bepaald percentage van de voor fourageren beschikbare mieren is volgens het mathematische model en de erop gebaseerde computer-simulatie's *kennelijk adaptief belangrijk* voor duurzame overleving van de populatie. Overigens blijken de theoretische verwachtingen in overeenstemming met waarnemingen van het percentage schijnbaar random rondzwervende individuele mieren bij een gegeven distributie van stabiele en

incidentele bronnen. Ik had mijn oorspronkelijke reductionistische kijk op de mierenhoop dus met holistische beschouwingen moeten aanvullen!

7. Tenslotte.

Het Natuurwetenschappelijke Gezelschap Wageningen is één der jongste spruiten van de Verlichting, die gekenmerkt werd door een intens geloof in de betekenis van het eerder genoemde dictum van Lucretius. Het is de ambitie van onderzoekers zoals Manfred Eigen, Stuart Kauffman e.a. om ook geheel cf. de Verlichtingsfilosofen de ontwikkelingen van sociale organisatie's met gebruik van natuurwetenschappelijke methode's in de meest ruime betekenis van de term beter te begrijpen. Dat wetenschappelijke en sociaal emanciperende zoeken heb ik ook teruggevonden in de monografie over de geschiedenis van uw Gezelschap. Moge derhalve Uw Gezelschap in de komende 125 jaar in dat streven volharden.

NOTEN.

- (1) Meer details betreffende deze belangwekkende periode uit onze intellectuele geschiedenis zijn te vinden in de klassieke studie van E.J. Dijksterhuis [1950]: "De Mechanisering van het Wereldbeeld".
- (2) Peter Gay [1966]: "The Enlightenment". De in de tekst onder (ij) genoemde "demon" van Laplace is gebaseerd op diens deterministische beginsel : Indien op een willekeurig tijdstip t een volledige beschrijving gegeven zou zijn van de mechanische toestand van het heelal (en voor God is dat b.v. het geval op het moment dat Hij de wereld scheidt), dan kan in beginsel voor ieder later tijdstip t^* de exacte toestand van het universum gededuceerd worden m.b.v. de wetten van Newton! Voor een perfect Verstand is dat een peulenschil.
- (3) Paul Gros [1998]: "The Icarian Impulse" in de "Wilson Quaterly".
- (4) Paul Davies [1989]: "The Cosmic Blueprint".
- (5) Ernst Nagel [1961]: "The Structure of Science"; in die klassieke beschrijving uit de midden van de vorige eeuw van de zgn. "standaard-opvatting" over wetenschap (een theorie is een klasse van beweringen die aan bepaalde eigenschappen voldoen) analyseert hij de aard van een reductionistische verklaring. Philip Kitcher argumenteert evenwel tegen een te gemakkelijk gebruik van het begrip 'deductie' zoals dat wordt gebruikt in de these dat de klassieke genetica kan worden gereduceerd tot (d.i. worden *gededuceerd* uit) de moleculaire genetica. Nagel's karakterisering van 'de inhoud van een wetenschappelijke theorie' (bv. de klassieke genetica) als 'een klasse van beweringen' doet volgens hem nauwelijks recht aan de complexiteit van dat inhoudsbegrip. Vgl. P. Kitcher: "1953 and All That: A Tale of Two Sciences" in The Philosophical Review [1984].

Kritiek zoals o.m. de zijne op de standaard-opvatting is tegenwoordig onder wetenschapsfilosofen algemeen aanvaard.

(6) Jacques Monod [1970]: "Le hasard et la nécessité".

(7) Crutchfield, Shaw e.a. [1986] in de Scientific American, geciteerd in Davies [1989]; mijn cursivering.

(8) S. Kauffman [1993]: "The Origins of Order"; een meer toegankelijke uiteenzetting is te vinden in "Our Place in the Universe" [1995] van dezelfde schrijver. De in §5 gegeven korte schets is aan die monografie ontleend; een wiskundig geïnteresseerde lezer raad ik aan om [1993] te raadplegen; pas dan krijgt men inzicht in de fascinerende aspecten van de door hem en anderen gebruikte "experimentele "wiskunde"!

(9) Hier wordt het exact definiëerbare begrip 'chaos' bedoeld!

(10) Het hier aangeduide onderzoek is te vinden in G. Nicolis [1989]: "Physics of Far-from-equilibrium systems and Selforganization" in P.Davies (ed.) "The New Physics". Nicolis werkte samen met Prigogine. De in deze tekst gegeven beschrijving van mijn herinneringen is mede ingegeven door zijn artikel.