

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE FILOSOFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA

Joseph Motema Mampia

A filosofia da natureza de Ilya Prigogine

Versão corrigida

São Paulo
2023

Joseph Motema Mampia

A filosofia da natureza de Ilya Prigogine

Versão corrigida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia do Departamento de Filosofia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Filosofia sob a orientação do Prof. Dr. Osvaldo Frota Pessoa Jr.

São Paulo
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

Mf Mampia, Joseph Motema
A filosofia da natureza de Ilya Prigogine / Joseph Motema Mampia; orientador Osvaldo Frota Pessoa Junior - São Paulo, 2023.
84 f.

Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Filosofia. Área de concentração: Filosofia.

1. Ilya Prigogine. 2. determinismo. 3. irreversibilidade. 4. tempo. I. Pessoa Junior, Osvaldo Frota, orient. II. Título.

ENTREGA DO EXEMPLAR CORRIGIDO DA DISSERTAÇÃO/TESE

Termo de Anuência do (a) orientador (a)

Nome do (a) aluno (a): Joseph Motema Mampia

Data da defesa: 29 / 08 / 2023

Nome do Prof. (a) orientador (a): Oswaldo Frota Pessoa Junior

Nos termos da legislação vigente, declaro **ESTAR CIENTE** do conteúdo deste **EXEMPLAR CORRIGIDO** elaborado em atenção às sugestões dos membros da comissão Julgadora na sessão de defesa do trabalho, manifestando-me **plenamente favorável** ao seu encaminhamento ao Sistema Janus e publicação no **Portal Digital de Teses da USP**.

São Paulo, 13 / 11 / 2023



(Assinatura do (a) orientador (a))

Resumo

O presente trabalho examina a contribuição de Ilya Prigogine para alguns domínios das ciências físicas e para a filosofia da ciência. As ideias de Prigogine partem de uma insatisfação intelectual quanto à visão do universo proposta pela física clássica, envolvendo determinismo, reversibilidade e atemporalidade. Nos seus estudos sobre os fenômenos irreversíveis na química e na física de não equilíbrio, Prigogine chegou à conclusão de que o universo é em grande parte indeterminista, possuindo uma irreversibilidade intrínseca a nível microscópico, e que essa instabilidade desempenha um papel construtivo. Reconhecendo que a vida mantém-se em condições longe do equilíbrio, aplica sua concepção filosófica para explicar a vida, a novidade e a evolução, considerando que a desordem pode ser fonte de ordem. Aplica sua noção não-reducionista de irreversibilidade para entender a seta do tempo. Examinando as críticas feitas a Prigogine, conclui-se que a visão tradicional, baseada no trabalho de Ludwig Boltzmann, e a concepção de Prigogine constituem *interpretações diferentes* a respeito da Mecânica Estatística, do problema da irreversibilidade e da questão da flecha do tempo. O debate não é a respeito dos fenômenos observáveis, mas sobre qual é a melhor maneira de explicar os fenômenos observáveis. Boltzmann adota uma perspectiva realista em relação ao mundo microscópico, ao passo que Prigogine adota uma postura antirrealista, apesar de defender um pluralismo ontológico em seus escritos filosóficos.

Palavras-chave: Ilya Prigogine, determinismo, irreversibilidade, tempo, sistemas dinâmicos de não equilíbrio.

Abstract

The present work examines Ilya Prigogine's contribution to science and to the philosophy of science. Prigogine's ideas stem from an intellectual dissatisfaction with the view of the universe proposed by classical science, involving determinism, reversibility and timelessness. In his studies of irreversible phenomena in non-equilibrium chemistry and physics, Prigogine came to the conclusion that the universe is largely indeterministic, possessing an intrinsic irreversibility at the microscopic level, and that this instability plays a constructive role. Recognizing that life is maintained in conditions far from equilibrium, he applies his philosophical conception to explain life, novelty and evolution, considering that disorder can be a source of order. He applies his non-reductionist notion of irreversibility to understand time's arrow. Examining the criticisms made to Prigogine, one concludes that the traditional view, based on the work of Ludwig Boltzmann, and Prigogine's conception constitute different interpretations regarding Statistical Mechanics, the problem of irreversibility and the question of the arrow of time. The debate is not about observable phenomena, but about what is the best way to explain observable phenomena. Boltzmann adopts a realist perspective in relation to the microscopic world, while Prigogine adopts an anti-realist posture, despite defending an ontological pluralism in his philosophical writings.

Key words: Ilya Prigogine, determinism, irreversibility, time.

Sumário

Introdução	7
Cap. 1: Vida e Obra de Ilya Prigogine	10
1. Origens Familiais	10
2. Início da Carreira	11
3. O Problema da Irreversibilidade	14
4. Termodinâmica de Não-Equilíbrio e Estruturas Dissipativas	17
5. Pesquisas após 1982	18
Cap. 2: Alguns Debates em Filosofia da Física	21
1. A Filosofia do Tempo	21
2. Termodinâmica e Conservação de Energia	24
3. Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica	27
4. Reversibilidade e Irreversibilidade	28
5. Teorema-H: Prova Mecânica da Irreversibilidade	31
6. Teoria Probabilista da Entropia	34
Cap. 3: As Ideias Científicas de Prigogine	36
1. Instabilidade e Caos Determinista	36
2. Estruturas Dissipativas e Não-Equilíbrio	41
3. Produção de Entropia em Sistemas Longe do Equilíbrio	43
Cap. 4: A Visão Filosófica de Prigogine	46
1. Início da Reflexão Filosófica	46
2. Física Clássica: uma herança insatisfatória	47
3. O Dilema do Determinismo	49
4. O Paradoxo do Tempo	52
Cap. 5: Discussão Crítica das Ideias de Prigogine	56
1. O Discurso de Prigogine	56
2. A Crítica de Marcel Novaes	57
3. A Crítica de Jean Bricmont	64
4. Discussão de Questões Técnicas	71
5. Recepção na Filosofia da Ciência	74
Conclusão	78
Referências bibliográficas	81

Introdução

O presente trabalho é um estudo das ideias filosóficas do químico e físico belga Ilya Prigogine. No geral, Prigogine entende a atividade científica como o diálogo experimental entre o homem e a natureza, no qual o homem questiona a natureza e dela obtém resposta, no intuito de descobrir o “ser” ou a inteligibilidade da natureza. As respostas obtidas da natureza constituem as hipóteses científicas. Elas não correspondem necessariamente à totalidade da verdade do ser, pois estão limitadas no tempo e no espaço pelas condições de observação e do próprio homem.

Convém sublinhar que a atividade científica anda de par com a filosófica, de tal maneira que os problemas da ciência e do mundo se tornam também fonte das interrogações filosóficas. Portanto, dos “como” da ciência, surgem também os “por quês” filosóficos. É nesta perspectiva que se deve entender a contribuição de Prigogine.

No centro do trabalho de Prigogine está a preocupação com duas questões: o problema do determinismo das leis da física e a questão do tempo. O universo é determinista? As leis da física são reversíveis no tempo? O tempo é uma realidade ou ilusão? A irreversibilidade é uma aparência?

A concepção da natureza defendida pela Mecânica Clássica é ligada ao determinismo, reversibilidade, a um mundo simétrico no tempo. As leis da natureza que expressam esse mundo são consideradas deterministas, o que sugere uma associação com a certeza. A natureza é assemelhada a um autômato, manipulável e controlável pelo ser humano. É a essa concepção que Prigogine pretendeu reagir, atacando os limites impostos por uma concepção determinista e reversível do universo.

Partindo da Termodinâmica de processos fora do equilíbrio, ele defende que uma grande transformação conceitual ocorreu na física moderna, para além da Teoria da Relatividade e da Física Quântica. Ele confere um papel diferente à irreversibilidade, um papel “constutivo”, e com ela procura formular uma concepção do tempo como “vir-a-ser”, em que se encaixem a novidade e a evolução. Com isso, Prigogine e sua colega filósofa Isabelle Stengers (1991, p. 1) procuram situar o ser humano no mundo que ele mesmo descreve, levando a uma “abertura” desse mundo.

Para maior clareza na exposição das ideias, esta dissertação será estruturada em quatro capítulos. Primeiro, trataremos da biografia de Prigogine, trazendo dados familiares, e seu percurso acadêmico como estudante, pesquisador e professor. Como pesquisador, tentaremos apresentar a gênese e a evolução cronológica das suas pesquisas.

No segundo capítulo, faremos um resumo de alguns debates em Filosofia da Física, que servirão de pano de fundo para as questões retomadas por Prigogine. Isso incluirá os princípios da termodinâmica, as pesquisas de Boltzmann, principalmente o teorema-H e a definição probabilista de entropia, a questão da irreversibilidade, entropia e a filosofia do tempo.

No terceiro capítulo, apresentam-se algumas ideias científicas de Prigogine, como as noções de instabilidade, estrutura dissipativa e produção de entropia. Em seguida, no quarto capítulo, faz-se um resumo de sua visão filosófica.

No quinto capítulo, apresentam-se avaliações críticas contra as posições de Prigogine, feitas por físicos e por filósofos. Na conclusão, argumenta-se que as visões boltzmannianas de Novaes e Bricmont, por um lado, e a de Prigogine, por outro, constituem *interpretações diferentes* a respeito da Mecânica Estatística, do problema da irreversibilidade e da questão da flecha do tempo. Trata-se de uma controvérsia científica

sobre qual a melhor maneira de explicar os fenômenos observáveis. Boltzmann adota uma perspectiva realista, considerando que os átomos possuem trajetórias e energias bem definidas, ao passo que Prigogine abandona a perspectiva realista de atribuir trajetórias bem definidas a partículas, adotando a tese de que a descrição probabilista dos ensembles é irreduzível, apesar de defender um pluralismo ontológico em seus escritos filosóficos.

Capítulo 1:

Vida e Obra de Ilya Prigogine

Em sua carreira científica, Ilya Prigogine (1917-2003) teve uma ascensão rápida e fulgurante. Jovem imigrante russo, chegado na Bélgica aos doze anos de idade, iria terminar a sua vida na idade de oitenta e sete anos, cheio de todas as honras que um intelectual poderia sonhar. O Prêmio Nobel de Química lhe abriu as portas e ele soube utilizar essas possibilidades para promover sua defesa de uma nova visão da ciência. Este sucesso foi devido em primeiro lugar à importância dos seus trabalhos em química teórica, mas também à extensão de suas ideias para as ciências biológicas e humanas, à sua vontade de diálogo, e à sua qualidade de chefe de muitas equipes internacionais de pesquisadores e de professores (BALESCU, 2007, p. 1).

Neste capítulo, apresentaremos a trajetória biográfica de Prigogine, considerando suas origens, família e inserção no mundo acadêmico, partindo da sua vida de estudante, a carreira como professor, as influências recebidas no desenvolvimento científico, seus trabalhos e colaboradores de pesquisa. A principal fonte de nossa pesquisa são as notas autobiográficas do próprio Prigogine e os escritos de seus colaboradores, principalmente Radu Balescu (2007), que foi membro do grupo de pesquisa sobre a Mecânica Estatística organizado em Bruxelas entre 1956 até 1970.

1. Origens Familiais

Ilya Romanovich Prigogine nasceu em Moscou, Rússia, em 25 de janeiro de 1917. Seu pai, Romane Prigogine, era engenheiro químico da Politécnica de Moscou e dono de uma fábrica de sabão. Sua mãe, Julia Wichman, estudou piano no conservatório. O jovem

Ilya herdou seu amor pela música, e ele diz na sua autobiografia que sabia ler partituras antes de poder ler livros (BALESCU, 2007, p. 3).

Prigogine nasceu alguns meses antes da Revolução Russa. Os acontecimentos dramáticos da época não favoreceram os negócios do seu pai. Dessa maneira, a família decidiu deixar a Rússia em 1921 (quando Ilya tinha quatro anos de idade). Passando um ano na Lituânia, a família foi depois para Berlim, onde Prigogine recebeu a boa educação alemã que o tornou familiar dos clássicos desse país. Na Alemanha, o pai não conseguiu desenvolver suas atividades comerciais devido às circunstâncias da época. Devido também aos espectros do nazismo que já apontavam no horizonte, a família emigrou de novo para a Bélgica em 1929, onde se instalou definitivamente, quando o jovem Prigogine tinha doze anos de idade.

Prigogine raramente se refere publicamente como sendo judeu e, de acordo com a Comunidade Judaica da Bélgica, a *Consistoire Central Israélite de Belgique*, Prigogine permaneceu “bastante discreto sobre sua condição de judeu”. A família Prigogine mudou-se de Berlim para Bruxelas para “escapar da crescente maré do nazismo”, e Ilya era “uma raridade, um garotinho judeu de algum lugar do Oriente” (LUKAS, 1980). Em 1949 ele recebeu oficialmente a nacionalidade belga. Em Bruxelas, Prigogine foi inscrito na escola real Athenée d’Ixelles para cursar o ensino secundário (BALESCU, 2007, p. 4).

2. Início de Carreira

Ao terminar o ensino médio clássico em grego-latim, Prigogine estava indeciso sobre a sua carreira futura. Por um lado, ele sonhava ser pianista profissional, mas seu professor lhe fez entender que malgrado o seu amor pela música, essa não deveria ser sua carreira. Por outro lado, Ilya era fascinado por história, arqueologia e filosofia (BALESCU, 2007, p. 4). Seguindo os conselhos da sua família, ele abraçou, em 1935,

outra opção paralela, os estudos de química e física, na *Université Libre de Bruxelles*, como havia feito seu irmão mais velho Alexander Prigogine, que iria se tornar químico e fazer carreira na indústria de mineração do antigo Congo Belga. Ilya nunca mais deixaria a Universidade Livre de Bruxelas, sua *alma mater*, apesar de ter aceito a cadeira de professor na Universidade de Texas em Austin, onde passava metade do ano.

Em 1939, Ilya Prigogine se formou em ciências químicas e físicas, e em 1941 obteve seu doutorado em ciências químicas, na mesma universidade. Enquanto estudante, Prigogine fez leituras de filósofos, sendo que o que mais o impressionou foi Henri Bergson, o qual continuou a citar até no final da sua vida. Na idade de vinte anos, em 1937, Prigogine publicou três artigos no *Cahier du Libre Examen*, uma revista interna da Universidade Livre de Bruxelas. Nesses textos, Prigogine discute alguns temas aos quais retornaria no futuro: determinismo, interpretação da mecânica quântica, evolução biológica e o tema do tempo. Os títulos são: “Ensaio sobre a filosofia da física”, “O problema do determinismo” e “A evolução”, este último em colaboração com Hélène Bolle, que se tornaria sua primeira esposa (BALESCU, 2007, p. 4).

Depois de obter o seu doutorado, Prigogine iniciou sua carreira científica como professor e pesquisador na Universidade Livre. Ele menciona a influência duradora de dois dos seus professores na sua orientação científica, a saber: Théophile De Donder e Jean Timmermans.

O orientador acadêmico de Prigogine, Théophile De Donder (1872-1957), foi um brilhante físico e matemático belga, professor na Universidade Livre. Ele iniciou a sua carreira científica como professor de ensino médio. De inteligência notável, obteve em 1896, como autodidata, o título de doutor em ciências física e matemática, sem ter cursado nenhum magistério na universidade. Apenas aos quarenta e cinco anos de idade, em 1918, é que De Donder vai se dedicar ao ensino superior. Ele foi discípulo da escola francesa

de Termodinâmica de Pierre Duhem. Ele teve correspondências com grandes cientistas da sua época, como Einstein, Lorentz, Eddington, Chapman, Enskog, Poincaré, Lebesgue, Hadamard, Darmois, Levi-Civita e Volterra (GLANSDORFF, BOSQUET & GÉHÉNIAU, 1987).

Nomeado professor na Universidade Livre em 1914, De Donder formou logo uma geração impressionante de discípulos e pesquisadores que iriam trabalhar depois na mesma universidade e no estrangeiro, entre os quais Ilya Prigogine. Na universidade, De Donder divulgou as novas correntes da física moderna: Relatividade, Mecânica Quântica, Termodinâmica e Mecânica Estatística. Na Termodinâmica aplicada à química, De Donder fez avanços importantes ao introduzir uma noção precisa de afinidade, que o permitiu calcular a produção da entropia numa reação química (e o grau de evolução de uma reação química). Tais pesquisas eram um primeiro passo em direção à Termodinâmica de Não Equilíbrio, que Prigogine levaria adiante (BALESCU, 2007, p. 5; PRIGOGINE, 2011, p. 65).

Interessado no conceito do tempo (desde a leitura de *A evolução criadora*, de Bergson), Prigogine sentiu-se atraído pelos trabalhos de De Donder sobre segunda lei da Termodinâmica, porque nesta ele via a possibilidade da introdução da novidade na descrição da evolução do mundo físico. Em suma, De Donder suscitou em Prigogine o interesse pela termodinâmica dos processos irreversíveis, que será a paixão deste último por toda vida. Em 1940, Prigogine foi nomeado assistente de De Donder, função a qual renunciou um ano depois, devido à guerra que provocou o fechamento da universidade. O tempo de guerra, de quatro anos, foi de grandes atividade científica, durante o qual Prigogine publicou 13 artigos científicos sobre a termodinâmica, no *Bulletin de Académie Royal Belge*. Ele foi subsidiado pelos institutos Solvay.

Nessa época, Prigogine consagrava o seu tempo a elaborar sínteses das ideias do seu mestre De Donder. Disso resultou o seu primeiro livro importante, escrito em colaboração com Raymond Defay: *Traité de thermodynamique, conformément aux méthodes de Gibbs e De Donder*, publicado em 1944 e 1946. Ao reabrirem-se as portas da Universidade, em 1945, o ambicioso químico obteve sua agregação no ensino superior na mesma universidade. Em 1947, foi nomeado professor na Universidade Livre de Bruxelas, sob a recomendação de De Donder, ciente da potencialidade do seu discípulo. Em 1950 Prigogine foi nomeado professor extraordinário e em 1951 professor ordinário, substituindo outro mestre, Professor Jean Timmermans, de quem falaremos a seguir. Dessa forma, Prigogine assumiu a parte teórica do curso de Físico-Química para os estudantes de Química. Em 1953 ele é nomeado correspondente da Academia Real Belga, e mais tarde, em 1960, torna-se membro.

Prigogine foi influenciado na sua carreira científica não somente por De Donder, mas também pelo professor Jean Timmermans. Este era um físico-químico experimental, professor da Universidade Livre de Bruxelas, interessado nas aplicações da Termodinâmica Clássica a soluções líquidas e sistemas complexos, seguindo a tradição da escola holandesa de Termodinâmica de Van der Waals e Roozeboom. Junto a Timmermans, Prigogine foi confrontado às aplicações precisas dos métodos termodinâmicos e entendeu a sua utilidade. Dessa herança, Prigogine orientou a primeira fase das suas pesquisas voltadas às soluções e misturas até na década de 1960.

3. O Problema da Irreversibilidade

No período 1945-1967, Prigogine abraça dois programas paralelos de pesquisa. O primeiro era voltado à Físico-Química clássica, inspirado em Timmermans, envolvendo o estudo de misturas e soluções. O objetivo era ligar as propriedades termodinâmicas das

soluções às das suas constituintes moleculares. Os resultados dessas pesquisas aparecem no livro *The molecular theory of solution* (PRIGOGINE, MATHOT & BELLAMANS, 1957). Após a publicação do livro, Prigogine abandonou esta linha de pesquisa, passando a se dedicar unicamente à Termodinâmica de Não-Equilíbrio e ao Problema da Irreversibilidade.

O segundo programa de pesquisa de Prigogine neste período inicial foi orientado justamente para o estudo da Termodinâmica dos fenômenos irreversíveis, inspirado em De Donder. Os trabalhos de De Donder se limitaram às reações químicas, mas Prigogine estendeu seu formalismo para todos os processos irreversíveis macroscópicos. Prigogine expressou a produção da entropia em termos de “fluxos dissipativos” e o “teorema de produção de entropia mínima”. Em 1946, com Jean Wiame, ele publicou uma primeira aplicação ligada à Biologia (PRIGOGINE & WIAME, 1946).

A partir de 1954, Prigogine passa a investigar mais detidamente os fundamentos microscópicos dos fenômenos irreversíveis. Em 1955, ele publica um pequeno tratado, *Introduction to thermodynamics of irreversible processes* (PRIGOGINE, 1955). Neste mesmo ano, aparece um trabalho importante de Léon van Hove, físico, amigo de Prigogine, formado na Universidade Livre de Bruxelas e na época professor da Universidade de Utrecht. Este trabalho aplicava os métodos matemáticos voltados à Teoria Quântica de Campos para a Mecânica Estatística, analisando um sistema quântico de muitos corpos com acoplamento fraco. Prigogine e Robert Brout, estudaram a abordagem de van Hove e generalizaram o método em 1956, em um texto intitulado “Teoria geral de sistemas fracamente acoplados” (BALESCU, 2007, p. 15). Em 1959, introduz com Balescu uma técnica diagramática para dar conta dos termos perturbativos.

Em PRIGOGINE (1962), apresenta-se um resumo dos pontos principais dos trabalhos anteriores, com as *condições necessárias para uma evolução irreversível*: (1)

Um sistema com um grande número de partículas N , em um volume V grande, onde matematicamente é tomado o limite termodinâmico $N \rightarrow \infty$ e $V \rightarrow \infty$, com N/V finito. (2) Uma condição técnica envolvendo as ressonâncias. (3) Alcance finito das interações e das correlações. (4) A presença de “um pequeno parâmetro”. Nessas condições, a distribuição das variáveis tende irreversivelmente para o equilíbrio termodinâmico depois de um tempo suficientemente longo (BALESCU, 2007, p. 17).

É importante salientar que nesta abordagem não há desvios das leis dinâmicas hamiltonianas, e a irreversibilidade aparece como uma propriedade *assintótica* da evolução do sistema, ou seja, para N e V tendendo ao infinito, e para tempos tendendo ao infinito.

A partir de 1969, a Mecânica Estatística “prigoginiana” se radicalizaria. Ele não estava mais satisfeito pela imposição de uma aproximação devido à presença de um pequeno parâmetro de acoplamento fraco (item 4 acima), mas queria generalizar este resultado também para acoplamentos fortes (BALESCU, 2007, p. 18). A continuidade do trabalho sobre a teoria microscópica da irreversibilidade contou com a colaboração de Claude George, Françoise Henin e o famoso físico belga Léon Rosenfeld, que colaborou com Niels Bohr, em Copenhague, durante décadas. O artigo “A unified formulation of dynamics and thermodynamics” é matematicamente bastante complexo (PRIGOGINE, GEORGE, HENIN & ROSENFELD, 1983).

O ponto principal da nova abordagem era propor uma definição microscópica geral de entropia. Boltzmann tinha proposto algo nessa direção com seu teorema-H, mas ele foi obrigado a introduzir a hipótese do caos molecular para justificar porque não se observam desvios do estado de entropia máxima. Prigogine e seu grupo propuseram uma “dinâmica causal irreversível” regendo as próprias moléculas componentes do sistema físico, e com isso fizeram a proposta de definição de entropia. Em outras palavras, um

sistema dinâmico microscópico é considerado como “intrinsecamente estocástico” ou “dinamicamente instáveis”. Isso incluiria os chamados “escoamentos-K” (*K-flows*) de Kolmogorov (BALESCU, 2007, p. 33-34). Um tratamento simplificado desta teoria aparece no livro de divulgação *From being to becoming* (PRIGOGINE, 1980).

4. Termodinâmica de Não-Equilíbrio e Estruturas Dissipativas

Sobre a Termodinâmica de Não-Equilíbrio, um trabalho importante foi publicado em 1954, com Paul Glansdorff (1904-1999), em que oferecem pela primeira vez uma extensão da Termodinâmica de Não-Equilíbrio com aplicação às leis de transporte não-lineares (GLANSDORFF & PRIGOGINE, 1954). O objetivo deste trabalho era derivar um critério universal de evolução, baseada na produção de entropia. Esta pesquisa e os resultados posteriores foram publicados em GLANSDORFF & PRIGOGINE (1971). Mencionaremos críticas a este trabalho na seção 4.3.

Esta teoria buscou explicar a existência de reações químicas oscilantes, mantidas longe do equilíbrio. Em 1964, um experimento feito por Zhabotinsky confirmou esta previsão, com uma reação química de reagentes líquidos em um tubo de ensaio, em que as cores mudavam do vermelho para o azul, com padrões espaciais e temporais.

O termo *estrutura dissipativa* apareceu pela primeira vez em 1967, num artigo escrito por Prigogine e seu amigo Grégoire Nicolis (1939-2018), em que exploram processos de auto-organização. No regime linear, tais sistemas evoluem para um estado estacionário único estável; mas quando um parâmetro de controle afasta o sistema do equilíbrio, a ponto de surgir um comportamento não-linear, há um ponto de bifurcação (a partir de um certo valor do parâmetro de controle) em que as trajetórias podem mudar de repente para dois ou mais valores diferentes, sendo importante o papel das flutuações térmicas (PRIGOGINE & NICOLIS, 1967). Alan Turing já havia construído um modelo,

em 1952, para gerar a quebra de simetria espacial em estruturas biológicas (TURING, 1952). Os seres vivos são exemplos de sistemas funcionando longe do equilíbrio, tendo numerosas reações químicas oscilantes.

O ano de 1967 marca uma nova etapa da carreira de Prigogine, com a descoberta das estruturas dissipativas ou sistemas biológicos longe do equilíbrio. Nos dez anos que seguem, novas ideias foram desenvolvidas e as pesquisas sobre os sistemas longe de equilíbrio foram aplicadas em outros ramos da ciência, como Economia, Sociologia e Geografia. Os resultados desses trabalhos foram coletados em 1977 no livro *Self-organization in non-equilibrium systems* (NICOLIS & PRIGOGINE, 1977).

Em 1959, Prigogine é nomeado diretor dos Institutos de Física e Química, fundados pelo célebre industrial Ernest Solvay em 1911, com missão de organizar a reunião de cientistas para discutir sobre os maiores problemas da ciência. Prigogine deu novo impulso aos institutos, continuando a organização dos Conselhos Solvay.

Em 1977 Prigogine ganhou o Prêmio Nobel de Química, por seu trabalho em termodinâmica fora do equilíbrio. A partir deste momento Prigogine se torna um personagem mundialmente reconhecido e abre nova fase de pesquisa.

5. Pesquisas após 1982

A partir de 1982, Prigogine não trabalhou mais com estruturas dissipativas, mas ele continuaria desenvolvendo sua Teoria Microscópica da Irreversibilidade, vista acima na seção 1.3.

Outro tema que passou a lhe interessar foram pesquisas na área de Cosmologia, entre 1986 e 1993. Em tal empreitada, ele começou a colaborar com o ex-discípulo de De Donder, Jules Géhéniau, e com pesquisadores mais novos, Edgard Gunzig e Pasquale Nardone, explorando o lugar da entropia na Cosmologia. As equações de relatividade de

Einstein conduziram ao modelo cosmológico do *Big Bang*, mas permanece conceitualmente misterioso explicar a gênese do Universo nos primeiros instantes depois da explosão. Prigogine e seus colaboradores introduziram a noção de que o *vácuo quântico* é um quadro “eterno”. O vácuo da Teoria Quântica de Campos não implica em ausência de matéria, mas está preche de possibilidades e de partículas virtuais, em constante flutuação. Os autores consideram que se uma flutuação exceder um certo valor de massa, ocorre uma desestabilização do vácuo (o que seria uma bifurcação), levando a uma grande produção de matéria, por conversão a partir da energia gravitacional. Esse processo seria irreversível e acompanhado da produção da entropia. A partir deste trabalho, Prigogine revisou sua concepção relacionista do tempo e concluiu que “o tempo precede a existência” (BALESCU, 2007, p. 23-24; GUNZIG, GÉHÉNIU & PRIGOGINE, 1987).

Depois de 1977, Prigogine passou a ter também uma intensa atividade literária e filosófica. Ele se tornou uma pessoa pública e ganhou uma grande popularidade, promovendo e discutindo a ciência em geral e suas ideias em particular. Nesse período ele recebeu numerosos prêmios internacionais que coroaram suas atividades científicas e filosóficas. Ele recebeu 54 títulos de Doutor Honoris Causa, e foi eleito membro de muitas academias. Em 1989, o Rei Baudouin da Bélgica lhe deu o título de visconde. Ele exerceu uma intensa atividade como conselheiro especial da União Europeia, e nos seus relatórios ele contribuiu para dar orientação e impulso novo à política científica europeia. Ele contribuiu também na abertura para os países de leste, como Rússia. Ele se tornou um viajante incansável, levando suas ideias ao mundo todo. Além das publicações de livros gerais, multiplicam-se as entrevistas na imprensa escrita e na televisão, tanto na Bélgica quanto no exterior (BALESCU, 2007, p. 7).

Suas incursões iniciais na Filosofia e na Literatura foram apoiadas por sua aluna Isabelle Stengers, atualmente filósofa da ciência na Universidade Livre de Bruxelas. O primeiro fruto dessa colaboração foi o livro *A nova aliança* (PRIGOGINE & STENGERS, [1979] 1991). Este livro foi um verdadeiro *best-seller*, muitas vezes reeditado e traduzido em muitas línguas. Esta publicação foi seguida de uma série de outras obras gerais que tiveram o mesmo sucesso de livraria: *From being to becoming* (PRIGOGINE, 1980), *Entre o tempo eternidade* (PRIGOGINE & STENGERS, [1988] 1992), *As leis do caos* (PRIGOGINE, [1994] 2002), e *O fim das certezas* (PRIGOGINE, [1996] 2011), além de duas conferências publicadas como *O nascimento do tempo* (PRIGOGINE, [1988] 1999).

A partir de 1967 Prigogine começou a lecionar na Universidade do Texas, em Austin, onde fundou um centro de estudos voltados a mecânica estatística e sistemas complexos, conhecido como “Center Ilya Prigogine for Complex Quantum Systems”. Nesse centro Prigogine formou uma geração importante de professores e pesquisadores. A partir desta data, ele passou a dividir seu tempo entre Bruxelas e Austin.

Prigogine veio a falecer em 28 de maio de 2003, em Bruxelas.

Capítulo 2:

Alguns Debates em Filosofia da Física

A finalidade deste capítulo é apresentar de alguns debates em filosofia da física, dos quais Prigogine viria a participar.

1. A Filosofia do Tempo

Qual é a natureza física do tempo? O tempo é absoluto ou relativo? Há tempo sem as coisas ou coisas fora do tempo? Tais são alguns dos questionamentos em torno dos quais se articulam as controvérsias físico-filosóficas relativas à natureza física do tempo. A problemática é tanto antiga e atual, científica e filosófica, religiosa e teológica, cotidiana e familiar. Sobre a natureza física do tempo, as concepções, os pontos de vistas e as opiniões divergem de maneira antagônica. As visões se acaudilham ou se convergem para duas grandes perspectivas a saber: o tempo absoluto e o tempo relativo.

A questão da natureza física do tempo é tão espinhosa que repercute em diferentes áreas do conhecimento como em matemática, física, cosmologia, biologia, filosofia, teologia etc., associada aos grandes cientistas e filósofos das diferentes épocas como Aristóteles, Agostinho, Isaac Newton, Leibniz, Kant, Ernst Mach, Bergson, Einstein, Carnap, Hawking etc. (ver WHITROW, 2003).

Segundo Pessoa (2019, p. 45), uma primeira distinção a se fazer é entre a perspectiva naturalista do tempo, compartilhada por cientistas, que considera que o tempo é anterior ao ser humano, e a perspectiva do sujeito, compartilhada por muitos filósofos, em que o tempo é dado antes de tudo pela nossa intuição.

Voltando às questões centrais de saber se o tempo é absoluto ou relativo, boa parte dos físicos considera que o tempo é absoluto, anterior e independente das coisas, apesar de haver muita discussão sobre essa questão. Além disso, no contexto da Física Clássica, o tempo não teria início. O universo material evoluiria dentro do tempo, sem afetar o ritmo de andamento do tempo.

Esse tempo absoluto, Newton (2008, p. 45) o considera como o tempo verdadeiro. Em contraposição, tem outro tempo que ele considera como relativo, sinônimo de duração. É uma medida sensível e externa (precisa ou desigual) da duração do tempo absoluto ou verdadeiro, obtida per meio de movimento. Só que esse tempo se usa como se fosse o tempo verdadeiro. Este tempo relativo, na perspectiva newtoniana, é medido por segundos, minutos, horas, dias, semanas, meses, anos, séculos, milênios e assim vai.

Contra a concepção absolutista do tempo, muitos pensadores apresentaram perspectivas diferentes. Já mencionamos que, na perspectiva do sujeito, o tempo é tomado como subjetivo ou psicológico. Mas dentro da perspectiva naturalista há também a concepção “relacional” de que o tempo é relativo.

Na perspectiva subjetivista, considera-se que o tempo está ligado ao sujeito pensante. É o sujeito que dá sentido ao tempo. Essa posição aparece claramente na estética transcendental da *Crítica da razão pura* de Kant, que admite que o tempo e espaço são formas da sensibilidade, que são condições de possibilidade para que o sujeito tenha experiências. Na mesma perspectiva, uns filósofos de tendência fenomenista que ligam o objeto do conhecimento ao sujeito de observação, consideram que o tempo é antes de mais psicológico. O tempo físico, pelo contrário, seria apenas uma construção teórica, pois o tempo pressupõe a existência do sujeito. O tempo depende das nossas intuições. Está última posição foi muito defendida por Henri Bergson (ver PIETTRE, 1997).

As perspectivas filosóficas ligadas ao tempo subjetivista e psicológico estabelecem propriedades intuitivas do tempo, considerando que a nossa intuição do tempo é tão desenvolvida e presente de tal modo que é difícil se deixar influenciar por teorias científicas, como a Teoria da Relatividade Restrita. A esse respeito, Hans Reichenbach (1956) fez uma boa síntese dessa intuição, baseando-se nas seguintes propriedades “topológicas”.

(1) O tempo vai do passado para o futuro. (2) O presente, que divide o passado do futuro, é agora. (3) O passado nunca retorna. (4) Não podemos alterar o passado, mas podemos alterar o futuro. (5) Podemos ter registro do passado, mas não do futuro. (6) O passado está determinado; o futuro é indeterminado. (PESSOA, 2019, p. 46)

Em outras palavras, essa tese pretende mostrar que a nossa intuição do tempo é tão desenvolvida a tal ponto que enxergamos o tempo em toda parte: no calendário da parede, nos diversos relógios que pautam nossa vida, no nascer e no pôr-do-sol, nas fases da lua, nas estações do ano, bem como em nós mesmos.

A concepção absolutista, segundo a qual o tempo é independente da matéria, do movimento dos corpos e de qualquer ser inteligente, é negada não só pela perspectiva subjetivista (psicológica), mas na perspectiva naturalista também pela concepção relacionista.

A concepção relacionista defende que o tempo não é independente nem absoluto, mas que o tempo surge a partir do movimento das coisas, sendo assim uma relação entre as coisas e não algo independente das coisas materiais (ou espirituais). Leibniz é um dos autores que defendem essa posição, para quem o tempo surge da ordem das sucessões, assim como o espaço é a ordem das coexistências das coisas (WHITROW, 2003, p. 83).

A concepção do tempo relacional supõe que o tempo nasce da relação causal e do movimento das coisas. Ela critica o ponto de vista de Newton, segundo a qual o tempo

flui uniformemente sem influência externa. Afinal, como seria possível verificar que o tempo não flui uniformemente? Ernst Mach (1902, p. 223) afirma que “o tempo é uma abstração, à qual chegamos pela mudança das coisas”. Ninguém pode afirmar portanto se o tempo flui uniformemente ou não. A concepção positivista de Mach liga a verdade das coisas à observação ou à experiência pessoal, e por isso considera o tempo absoluto como “um ocioso conceito metafísico”.

Mach concluiu que se o tempo nasce dos processos dinâmicos, então são esses processos que estabelecem o sentido de aumento do tempo, ou seja, a assimetria do tempo (que vai do passado para o futuro, e não o contrário). Hoje se usa a expressão “seta do tempo”. Essa ideia foi retomada por Ludwig Boltzmann, que ligou a seta do tempo ao aumento da entropia. Se sustentarmos que haverá recorrência do Universo ao seu estado inicial de baixa entropia, haverá uma era no futuro em que a entropia do Universo estará decrescendo. “Boltzmann especulou, então, que se a flecha do tempo for dada pela direção de aumento de entropia, então em um cenário em que a entropia diminui, os observadores vivenciarão uma inversão da flecha do tempo!” (Pessoa, 2019, p. 50). Ou seja, a um certo momento do futuro, a seta do tempo pode mudar de direção, indo em sentido contrário (do futuro para o passado).

Para entender melhor esta e outras questões ligadas ao conceito de entropia, muito trabalhado por Prigogine, passamos agora a examinar este conceito.

2. Termodinâmica e Conservação de Energia

A revolução industrial operada entre os séculos XVII e XVIII, na Inglaterra, motivada pela necessidade de aumentar a eficiência das condições do trabalho afim de maximizar a produção, culminou na invenção das máquinas a vapor, que se tornaram os

principais meios de trabalho e de produção. Isso ocorreu graças à transformação de energia térmica em energia cinética mecânica, responsável pela rotação dos motores de trens e das máquinas nas fábricas, e finalmente em trabalho. O estudo das transformações energéticas operadas pelas máquinas a vapor veio a ser chamada de “Termodinâmica”.

As transformações termodinâmicas não se limitam tão-somente às máquinas a vapor, mas estão presente em quase todos os sistemas presente no universo. Pode-se assim dizer que a Termodinâmica envolve leis universais. Pode-se dizer também que o universo é um sistema termodinâmico gigante, onde acontecem transformação e transferência permanente da energia entre os distintos corpos componentes.

Nesta e nas próximas seções, vamos analisar alguns aspectos conceituais que regem as transformações termodinâmicas, envolvendo grandezas físicas macroscópicas como calor, trabalho, pressão e temperatura, os conceitos de energia e entropia, e a distinção de reversibilidade e irreversibilidade. Na seção 5 exploraremos a relação com as grandezas microscópicas, como velocidade e massas de moléculas, descritas pela chamada “Mecânica Estatística”.

A Termodinâmica é o ramo da Física que estuda as causas e os efeitos de mudanças na temperatura, pressão e volume em sistemas físicos em escala macroscópica. Grosso modo, “calor” significa energia em trânsito, ao passo que “dinâmica” se relaciona a movimento. Assim, a Termodinâmica estuda o movimento da energia e como a energia está associada ao movimento. A especificidade da Termodinâmica consiste na conversão ou transformação da energia de uma forma para outra, de um corpo para outro, e na disponibilidade da energia para a realização do trabalho. Entre 1820 e 1850, diversos processos de conversão entre fenômenos elétricos, magnéticos, ópticos, mecânicos e térmicos foram descobertos, levando à formulação do princípio de conversão da energia.

Convém notar que a energia se define como uma grandeza associada à capacidade de produzir um trabalho ou realizar uma ação. Na mecânica, energia é uma quantidade associada a qualquer movimento atual ou potencial, manifestando-se como a capacidade de mover um objeto ou de deformá-lo. A energia cinética é expressa matematicamente por $T = \frac{1}{2}mv^2$, onde m representa a massa de um corpo em translação com velocidade v em relação a certo referencial. Já a energia potencial se apresenta de diversas formas, conforme a interação, sendo que a energia potencial gravitacional se expressa como $U = mgh$, onde m representa a massa do corpo, g a aceleração gravitacional e h a altura de decaimento do corpo.

Os processos termodinâmicos supõem a troca de energia entre um corpo e sua a vizinhança, e também a conversão desta energia em outro tipo de energia, incluindo trabalho. A primeira lei da Termodinâmica trata do princípio de conservação da energia, de forma quantitativa, baseando-se no princípio de que a energia nunca se cria ou se destrói, mas apenas se transforma. Uma expressão matemática geral desta lei diz que a variação de energia interna ΔU de um sistema é igual à diferença entre o calor Q trocado com o meio e o trabalho W realizado pelo sistema na vizinhança (NUSSENZVEIG, 2002): $\Delta U = Q - W$.

O princípio da conservação da energia estabelece que a quantidade total de energia em um sistema isolado permanece constante. Porém, pode haver conversão de energia. Por exemplo, em uma usina elétrica, a energia potencial gravitacional da água é transformada, na queda da água, em energia cinética, que faz girar uma turbina contendo ímãs, com a conversão em energia elétrica.

3. Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica

O sentido de troca de energia térmica é sempre do corpo quente para o corpo frio, nunca o contrário em processos espontâneos. Além disso, o processo de transmissão da energia térmica é irreversível. Para expressar este fato, formulou-se a Segunda Lei da Termodinâmica, definindo-se a grandeza entropia e afirmando-se que ela nunca diminui em sistemas isolados.

Historicamente, a Segunda Lei se originou em 1824 com Sadi Carnot, que apresentou uma teoria para o funcionamento de máquinas térmicas a vapor. Em seu modelo, o trabalho é realizado quando o calor passa de um corpo quente para um corpo frio. O trabalho máximo que pode ser realizado é proporcional à diferença de temperatura $T_2 - T_1$.

Carnot mostrou que em máquinas térmicas a energia térmica não poderia ser convertida completamente em trabalho, sempre havendo dissipação de uma quantidade de calor para um reservatório frio para que o sistema possa voltar ao estado original. A segunda lei da Termodinâmica estabelece que a entropia aumenta para processos espontâneos e sistemas isolados. No caso do universo como todo, sua entropia também aumenta até atingir um valor máximo no estado final de equilíbrio.

A entropia é a medida do nível de homogeneidade de um sistema, e pode também ser associado à desordem microscópica do sistema. Dado um sistema termodinâmico, Boltzmann mostrou que a entropia de um certo estado macroscópico é proporcional ao logaritmo do número de configurações de microestados que é consistente com este macroestado.

Rudolf Clausius (1854) definiu matematicamente a entropia S , de maneira que sua variação se expressa de maneira seguinte: $\Delta S = Q/T$, onde Q é a quantidade de calor que

entra (ou sai) do sistema a uma temperatura T . Se uma xícara de café quente à temperatura T_2 troca calor com o ambiente à temperatura mais baixa T_1 , a soma das duas contribuições gera $\Delta S = Q/T_1 - Q/T_2$, a variação total de entropia. Como $T_2 > T_1$, ΔS é positiva: $\Delta S \geq 0$. O valor máximo da entropia é obtido quando todos os corpos (do sistema fechado) estiverem à mesma temperatura.

A variação positiva da entropia expressa a irreversibilidade de um processo. Note-se que a variação de entropia apresentada é obtida somente comparando dois estados em equilíbrio, ou seja, estados que não se modificam com o tempo. Essa definição termodinâmica de entropia não se aplica nas situações fora do equilíbrio (por exemplo no momento de transmissão de calor).

O Universo é considerado como sistema termodinâmico isolado. Clausius (1865) aplicou as duas leis da termodinâmica para o universo e chegou à conclusão que o universo tem energia constante e que sua entropia tende para um valor máximo. Isso corresponde à situação em que a temperatura é uniformemente distribuída, de maneira que o universo estará condenado a um estado de repouso absoluto, ou “morte térmica”. Considerando esse argumento pessimista, outros cientistas tentaram opinar no sentido contrário, rejeitando a hipótese da morte térmica. William Rankine, por exemplo, pensou na possibilidade de que as fronteiras do universo poderia refletir energia e reconcentrar a energia dissipada (PESSOA, 2019, cap. 23).

4. Reversibilidade e Irreversibilidade

A Mecânica Estatística (ou Física Estatística) é o ramo da física que estuda o comportamento de sistemas macroscópicos a partir do comportamento estatístico de um elevado número de entidades constituintes microscópicas. Esses estados microscópicos

são incertos ou desconhecidos, de maneira que a descrição é feita em termos de probabilidade. Os constituintes podem ser átomos, moléculas, íons, entre outros. Trata-se de uma teoria que relaciona um nível de descrição macroscópico (Termodinâmica) com um nível microscópico, que pode ser modelado de acordo com a Física Clássica, mas que pode necessitar da Mecânica Quântica.

Dois conceitos precisam ser definidos: reversibilidade e irreversibilidade. A *reversibilidade* é uma propriedade satisfeita pela Mecânica Clássica. Tomemos como exemplo uma mesa de bilhar sem atrito. Podemos imaginar as bolas se chocando de maneira elástica, conservando energia, em uma certa sequência temporal de estados que satisfaz a mecânica de Newton. As forças surgem nas colisões elásticas, que em uma dimensão poderia ser escrita como: $F = ma = m d^2x/dt^2 = -kx$. Notamos nesta equação que se a variável tempo t for substituída por $t' = -t$, a equação de movimento resultante tem a mesma forma: $m d^2x/dt'^2 = -kx$. O que acontece é que a derivada segunda em relação ao tempo torna a equação invariante ante alteração da flecha do tempo. Esta é uma marca matemática de sistemas reversíveis. Se as colisões na mesa de bilhar forem filmadas e o filme for passado de trás para frente, o cenário resultante irá obedecer à Mecânica Clássica. Esta é uma marca da reversibilidade.

Quando se analisam as colisões atômicas, segundo a Mecânica Clássica, o sistema será reversível, mesmo que haja um número imenso de partículas. Se a Mecânica Quântica for utilizada (equação de Schrödinger), e o sistema estiver isolado de perturbações externas, a evolução do sistema também será reversível. Assim, em termos teóricos, conclui-se que a descrição microscópica de um conjunto de moléculas será sempre reversível.

Por outro lado, ao observarmos os objetos macroscópicos à nossa volta, vemos que eles geralmente têm um comportamento irreversível. No caso da mesa de bilhar, após

uma tacada, as bolas se chocam mas depois de um tempo todas elas acabam parando. Neste caso, há um atrito que dissipa a energia do sistema, transformando esta energia mecânica em calor. A equação que descreve o sistema poderia ser semelhante àquela do parágrafo anterior, só que agora há uma força dissipativa, que pode ser modelada como proporcional à velocidade: $m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - bv$, onde a velocidade é $v = dx/dt$. Ao substituir a variável tempo por $t' = -t$, a equação de movimento não tem mais a mesma forma: $m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx + b \frac{dx}{dt}$ (o sinal diante de b se alterou). Este é o critério matemático de que o sistema não é reversível. Os processos que exibem simetria temporal são reversíveis, e os que impliquem assimetria temporal são irreversíveis.

Em termos práticos, a partir do estado final em repouso das bolas de bilhar em uma mesa com atrito, não temos como saber qual era o estado inicial, pois diferentes estados iniciais podem levar ao mesmo estado final, em sistemas irreversíveis. Além disso, se filmarmos a mesa de bilhar com atrito, e rodarmos o filme ao contrário, veremos as bolinhas se acelerarem sem a presença de uma força, o que pareceria estranho para a nossa intuição e claramente violaria a Mecânica Clássica.

Outra classe de sistemas macroscópicos que exibe irreversibilidade são os sistemas termodinâmicos. A grandeza que mede este comportamento irreversível é o aumento da entropia.

O problema da irreversibilidade é o seguinte: como explicar a irreversibilidade do mundo macroscópico, dado que as leis que regem os processos microscópicos são reversíveis? Ludwig Boltzmann foi responsável por duas propostas de solução para este problema, conhecidos como “Teorema H” e “teoria probabilista da entropia”.

5. Teorema-H: Prova Mecânica da Irreversibilidade

O teorema-H foi proposto por Boltzmann, em 1872, como uma explicação mecânica para a irreversibilidade, expressa pela segunda lei da Termodinâmica. Em outros termos, ele buscou descrever a variável entropia em termos de grandezas microscópicas.

A descrição das grandezas termodinâmicas em termos de variáveis microscópicas foi um projeto que surgiu logo que a Termodinâmica foi estabelecida, em torno de 1850, e é conhecida como a Teoria Cinética dos Gases. Esta abordagem teve vários pioneiros, mas começou a ser sistematizada com August Krönig, em 1856. Por exemplo, a pressão p de um gás é proporcional à média do quadrado das velocidades $\langle v^2 \rangle$ das moléculas: $p = Nm\langle v^2 \rangle / 3V$, onde m é a massa das moléculas, N o número de moléculas, e V o volume do gás.

Em 1858, Rudolf Clausius formulou a noção de que as moléculas de um gás demoram para se difundir porque estão sujeitas a inúmeros choques, calculando assim o valor de seu “caminho livre médio”. Em 1860, James Maxwell derivou a fórmula estatística para *distribuição de velocidades* $f_M(v)$ em um gás a pressão constante, em equilíbrio termodinâmico.

Em 1866, Maxwell rederivou esta fórmula estatística da distribuição de velocidades, considerando colisões entre duas moléculas com certas velocidades, e a maneira como essas velocidades se modificam após a colisão. Supôs que a velocidade de cada molécula antes da colisão era independente da velocidade da outra molécula, suposição que veio a ser chamada de *independência estatística*, e expressa da seguinte maneira seguinte: $F(v_1, v_2) = f(v_1) \cdot f(v_2)$. Ou seja, supôs que os estados das moléculas que se chocam em um gás não têm correlação, ou seja, não se chocaram previamente.

Baseado nesses resultados, Boltzmann obteve em 1872 a derivação chamada posteriormente de *teorema-H*, que busca reduzir o conceito de entropia a propriedades da distribuição estatística de estados das moléculas de um gás. Este teorema prevê que, uma vez que a entropia máxima é alcançada, ela sempre permanecerá a mesma, sem flutuações. Boltzmann derivou este resultado apenas da Mecânica Estatística Clássica, e mais algumas hipóteses estatísticas que ele considerou bastante naturais.

Dentre das hipóteses usadas, está que as probabilidades de colisões diretas e inversas são as mesmas, querendo dizer que as colisões são reversíveis. Supôs também uma hipótese estatística de probabilidades iguais “a priori” no espaço de fase. No seu teorema, Boltzmann mostrou através de uma equação como a distribuição de velocidades varia com tempo, e que o sistema tende à distribuição de velocidade de Maxwell $f_M(v)$. O teorema-H afirma que a entropia do sistema aumenta monotonicamente até atingir o estado de equilíbrio, com entropia máxima. O teorema-H constituiu para Boltzmann a explicação mecânica da irreversibilidade, ou seja, a resposta à pergunta de como explicar a irreversibilidade do mundo macroscópico expressa pela segunda lei da termodinâmica.

No entanto, logo se levantaram problemas com o teorema-H. O primeiro, levantado por Kelvin (1874) e Loschmidt (1876), foi chamado de paradoxo da reversibilidade: como é que colisões reversíveis entre pares de moléculas podem levar à irreversibilidade de um sistema de muitas moléculas? O segundo paradoxo foi o da recorrência, levantado por Zermelo em 1896. Poincaré havia mostrado que qualquer sistema mecânico, restrito a se mover em um volume finito com energia constante, necessariamente retorna o quão próximo que se queira de sua configuração inicial. Em outras palavras, a entropia de um sistema finito com energia constante pode atingir um valor máximo, mas depois, em algum momento, terá que diminuir de novo (PESSOA, 2019, § XXIV.2).

Sensibilizado com essas críticas, Boltzmann voltou-se para outra abordagem para o problema da irreversibilidade. Mais tarde, em 1890, reconheceu que a hipótese da independência estatística (das velocidades antes dos choques) é contraditória com a mecânica clássica, sendo responsável pelo resultado de aumento monotônico da entropia. No entanto, seria possível manter o teorema-H se houvesse um mecanismo físico que justificasse a hipótese de independência estatística. Tal mecanismo hipotético foi chamado de *caos molecular*. No que consiste a hipótese do caos molecular?

A palavra “caos” carrega a ideia de desordem ou perturbação. S.H. Burbury (1890) propôs que a hipótese do caos molecular exprimiria os efeitos de flutuações térmicas do ambiente na amostra. Essa hipótese do caos molecular permite resolver o paradoxo de recorrência, pois a tendência a uma recorrência do sistema seria dispersada pelas flutuações ambientais. Essa interpretação veio a se chamar de *intervencionista* (SKLAR, 1993, pp. 250-54), pelo fato de que haveria constantemente a intervenção do ambiente no sistemas físicos.

Mais modernamente, ampliaram-se os agentes que poderiam propiciar semelhante intervenção aleatória: concebe-se que as flutuações em um sistema fechado poderiam ser causadas também por forças externas como a interação gravitacional e eletromagnética de objetos próximos, a radiação de fundo do universo, as flutuações do vácuo, etc. Na Física Quântica, Hans Dieter Zeh (1970) argumentou que quanto mais partículas estiverem presentes em um sistema, menor será a diferença de energia entre os níveis energéticos, e portanto maior será a influência do ambiente. Consequentemente, não haveria sistemas macroscópicos isolados, salvo o Universo como um todo (PESSOA, 2019, § XXIV.3).

A posição de Prigogine a este respeito é postular que moléculas individuais têm uma *instabilidade intrínseca*, o que estaria associada a uma irreversibilidade

microscópica. Esta seria então a maneira que ele interpreta a hipótese do caos molecular (COURBAGE & PRIGOGINE, 1983).

6. Teoria Probabilista da Entropia

Devida às críticas levantadas contra o teorema-H, Boltzmann desenvolveu em 1877 uma definição diferente de entropia, de natureza probabilista. A ideia básica é a seguinte: dado um estado macroscópico i , definido pelos valores de grandezas termodinâmicas como pressão e temperatura, considere o número Ω_i de estados microscópicos distintos (“configurações”, na terminologia de Boltzmann, ou “complexões”, para Planck), definidos pelas posições e velocidades de cada molécula do gás, que são consistentes com o estado macroscópico i . Boltzmann concluiu que a probabilidade de o sistema estar em um dado macroestado i é igual a Ω_i dividido pelo número total de microestados do sistema. Para garantir que a entropia seja uma grandeza aditiva (ao passo que as probabilidades são multiplicativas), Boltzmann propôs que a entropia seja dada por $S_i = k \log \Omega_i$, o que, por sua vez, permite que outras grandezas termodinâmicas sejam derivadas. O macroestado que possui o maior número de nanoestados associados – ou seja, o que tem maior entropia – é o macroestado mais provável. Este é o macroestado de maior entropia, S_i (PESSOA, 2019, § XXIV.4).

Esta associação do conceito de entropia com o de probabilidade foi uma ideia nova na época, tendo como origem as ideias de Maxwell. Esta associação não está presente na definição puramente termodinâmica. A Termodinâmica originalmente considera que a irreversibilidade leva o sistema necessariamente para um único estado final de equilíbrio. Já na definição probabilista de Boltzmann, é possível que haja diferentes estados finais,

com diferentes probabilidades. Haveria uma contradição entre estas duas definições? É considerado que não tem contradição na prática, por dois motivos.

Primeiro, porque em sistemas físicos macroscópicos, que envolvem um número imenso de moléculas – por exemplo, $N=10^{24}$ – o *macroestado mais provável* é muitíssimo mais provável que qualquer outro macroestado. Isso é consequência do efeito dos grandes números (ver PESSOA, 2019, § XXIV.5). Segundo, porque mesmo que um macroestado menos provável subsista por alguns instantes, nossa observação de sistemas macroscópicos envolve um intervalo de tempo relativamente grande em comparação com essas flutuações para fora do estado mais provável. Ou seja, nossa observação faz um média das propriedades macroscópicas do sistema.

Boltzmann levou em conta alguns aspectos para fundamentar a definição probabilista da entropia. Em primeiro lugar, os critérios de discretização do número de microestados componentes do macroestado. Em segundo lugar, o fato de que cada microestado tem a mesma possibilidade de ocorrer. Maxwell e Boltzmann justificaram essa suposição com outra denominada *hipótese ergódica*, segundo a qual um sistema físico passa por todos os microestados diferentes possíveis (PESSOA, 2019, § XXIV.4).

Em suma, para a concepção probabilista de entropia, formulada por Boltzmann, depois que o sistema entra em equilíbrio termodinâmico, haverá pequenos desvios do estado de entropia máxima. A rigor, isto vai contra a afirmação da Termodinâmica, mas esta não leva em conta pequenas flutuações. No caso imaginado por Boltzmann, as flutuações para fora do estado de equilíbrio ocorreriam após intervalos de tempo tão grandes que na prática não seriam observados. E a recorrência, que traz de volta o sistema isolado para próximo de seu estado inicial (de entropia baixa), ocorreria após um tempo muito maior do que a própria idade do Universo.

Capítulo 3:

As Ideias Científicas de Prigogine

O universo é regido por leis deterministas? Qual é o papel do tempo? (PRIGOGINE, 2011, p. 17). Tais são questionamentos fundamentais que trazem a preocupação central das investigações científicas de Prigogine. Iniciaremos aqui examinando o conceito de “instabilidade”, e como ele se relaciona com o indeterminismo, a irreversibilidade, flutuações, desordem e leis da física.

1. Instabilidade e Caos Determinista

O edifício científico realizado por Prigogine consiste em estabelecer os limites de validade dos conceitos fundamentais da Física Clássica e Quântica, como as trajetórias da Mecânica Newtoniana ou as funções de onda na Mecânica Quântica. A instabilidade e caos são pontos de partida para uma reformulação dessa dinâmica, onde o conceito de probabilidade é central. Isso leva a uma nova formulação das leis da natureza, que não se assenta em leis deterministas, mas sim em possibilidades (PRIGOGINE, 2002, p. 32). Essa instabilidade foi analisada por Prigogine em trabalhos sobre *sistemas dinâmicos instáveis*, *sistemas não integráveis* e *estruturas dissipativas*.

Sistemas dinâmicos instáveis. A diferença entre um sistema estável e um instável é familiar na Física Clássica. Um pêndulo com atrito tem um ponto de estabilidade quando está no ponto de energia potencial mínima: uma pequena perturbação é seguida pelo retorno ao equilíbrio. Um exemplo de sistema em equilíbrio instável é um lápis colocado de pé com a ponta para baixo: a menor perturbação o fará cair.

Partindo dos exemplos acima, os sistemas dinâmicos estáveis na Física são aqueles em que pequenas modificações das condições iniciais produzem pequenos efeitos. Em oposição, sistemas dinâmicos instáveis são aqueles para os quais pequenas modificações da condição inicial produzem grandes efeitos.

No início da década de 1970, com o uso de computadores na ciência, tornou-se clara uma grande classe de comportamentos físicos que foi denominada *caos determinístico*, pois envolve a não-previsibilidade em sistemas deterministas. Esta situação surge para sistemas regidos por equações *não-lineares*, como as da atração gravitacional entre planetas. Henri Poincaré mostrou, em 1890, que o problema gravitacional dos três corpos apresenta soluções não-periódicas que apresentam extrema sensibilidade às condições iniciais. Em suas palavras:

Uma causa muito pequena que nos escapa determina um efeito considerável que não podemos deixar de ver; dizemos então que o efeito é devido ao acaso. Se soubéssemos exatamente as leis da natureza e a situação do universo no instante inicial, poderíamos prever exatamente a situação do mesmo universo em um momento posterior. Mas, mesmo que fosse o caso de as leis da natureza não serem segredo para nós, nós só poderíamos conhecer as condições iniciais *aproximadamente*. Se isto nos permitisse prever a situação posterior *com a mesma aproximação*, isso seria tudo o que quereríamos, e diríamos que o fenômeno foi previsto, que é governado por leis. Mas não é sempre assim: pode acontecer que pequenas diferenças nas condições iniciais engendrem [diferenças] muito grandes nos fenômenos finais; um pequeno erro nas primeiras produziriam um erro enorme nos últimos. A previsão se torna impossível e temos o fenômeno fortuito. (POINCARÉ, 1908, IV.2, p. 68-69).

Essa *sensibilidade extrema às condições iniciais* for redescoberta em 1963 pelo meteorologista norte-americano Edward Lorenz, ao utilizar um computador para gerar trajetórias para o sistema de equações não-lineares que propôs para descrever o movimento da atmosfera. O termo “efeito borboleta” foi cunhado para esta sensibilidade, a partir do título de uma palestra dada por ele: “O bater de asas de uma borboleta no Brasil pode provocar um tornado no Texas?” (GLEICK, 1990; PESSOA, 2019, seção XIV.5).

As equações desse tipo de sistemas instáveis são deterministas, no entanto geram comportamentos de aleatório. Em 1906, Duhem (2014, 2ª parte do Cap. III) mostrou que a noção de trajetória só é um modo de representação adequado se a trajetória permanecer a mesma quando modificamos ligeiramente as condições iniciais (PRIGOGINE, 2002, p. 95). É difícil descrever os sistemas caóticos em termos das trajetórias.

Consideremos o exemplo do cálculo das trajetórias de três corpos em interação, como Lua, Sol e Terra. Durante muito tempo julgava-se que as dificuldades de cálculo consistiam de um mero problema técnico. Apenas no final do século XIX, Henri Poincaré mostrou que os problemas são fundamentalmente diferentes, pois o problema de três corpos entram na categoria de sistemas instáveis. Estes exemplos servem de argumentos que justificam a extensão da dinâmica para incluir a instabilidade e a probabilidade (PRIGOGINE, 2002, p. 33-35).

Prigogine defende que é no nível estatístico que se devem formular as leis do caos. É costume representar os estados de um sistema por meio de suas posições q e momentos p , em um *espaço de fase*, em que não aparece explicitamente a variável tempo. Na descrição estatística introduzida por Gibbs e Einstein, em vez de estudar um único sistema, estuda-se uma coleção deles, um “*ensemble*”, “coletivo” ou “conjunto” que representa uma nuvem de pontos no espaço de fase. Tal nuvem é descrita por uma função de distribuição $\rho(q,p,t)$, interpretada como distribuição de probabilidade que muda com o tempo. Para os dois autores, a teoria de *ensembles* era apenas um instrumento de cálculo cômodo, tendo em vista nossa ignorância ou falta de informação a respeito das condições iniciais ou de outros detalhes do sistema.

No caso dos sistemas estáveis, as trajetórias individuais e de distribuição de probabilidade são equivalentes. Mas Prigogine (2002, p. 36) sugere que para sistemas

instáveis a descrição em termos de ensembles não pode ser substituída por um soma de sistemas individuais, e somente a descrição estatística pode descrever adequadamente as instabilidades que ele considera intrínsecas a esses tipos de sistemas. As leis do caos, associadas a uma descrição regular e preditiva dos sistemas caóticos, situam-se no nível estatístico. A instabilidade destruiria “a equivalência entre o nível individual e o nível estatístico, de sorte que as probabilidades ganham, então um significado intrínseco, irreduzível a uma interpretação em termos de ignorância ou de aproximação” (PRIGOGINE, 2002, p. 37). Para esta ideia, Prigogine e seu colega Bandyanath Misra introduziram o termo “intrinsecamente aleatório” em 1981.

Na formulação estatística de Prigogine e colaboradores, uma condição inicial não pode mais ser assimilada a um ponto no espaço de fase, mas apenas a uma região descrita por uma distribuição de probabilidade. Segundo Prigogine (2002, p. 39), trata-se de uma descrição “*não local*”, mas este termo parece estar sendo usado em um modo distinto daquele usado nos Fundamentos da Mecânica Quântica. Além dos sistemas instáveis apresentados aqui, existem outra classe chamados de “*não integráveis*”, que vamos apresentar a seguir.

Sistemas dinâmicos instáveis “não integráveis”. Em sistemas mais simples na Física Newtoniana, as equações de movimento são integráveis. Henri Poincaré definiu um sistema integrável da seguinte maneira:

Um sistema dinâmico integrável é um sistema cujas variáveis podem ser definidas de tal maneira que a energia potencial seja eliminada, ou seja, de maneira que seu comportamento se torne isomorfo ao de um sistema de partículas livres, sem interação. (PRIGOGINE, 2002, p. 41).

Em 1893, Poincaré mostrou que a maior parte dos sistemas dinâmicos é *não integrável*. Uma característica desses sistemas é a existência de *ressonâncias* entre os graus de liberdade do sistema, que inviabilizam a integração das equações.

Sessenta anos depois de Poincaré, seus trabalhos foram retomados por Kolmogorov, Arnold e Moser, sob a teoria denominada “KAM”. O teorema KAM examina se uma pequena perturbação em um sistema dinâmico pode levar a órbitas quase-periódicas. O resultado inicial foi obtido por Andrey Kolmogorov, em 1954. Em 1962, Jürgen Moser colocou a prova em bases mais rigorosas e a estendeu, e em 1963 Vladimir Arnold a estendeu para sistemas hamiltonianos analíticos.

A teoria KAM estuda a influência das ressonâncias sobre as trajetórias. As ressonâncias se caracterizam pelas frequências e essas assumem valores diferentes nos diferentes pontos de espaço das fases, de modo que certos pontos do espaço serão caracterizados pelas ressonâncias e outros não. Assim, haverá trajetórias normais, deterministas, e trajetórias aleatórias associadas a ressonâncias. A partir de um certo valor crítico de energia, o comportamento do sistema pode tornar-se caótico, e as trajetórias vizinhas divergem ao longo do tempo. Para Prigogine, as ressonâncias introduzem a incerteza no contexto da mecânica clássica, e acarretam na verdadeira ruptura do determinismo.

Em suma, para entender Prigogine, é preciso levar em conta o conceito de *instabilidade*, também entendido como flutuação, caos. A probabilidade é ligada à instabilidade. É a instabilidade que leva à extensão das leis da dinâmica (PRIGOGINE, 2011, p. 34). Para os sistemas instáveis, a probabilidade tem outra interpretação, irreduzível a nossas aproximações, ao caráter grosseiro das nossas descrições. Prigogine escreve que a noção de probabilidade introduzida empiricamente por Boltzmann foi um lance de audácia imensamente fértil. Mais de um século depois, estamos começando a compreender como ela emerge da dinâmica por meio instabilidade: esta destrói a equivalência entre o nível individual e o nível estatístico, de sorte que as probabilidades ganham então um significado intrínseco, irreduzível à interpretação em termos de

ignorância ou aproximação. (PRIGOGINE, 2011, p. 38). Nos sistemas instáveis, a instabilidade e a sensibilidade às condições iniciais transformam as trajetórias em idealização. Hoje, não temos mais medo da hipótese indeterminista. Ela é a consequência natural da teoria moderna da instabilidade do caos. E confere um significado diferente à flecha do tempo (PRIGOGINE, 2011, p. 60).

A irreversibilidade exige a extensão da dinâmica. [...] Eis aí um enunciado muito forte, que pode facilmente ser mal interpretado. Não se trata de sugerir que termos novos sejam acrescentados às equações da dinâmica. [...] É pela extensão da dinâmica a sistemas instáveis e caóticos que se torna possível superar a contradição entre as leis reversíveis da dinâmica e a descrição evolucionista associada à entropia. [...] Começamos a perceber os limites de validade dos conceitos fundamentais da física, como as trajetórias na mecânica clássica ou as funções de onda na mecânica quântica. Eles estão ligados às noções como instabilidade e caos [...] (PRIGOGINE, 2011, p. 30-31)

2. Estruturas Dissipativas e Não-Equilíbrio

Entre 1954 até 1977, as pesquisas de Prigogine e colaboradores descreveram matematicamente as “estruturas dissipativas”, baseando-se na Termodinâmica de *Não-Equilíbrio*. Prigogine procurou entender o papel construtivo da instabilidade, flutuações, desordem, nos sistemas vivos e nas reações químicas. Já mencionamos no Capítulo 1 o trabalho seminal com Paul Glansdorff, sobre uma extensão da Termodinâmica de Não-Equilíbrio às leis de transporte não-lineares, cujo objetivo era derivar um critério universal de evolução baseada na entropia (GLANSDORFF & PRIGOGINE, 1954, 1971). Mencionamos também o trabalho com Grégoire Nicolis sobre “estruturas dissipativas” associadas a processos de auto-organização no regime longe do equilíbrio (PRIGOGINE & NICOLIS, 1967; NICOLIS & PRIGOGINE, 1977).

Para entender as *estruturas dissipativas*, partamos da constatação de Prigogine segundo a qual a matéria se comporta de maneira diferente em condições de não equilíbrio, em que fenômenos irreversíveis são importantes. A formação das estruturas

dissipativas só acontece quando o sistema dissipa energia e permanece em interação com o mundo exterior, em contraposição com estruturas de equilíbrio, que são ordenadas mas “mortas”, como cristais, que não dissipam energia (PRIGOGINE, 2002, p. 21). A estrutura dissipativa é um sistema onde energia ou matéria flui continuamente através dele, mas de forma estacionária, em um processo chamado de “auto-organização”.

As estruturas dissipativas são muito estudadas nas áreas de hidrodinâmica, cinética química e óptica do laser. Um exemplo clássico de um sistema ordenado em um regime afastado do equilíbrio é a chamada “instabilidade de Bénard”. O físico francês Henri Bénard (1874-1939), no ano de 1900, descobriu que, ao aquecer por baixo uma fina camada de líquido, estruturas ordenadas apareciam, com um padrão hexagonal (vistos de cima), enquanto o líquido mais quente sobe por convecção e o líquido mais frio desce para o fundo onde se reaquece, para subir depois de novo (Fig. 1).

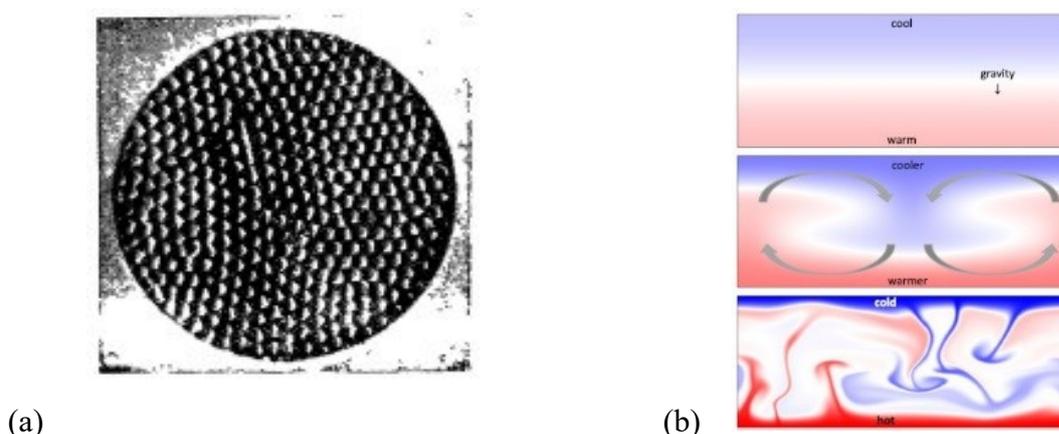


Figura 1. (a) Células convectivas fotografadas de cima (BÉNARD, 1901, p. 258). (b) Simulação computacional em duas dimensões do escoamento do fluido em três regimes diferentes, conforme a diferença de temperatura entre a face de cima e a de baixo. Em cima, só há condução de calor; no meio instaura-se a convecção, formando rolos de convecção (as células de Bénard); embaixo, com a diferença de temperatura maior, instaura-se o regime de convecção turbulenta (DOERING, 2020, p. 9672).

Em 1912, Lord Rayleigh (1842-1919) apresentou o primeiro modelo matemático para o fenômeno, de maneira que em países de língua inglesa passou-se a chamar esta

estrutura dissipativa de “célula de Rayleigh-Bénard”, ou simplesmente “célula de RB”. À medida que a diferença de temperatura entre as faces vai aumentando, o líquido passa do regime de condução térmica, sem células, para o regime em que aparecem as células. Este ponto crítico apresenta uma *bifurcação* (Fig. 2), pois há dois estados que podem surgir e se estabilizar, dependendo de se o rolo das células se dá no sentido horário ou anti-horário (PRIGOGINE, 2002, p. 22).

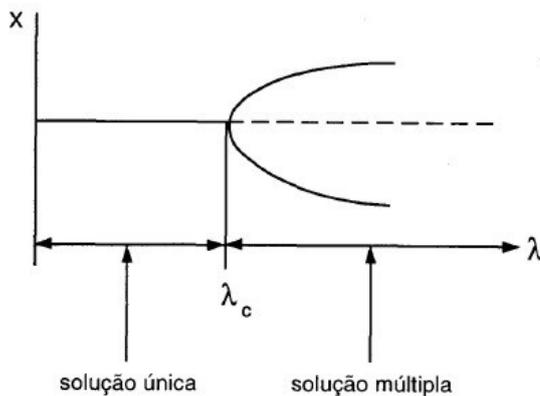


Figura 2: Representação de uma bifurcação, variando-se o parâmetro de ordem λ , que no caso da célula de RB é a diferença de temperatura (PRIGOGINE, 2002, p. 23).

Outro experimento descrito como uma estrutura dissipativa é a reação autocatalítica de Belousov-Zhabotinski, envolvendo oscilações químicas que se produzem em fase líquida longe de equilíbrio. “Bilhões de moléculas evoluem juntas, e essa coerência se manifesta pela mudança de cor da solução. Isto significa que correlações de longo alcance aparecem em condições de não equilíbrio, correlações que não existem no equilíbrio. Essa sensibilidade da matéria a si mesma e a seu ambiente, está ligada à dissipação associada aos processos irreversíveis” (PRIGOGINE, 2011, p. 70-71).

3. Produção de Entropia em Sistemas Longe do Equilíbrio

Para um sistema isolado, a entropia S tende para um valor máximo, exprimindo o fenômeno da irreversibilidade na Termodinâmica de sistemas em equilíbrio: $dS > 0$.

Quando o sistema troca energia ou matéria com o ambiente, a estratégia inaugurada por De Donder é assim descrita por Prigogine:

Temos, então, de distinguir dois termos na variação de entropia dS : o primeiro, d_eS , descreve a transferência de entropia através das fronteiras do sistema, esse termo podendo ser positivo ou negativo, conforme o tipo de troca; o segundo d_iS , é a entropia produzida no interior do sistema. Consequentemente, podemos escrever $dS = d_eS + d_iS$. O segundo princípio da termodinâmica afirma que, sejam quais forem as condições nos limites, a produção de entropia d_iS é positiva (ou nula no equilíbrio). Os processos irreversíveis criam entropia. (PRIGOGINE, 2011, p. 63)

No estado estacionário de equilíbrio, a produção da entropia é nula, e no regime linear, próximo do equilíbrio, ela assume um valor mínimo, o que garante a regressão das flutuações. Já em situações longe do equilíbrio, como ocorre na célula de RB, o estado estacionário pode exibir uma maior “complexidade”, exibindo ordem espacial e temporal (PRIGOGINE, 2011, p. 67).

Esta abordagem de físico-químico belga (PRIGOGINE, 1955) foi recebida com críticas por boa parte da comunidade de físicos estatísticos, que insistiam que a Termodinâmica deveria se ater apenas a situações de equilíbrio (ver críticas que o “maior especialista na matéria” fez a ele em um congresso em 1946, em PRIGOGINE, 2002, p. 64). Nosso autor também foi influenciado pelo livro de Erwin Schrödinger, *O que é a vida?*, publicado em 1945. Segundo o físico austríaco, a vida nutre-se de um fluxo entrópico negativo. Este é também o ponto de vista de Prigogine, de que a vida se acha associada à produção de entropia, e portanto a processos irreversíveis (PRIGOGINE, 2011, p. 65). Ele exprime da seguinte maneira a descoberta principal do seu trabalho com Glansdorff (GLANSDORFF & PRIGOGINE, 1954):

Chegamos a um resultado surpreendente: contrariamente aos sistemas quer em equilíbrio, quer próximos do equilíbrio, os sistemas longe do equilíbrio não levam a um extremo de uma função, tal como a energia livre ou a produção de entropia. Consequentemente, não é mais certo que as flutuações sejam amortecidas. É somente possível formular as condições *suficientes* de estabilidade, a que demos o nome de “critério geral de evolução”. (PRIGOGINE, 2011, p. 67-68)

Convém notar que as flutuações exercem um papel fundamental nos processos de formação das estruturas dissipativas. Elas são essenciais nos pontos de bifurcações. Elas forçam a abandonar a descrição determinista que se aplica à termodinâmica de equilíbrio. Sob a sua influência, o sistema escolhe, um dos possíveis regimes de funcionamento longe de equilíbrio. São as flutuações que decidem qual será escolhida. Elas levam o sistema quer para ramificação A ou B. As bifurcações são verdadeiras fontes de quebra de simetria e de comportamento probabilista.

Prigogine ressalta a convergência entre os resultados da termodinâmica de não equilíbrio e as filosofias de Bergson ou Whitehead. Afirma Prigogine:

O possível é mais rico que o real. A natureza apresenta-nos, de fato, a imagem da criação, da imprevisível novidade. Nosso universo seguiu um caminho de bifurcações sucessivas: poderia ter seguido outros. Talvez possamos dizer o mesmo sobre a vida de cada um de nós. (PRIGOGINE, 2011, p. 75)

Capítulo 4:

A Visão Filosófica de Prigogine

1. Início da Reflexão Filosófica

Neste capítulo, tentaremos apresentar os fundamentos filosóficos das ideias de Prigogine e a pertinência de sua contribuição na filosofia.

O ano de 1977, em que Prigogine ganhou o prêmio Nobel de química, constitui um divisor de águas na carreira de Ilya Prigogine como cientista e filósofo, marcando o fim das pesquisas intensas na área da física e química e a abertura para questões de filosofia, cosmologia e divulgação científica. A partir de então, ele ganhou uma grande popularidade e com isso passou a promover suas ideias e as da ciência em geral. Ele se tornou um viajante incansável, divulgando suas ideias em várias partes do mundo. Além de publicações de livros gerais, se multiplicam as entrevistas na imprensa escrita e na televisão, tanto na Bélgica como no estrangeiro. O objetivo desta atividade era a propagação das suas ideias científicas no exterior da esfera limitada dos químicos e físicos.

A fonte principal das ideias filosóficas de Prigogine, que serão tomadas neste capítulo, são suas entrevistas na imprensa escrita e na televisão – estas atualmente disponíveis no youtube –, nos livros de caráter filosófico e nos comentários dos outros autores. No início de seus trabalhos filosóficos, Prigogine foi apoiado por sua antiga aluna e discípula filósofa, Isabelle Stengers, e com sua colaboração nasceu o primeiro livro de divulgação, *A nova aliança* (PRIGOGINE & STENGERS, 1991), originalmente em francês, em 1979. Este livro foi um campeão de vendas, muitas vezes reeditado e traduzido em muitas línguas. À sua publicação seguiu-se uma série de obras gerais, que

tiveram o mesmo sucesso: em 1988, *Entre o tempo e a eternidade* (PRIGOGINE & STENGERS, 1992); em 1994, *As leis do caos* (PRIGOGINE, 2002); e em 1996, *O fim das certezas* (PRIGOGINE, 2011).

A observação geral a ser feita em todas as obras de divulgação de Prigogine é que ele retoma e repete as mesmas ideias. *O fim das certezas* é o livro que resume e retoma as ideias apresentadas nos demais. Além dos livros, Prigogine retomou muitas vezes as mesmas ideias nas suas entrevistas.

As ideias filosóficas de Prigogine têm por fundamento as pesquisas científicas na Física e na Química, que vimos em capítulos anteriores, mas também dialogou com as áreas da Biologia, Cosmologia e Ciências Humanas. Dentre suas influências filosóficas, quem mais impressionava Prigogine em seu início de carreira foi Henri Bergson, o qual continuou a citar até no final da sua vida. Isso se manifestou em seu interesse constante na questão do tempo.

2. Física Clássica: uma herança insatisfatória

A insatisfação profunda para com a ciência clássica (o que inclui a Teoria da Relatividade e a Mecânica Quântica) constitui o ponto de partida do questionamento filosófico de Prigogine. E no livro *A nova aliança*, Prigogine & Stengers (1991, p. 21) anunciam uma nova “metamorfose da ciência”, que resolveria os problemas da ciência clássica relacionados ao determinismo, reversibilidade e simetria temporal. Tais colocações são também esmiuçadas em uma entrevista televisada sobre o valor da ciência clássica (PRIGOGINE, 1997). As grandes conquistas da Física Clássica trazem diversas interrogações, a principal girando em torno da concepção determinístico-reversível das leis da física e do próprio universo. Um universo determinista seria um universo mecânico, pré-definido, sem flecha do tempo ou irreversibilidade. A ciência parece criar

um abismo com a realidade das coisas e do homem. Em suma, a ciência clássica faria uma descrição inadequada da natureza, afastando o ser humano da natureza.

Segundo os autores, a principal consequência negativa da ciência galileana-newtoniana foi de negar a dimensão temporal do universo, negando o devir biológico, a evolução das sociedades etc. A dimensão atemporal do mundo significa também uma concepção mecanizada, reversível, sem evolução, sem seta do tempo (PRIGOGINE & STENGERS, 1991, p. 26). Citam o historiador da ciência Alexandre Koyré para salientar a separação que se seguiu entre o ser humano e a natureza:

[Newton substituiu] o nosso mundo de qualidades e percepções sensíveis, mundo no qual vivemos, amamos e morremos, por um outro mundo: o da quantidade, da geometria deificada, no qual há lugar para tudo menos para o homem. Assim, o mundo da ciência – o mundo real – se afastou e se separou do mundo da vida, que a ciência foi incapaz de explicar [...] Na realidade, estes dois mundos estão sempre – e cada vez mais – unidos pela práxis. Mas teoricamente, estão separados por um abismo. É nisto que consiste a tragédia do espírito moderno que desvendou o enigma do Universo, mas apenas para substituí-lo por um outro: o enigma de si próprio. (KOYRÉ, 1968, p. 42-43, apud PRIGOGINE & STENGERS, 1991, p. 24-25)

O que teria levado a ciência clássica a se fundar em um modelo determinista do universo? Antes de mais nada, convém dizer que a noção das “leis da natureza”, como afirma Prigogine, é específica da cultura ocidental. Atrás da formulação dessas leis há uma transposição teológica, pois, para Deus não há incerteza. Formulando as leis da natureza como tais, o ser humano se aproximava à maneira divina, levando à ideia de uma natureza como autômato, cujo legislador seria o próprio Deus (PRIGOGINE & STENGERS, 1991, p. 34).

A ciência clássica triunfante, que fez a descoberta das leis do movimento dos corpos terrestres e celestes, acredita ter demonstrado que a natureza é simples, transparente e sem mistérios. As leis da natureza enunciadas pela física são da esfera de um

conhecimento ideal que quer alcançar a certeza. Uma vez que as condições iniciais são dadas, tudo é determinado. A natureza seria um autômato que podemos controlar, pelo menos em princípio. A novidade, a escolha, a atividade espontânea são apenas aparências, relativas ao ponto visto humano (PRIGOGINE, 2011, p. 20). Em suma: para a Física Clássica o universo é determinista, reversível e atemporal, ao passo que por toda parte se vê flutuações, instabilidade e evolução.

3. Dilema do Determinismo

O universo é regido por leis deterministas? O futuro é dado ou está em perpétua construção? A liberdade humana é uma ilusão? O homem está separado do mundo? Tais são os questionamentos formulados por Ilya Prigogine e que estão no centro da nossa análise.

Prigogine aceita a análise feita pelos filósofos William James e Karl Popper, de que há um “dilema do determinismo” (nas palavras de James), que é a tensão entre a explicação causal do mundo e nossa sensação subjetiva de liberdade (PRIGOGINE, 2011, p. 9). Prigogine considera que o determinismo é alienante, pois sugere que nós seríamos meros marionetes de leis cegas da natureza (PRIGOGINE, 1997). O dilema do determinismo está ligado também à questão do ser humano, especificamente, ao conceito da liberdade humana entendida como liberdade de decisão, fundamental para o conceito de democracia. No mundo determinista, a noção dos valores não tem sentido, pois os valores implicam a escolha, a liberdade, a ética. O determinismo contradiz liberdade humana.

O determinismo constitui um desafio quanto à relação do homem com o mundo e particularmente com o tempo. É por isso que Prigogine & Stengers (1991), em *A nova aliança*, criticam a tese clássica de que a natureza esteja essencialmente submetida a um

determinismo imutável. A natureza inventa, nela nada seria reversível. A sua dimensão temporal está longe de se esgotar na concepção matemática de um tempo absoluto, como aquela, abstrata, da mecânica clássica. (SPIRE, 2001, p. 9).

O ponto de vista de Prigogine inscreve-se antes de tudo na perspectiva indeterminista. Assim escreve:

Hoje, não temos mais medo da “hipótese indeterminista”. Ela é a consequência natural da teoria moderna da instabilidade e do caos. E confere um significado físico fundamental à flecha do tempo, sem a qual somos incapazes de compreender os dois principais caracteres da natureza: sua unidade e sua diversidade”. (PRIGOGINE, 2011, p. 60)

A rejeição de Prigogine ao determinismo se baseia na instabilidade e no caos, e se desdobra na flecha do tempo e na evolução, A aleatoriedade de muitos fenômenos naturais e a liberdade do homem seriam então partes integrantes do universo. Prigogine postula que a instabilidade é uma propriedade intrínseca do universo.

Na Antiguidade, a questão do determinismo foi levantada pelo filósofo romano atomista Lucrécio, em sua obra *De rerum natura*. Diante de uma concepção de mundo determinista, envolvendo átomos que originalmente cairiam todos em uma mesma direção e com a mesma velocidade, como teria sido possível a geração de colisões entre eles? Epicuro, atomista anterior a Lucrécio, imaginou que deveria haver uma perturbação imprevisível que mudasse as posições e velocidades desses átomos, gerando as primeiras colisões, fenômeno este que chamou de *clinamen* (PRIGOGINE, 2011, p. 18). Com hipótese do *clinamen*, Epicuro e Lucrécio tentaram superar a questão do determinismo, incluindo processos indeterministas como algo real e presente no universo. O indeterminismo seria assim consequência de uma instabilidade natural intrínseca. Tal concepção de processos aleatórios retornaria com a Física Quântica, por exemplo a partir

do trabalho de Einstein em 1916, sobre emissão espontânea de fótons (PRIGOGINE, 2002, p.14).

O papel da instabilidade aparece nos sistemas dinâmicos caóticos. A característica dos sistemas caóticos é que as trajetórias que correspondem às condições iniciais tão próximas quanto quisermos divergem de maneira exponencial ao longo do tempo. Fala-se então em sensibilidade extrema às condições iniciais, como no “efeito borboleta”. As equações usadas para descrever sistemas caóticos são deterministas, mas geram comportamento imprevisível. Para Prigogine, o mais adequado seria descrever esses sistemas de maneira probabilista, afirmando que “trata-se de uma formulação da dinâmica no nível estatístico que não tem equivalente em termos de trajetórias” (PRIGOGINE, 2011, p. 41).

Outro desenvolvimento que mostraria os limites do determinismo é a Termodinâmica de não equilíbrio, área na qual Prigogine foi um dos pioneiros. As estruturas dissipativas descritas por esta abordagem dependem de flutuações para “escolher” qual de dois ou mais caminhos seguir, nos pontos de bifurcação (como nas células de Rayleigh-Bénard, que vimos na seção 3.2, que podem girar em um ou outro sentido).

As instabilidades associadas às flutuações são responsáveis pela formação de novas bifurcações, do aparecimento de novos estados. Assim, a matéria “escolhe” possíveis regimes do futuro, a matéria se auto-organiza. Auto-organização da matéria é um fenômeno irreversível, probabilista, que segundo Prigogine nos força a abandonar a descrição determinista que se aplica à termodinâmica de equilíbrio. Os sistemas mais complexos no universo se realizam longe do equilíbrio. Como afirma Prigogine, toda a química é irreversível, a formação das estruturas biológicas são fenômenos irreversíveis, a evolução biológica de todos os corpos vivos é irreversível.

4. O Paradoxo do Tempo

A questão do tempo, como dimensão fundamental da nossa existência, está no centro das investigações científicas de Prigogine. O que ele chamou de *paradoxo do tempo* é a questão de “como poderia a flecha do tempo emergir de um mundo a que a física atribui uma simetria temporal” (PRIGOGINE, 2011, p. 10). Na sua autobiografia ele afirma que sempre foi atraído por tudo que tivesse ligação com o tempo (PRIGOGINE, 1993). Afinal, o que representa o tempo para Prigogine? Como entendê-lo em relação ao conjunto das suas ideias científicas?

Já fizemos uma introdução aos debates sobre a filosofia do tempo, na seção 2.1. Prigogine salienta duas perspectivas opostas à questão: a de Newton e a de Bergson. Para o primeiro, “o tempo é absoluto, real e matemático, por si só e por própria natureza, flui uniformemente, sem relação com qualquer coisa externa” (NEWTON, 2008, p. 45). Segundo a Mecânica, basta especificar as condições iniciais e de contorno do sistema para calcular a posição deste sistema em qualquer instante no futuro, e também do passado. Segundo esta formulação, “tudo é dado”, ao passo que na formulação de Bergson coloca-se o extremo oposto:

O universo dura. Quanto mais aprofundarmos a natureza do tempo, melhor compreenderemos que duração significa invenção, criação de formas, elaboração contínua do absolutamente novo. (BERGSON, 2005, p. 12).

No artigo “O possível e o real”, Bergson se pergunta:

Para que serve o tempo? [...] o tempo é aquilo que impede que tudo seja dado de um só golpe. Ele retarda ou, melhor, ele é retardamento. Ele deve portanto ser elaboração. Não seria ele então veículo de criação e de escolha? A existência do tempo não provaria que há indeterminação nas coisas? (BERGSON, 2006, p. 106).

Mesmo que chocado por esta oposição, a concepção de Bergson deixou em Prigogine uma marca indelével, após ter lido na juventude a *Evolução criadora*. Prigogine considera as perspectivas de Bergson e de Mach (que apresentamos na seção 2.1) mais próximas da realidade do que a de Newton.

Na Seções 2.1 e 2.6, vimos como Boltzmann articulou que a entropia do universo aumenta para o equilíbrio termodinâmico. Se o tempo for relativo ao movimento dos corpos, então segue-se que a “flecha do tempo” ruma em um sentido único. Problemas conceituais surgiriam quando o Universo atinge seu estado de entropia máxima, e a possibilidade prevista por Boltzmann de flutuações que diminuem a entropia trouxe paradoxos para a flecha do tempo. Prigogine quer evitar tais paradoxos abandonando a concepção probabilista de entropia de Boltzmann, e associando a irreversibilidade a processos microscópicos, evitando assim a possibilidade de inversão da flecha:

[...] nenhum saber afirmou alguma vez a equivalência entre o que se faz e o que se desfaz, entre uma planta que brota, floresce e morre, e uma planta que ressuscita, rejuvenesce e volta para semente primitiva, entre um homem que amadurece e aprende e um homem que se torna progressivamente criança, embrião e célula”. (PRIGOGINE & STENGERS, 1992, p. 29).

A expressão “seta do tempo” (ou flecha do tempo) foi cunhada pelo astrônomo Arthur Eddington: “Usarei a frase ‘seta do tempo’ [*time’s arrow*] para expressar esta propriedade unidirecional do tempo, que não tem um análogo no espaço” (EDDINGTON, 1929, p. 69). A seta do tempo é a intuição segundo a qual o tempo corre do passado para o futuro.

O que Prigogine quer adicionar a esta noção é de que o tempo envolve novidade, criação, evolução. Isso deveria ser evidente em um universo em permanente evolução. Afirma assim o “devenir” ou “vir-a-ser” (*becoming*) e não somente o ser. Isso está associado

ao mundo de movimentos irregulares, caóticos, um mundo mais próximo do imaginado pelos atomistas antigos do que das orbitas newtonianas.

Para Boltzmann, o século XIX foi o século de Darwin, momento em que a vida passou a ser concebida como fruto de um processo contínuo de evolução, em que o devir passou novamente a ser posto no centro de nossa compreensão da natureza. Na análise de Prigogine, Boltzmann teria compartilhado com Darwin o método populacional de análise, mas “fracassado” em sua tentativa de introduzir a dimensão evolutiva na física, como Darwin fizera na Biologia (PRIGOGINE, 2011, p. 26). De fato, Boltzmann concluiu que “a irreversibilidade é uma ilusão”, como escreve Prigogine, mas considerar que isso foi um “fracasso” só faz sentido para quem discorda das conclusões de Boltzmann.

Um ponto interessante sublinhado por Prigogine é a diferença entre um relógio entrópico e um relógio mecânico. Consideramos duas amostras de uma mesma mistura de dois gases, contendo monóxido de carbono CO e oxigênio O₂. A reação química entre eles produz o dióxido de carbono, CO₂, sendo catalisada por superfícies metálicas. Se introduzimos o catalisador numa das amostras e não na outra, ao compará-las depois um dado tempo, as respectivas composições serão diferentes. A entropia produzida na amostra munida de superfície catalítica terá sido maior, pois essa produção se deve à reação química. Se associarmos a produção de entropia ao fluxo do tempo, este terá sido diferente nas duas amostras (PRIGOGINE, 2011, p. 164).

Por outro lado, a Teoria da Relatividade prevê que o tempo registrado por um relógio mecânico poderá ser diferente de outro, conforme as acelerações sofridas pelos relógios. Isso é exemplificado pelo famoso experimento mental dos gêmeos viajantes. Vemos assim que num mesmo universo, o fluxo de tempo não é único. Em sua discussão sobre Cosmologia, Prigogine descreve a teoria que é mais aceita, a do *Big bang*, segundo a qual o Universo teve início em uma espécie de explosão, onde foram criados não só o

espaço e a matéria, mas também o tempo. No entanto, a questão do “início do tempo” é bastante paradoxal. Sendo assim, Prigogine propõe que o *Big bang* não é uma “singularidade” no tecido do espaço-tempo, mas sim uma *instabilidade* em um pré-universo, constituindo assim um processo irreversível. Nesse sentido, as estruturas dissipativas e auto-organização encontrariam um análogo cosmológico. (PRIGOGINE, 2011, p. 171).

Capítulo 5:

Discussão Crítica das Ideias de Prigogine

1. O Discurso de Prigogine

Ilya Prigogine é um cientista que divide opiniões. Há aqueles que gostam muito do seu discurso de que uma nova revolução científica está surgindo, baseado no reconhecimento das instabilidades aleatórias: “Pensamos situar-nos hoje num ponto crucial dessa aventura, no ponto de partida de uma nova racionalidade que não mais identifica ciência e certeza, probabilidade e ignorância” (PRIGOGINE, 2002, p. 14). Há outros cientistas, especialmente físicos, que criticam esta postura de Prigogine & Stengers, de anunciarem uma nova aliança: “O tempo hoje reencontrado é também o tempo que não fala mais de solidão, mas sim da aliança do homem com a natureza que ele descreve” (PRIGOGINE & STENGERS, 1991, p. 15).

Em seu discurso de divulgação científica sobre as estruturas dissipativas, Prigogine usa metáforas curiosas, como a de uma molécula que deixa de ser cega e passa a conseguir “ver” o comportamento coletivo do sistema:

Quero assinalar que a matéria em situação de equilíbrio é cega, cada molécula só vê as moléculas mais próximas que a rodeiam. O não-equilíbrio, pelo contrário, leva a matéria a “ver”; eis que surge então uma nova coerência (PRIGOGINE, 2002, p. 22; ver também PRIGOGINE, 2011, p. 71)

A submissão da natureza a leis deterministas, feitas pela Física Clássica, aproximava o conhecimento humano do ponto de vista divino atemporal (PRIGOGINE, 2011, p. 20). Esse modelo aproxima a natureza a um autômato, sem mistério, tranquila, estática. Prigogine não aceita essa visão de universo determinista, vendo que em todos os níveis, tanto o da cosmologia, da geologia, quanto no da biologia ou da sociedade, o

caráter evolutivo da realidade se afirma cada vez mais, fato que para ele escapa ao determinismo universal. (PRIGOGINE, 2011, p. 18). Pretendendo superar essa visão clássica do mundo, Prigogine propõe uma mais ampla que contenha as leis de Newton e também a vida. É nisso que consiste a reformulação das leis fundamentais, incorporando em nossas leis físicas a dimensão evolutiva, sem a qual estamos condenados a uma concepção insuficiente da realidade (PRIGOGINE, 2011, p. 24). O “salto do newtonianismo ao prigoginiano” (na expressão de Alvin Toffler, no prefácio para a edição em inglês de *A nova aliança*) não significa modificar as leis de Newton, mas incorporar na noção de leis da natureza a dimensão da novidade e criatividade, devidas à instabilidade geral no universo.

No prosseguimento do trabalho, pretendemos analisar este debate, tentando entender o sucesso de Prigogine entre largos setores da ciência e da divulgação científica, mas também as críticas feitas de dentro da comunidade dos físicos. Podemos chamar este debate de uma “controvérsia científica”: argumentaremos que ela expõe duas *interpretações* diferentes a respeito da Mecânica Estatística.

Iremos agora discutir algumas avaliações críticas às teses filosóficas de Prigogine. Iniciaremos com a forte crítica feita por alguns físicos, como Marcel Novaes, Jean Bricmont e Heinz Pagels. Depois consideraremos sua recepção na Filosofia da Ciência, com os comentários de Robert Bishop, Robert Batterman e Olimpia Lombardi.

2. A Crítica de Marcel Novaes

Em 2010, baseando-se num artigo de divulgação científica escrito por Neusa Massoni, pesquisadora gaúcha da área de Ensino de Física, na *Revista Brasileira de Ensino de Física*, em 2009, sobre as ideias filosóficas de Prigogine, Marcel Novaes, físico

trabalhando então na Universidade Federal de São Carlos, formulou uma avaliação crítica relativa ao edifício científico construído por Prigogine.

De maneira geral, a crítica de Novaes é de que o tom geral do artigo de Massoni sobre Prigogine é demasiado entusiasmado e laudatório. Como exemplo, ele cita (NOVAES, 2010, p. 1) o seguinte trecho de Massoni (2009, p. 1): “Suas ideias inovadoras nos levam a repensar o papel do nosso tempo, a nossa visão sobre o conhecimento e, particularmente, sobre as leis fundamentais da física que buscam explicar o universo”. Novaes não considera que as teses prigoginianas sobre o tempo sejam importantes, e nem que ele tenha feito uma reformulação das leis fundamentais da física.

Convém entender que a crítica do Novaes atinge tanto Prigogine como Massoni, que faz o papel de embaixadora de Prigogine. Novaes critica a falta de modéstia e a ambição exorbitante de Prigogine, como no seguinte trecho de *O fim das certezas*: “A ambição deste livro é apresentar essa transformação das leis da física e, portanto, de toda a nossa descrição da natureza” (PRIGOGINE, 2011, p. 12). Para Novaes, Prigogine se passava por um tipo de guru que pretendia mostrar, com base em evidência, que a ciência estava passando para um novo paradigma no qual o determinismo encontrar-se-ia superado.

Novaes reconhece o grande mérito de Prigogine em relação aos seus trabalhos em Termodinâmica de Não Equilíbrio, desenvolvidos nas décadas de 1950-60. Mas quanto às suas ideias filosóficas, elas não teriam aceitação unânime entre os especialistas, tendo sido mais ignoradas do que criticadas. O autor agrupa sua crítica em três níveis: a motivação de Prigogine, sua pretensa revolução, e as conclusões a que chega.

Sobre a motivação de Prigogine, a preocupação central do químico belga foi trabalhar com o problema da irreversibilidade, ou seja, na reconciliação dos fenômenos

irreversíveis observados no mundo macroscópico com as equações reversíveis da dinâmica clássica microscópica. Novaes considera que essa preocupação é anacrônica, pois já foi resolvida por Boltzmann pela mecânica estatística há mais de um século, mostrando que o movimento microscópico é sempre reversível e determinístico enquanto macroscopicamente pode-se observar a tendência irreversível ao equilíbrio, pelo fato de que há uma grande diferença de escala e as variáveis em jogo são completamente distintas (ver discussão feita na nossa seção 2.6). Mas Prigogine não se contenta com a explicação probabilística de Boltzmann, pois, para ele, a interpretação probabilística faz da irreversibilidade macroscópica uma ilusão (NOVAES, 2010, p. 2).

Contrariamente a Prigogine, Novaes aceita que o mundo da Física Clássica seja determinístico e simétrico. Como Prigogine quer invalidar essa visão, ele tem que buscar revolucionar a Mecânica Clássica. Isso é feito propondo que a descrição estatística da Mecânica Clássica, em termos da teoria dos *ensembles* (coletivos) de Gibbs e Einstein, é uma descrição fundamental da natureza, baseada na equação de evolução da função de distribuição de Liouville. Segundo Prigogine, como é impossível determinar as trajetórias individuais de partículas em um sistema de muitos corpos, devemos nos satisfazer em examinar o comportamento do conjunto das trajetórias, utilizando assim a metodologia da Mecânica Estatística.. Mais do que isso, para Prigogine a descrição probabilista é mais rica que a descrição individual: “A equivalência entre o nível individual e o nível estatístico é totalmente destruída. Chegamos, para as distribuições de probabilidade, a soluções novas *irreduzíveis*, no sentido de que não se aplicam às trajetórias individuais” (PRIGOGINE, 2011, p. 39).

Por um lado, a concepção tradicional da Mecânica Estatística, defendida por Novaes, salienta que “o uso de probabilidades neste contexto se deve unicamente à impossibilidade prática de se determinar a posição do sistema com precisão infinita”

(NOVAES, 2010, p. 2). A discordância entre Novaes e Prigogine é filosófica, baseada em diferentes interpretações do formalismo da Mecânica Estatística Clássica. Como Novaes bem coloca, Prigogine “quer uma teoria na qual a evolução para o equilíbrio seja realmente, mecanicamente, microscopicamente, irreversível” (p. 2). Assim, o físico-químico belga interpreta a moderna teoria de sistemas dinâmicos e sua descrição do “caos determinístico” como inaugurando uma nova Física fundamentalmente indeterminista e irreversível. E critica a interpretação convencional, boltzmanniana, “que implica que nossa ignorância, o caráter grosseiro de nossas descrições, sejam reponsáveis pelo segundo princípio” da Termodinâmica (PRIGOGINE, 2011, p. 28, citado por Novaes, p. 2).

Por outro lado, Novaes critica Prigogine por anunciar a si mesmo como o arauto da uma nova revolução científica:

Nada disso foi desenvolvido por Prigogine e infelizmente acho que ele é muito pouco claro nesse aspecto. Em muitas passagens ele dá a entender que a irreversibilidade da evolução de funções de probabilidade suaves em sistemas caóticos é uma descoberta sua. Não é. (NOVAES, 2010, p. 3)

É desta teoria sobre a Mecânica Estatística que se articula crítica de Novaes. Ele critica Prigogine por defender uma irreversibilidade microscópica que seria fruto da dinâmica caótica. “Assim, supostamente redescobrimos o tempo, as ‘leis do caos’ (título de um de seus livros) e fazemos uma ‘nova aliança’ (título de outro livro; todos eles parecem ser mais ou menos equivalentes) com a natureza” (NOVAES, 2010, p. 3). Como já salientado, a posição de Prigogine é de que a descrição em termos em ensembles e distribuições de probabilidade é mais fundamental do que a descrição em termos de trajetórias individuais. Novaes considera tais conclusões de Prigogine errôneas. Ele rejeita os pensamentos de Prigogine, segundo os quais precisamos de uma nova

formulação das leis fundamentais da física: “A ideia de que a descrição probabilista é a mais fundamental simplesmente não faz sentido” (p. 3).

Contrariamente a Prigogine, Novaes considera a descrição em termos de trajetória como correta e a descrição estatística como optativa, devida a nossa ignorância quanto às condições iniciais. Na conclusão, o crítico reconhece os méritos e as contribuições de Prigogine na Termodinâmica de Não-Equilíbrio, e elogia três de seus livros mais antigos (PRIGOGINE, 1962, 1967; NICOLIS & PRIGOGINE, 1977). Porém:

Suas elucubrações filosóficas acerca do tempo e das leis da natureza, em particular a relação entre caos, irreversibilidade e a “flecha do tempo”, têm uma importância muito menor do que sua aceitação ampla e acrítica em certos círculos leva a crer” (NOVAES, 2010, p. 4).

Novaes afirma que as ideias filosóficas de Prigogine são apenas retórica que atraem os leigos interessados, de áreas de ciências sociais, filosofia, biologia etc., e passam uma imagem errada do determinismo e do tempo, como concebidos pelos físicos. Enfim, ele conclui que os temas de discussão que Prigogine coloca são realmente interessantes, porém, ele não é um bom guia, nem seus livros as melhores fontes de estudo.

Tecerei agora alguns comentários sobre esta avaliação de Marcel Novaes, cujas críticas são de ordem ética, epistemológica e filosófica.

Um primeiro ponto é a observação de Novaes de que as ideias filosóficas de Prigogine estão longe de encontrar aceitação unânime ou geral entre os especialistas. Ora, mas “unanimidade de aceitação” nunca foi próprio da filosofia. A filosofia pode ser entendida como uma busca incessante pela verdade, e não a posse da verdade; ela não aspira à unanimidade, mas ao diálogo constante. A falta de aceitação unânime não significa que o pensamento não seja defensável.

Um segundo ponto envolve a questão do determinismo e das trajetórias bem definidas, que Prigogine tende a abolir da microfísica, substituindo pela descrição em termos de *ensembles*. Novaes adota uma postura que considera que a teoria dos *ensembles*, desenvolvida por Gibbs e Einstein, se fundamenta em trajetórias reais e deterministas, mas desconhecidas pelo observador humano. Nesse sentido, a probabilidade traduz nossa ignorância quanto aos detalhes do sistema, e no caso do caos determinístico, das condições iniciais precisas. A descrição em termos de trajetórias individuais seria mais rica do que em termos de probabilidades. Em *O fim das certezas*, Prigogine concorda que a teoria de coletivos ou dos *ensembles* era apenas instrumento de cálculo cômodo para Gibbs e Einstein, e que as probabilidades traduziam a falta de informação. Na dinâmica clássica, era evidente que o estudo das trajetórias individuais e o das distribuições de probabilidade davam na mesma. Porém, Prigogine vai mais longe e argumenta que existem situações diferentes das que Marcel menciona, envolvendo sistemas dinâmicos estáveis em que a questão da irreversibilidade não se coloca. Esses casos diferentes envolvem sistemas instáveis, longe do equilíbrio. Fica evidente que todas as teorias que dizem respeito aos processos irreversíveis, como a teoria cinética de Boltzmann, que permite calcular corretamente a difusão em gases e a condutividade térmica, tratam de probabilidades e não de trajetórias (PRIGOGINE, 2011, p. 35-36). Nessa perspectiva, Prigogine e seu colega Bhiva Misra introduziram a expressão “intrinsecamente aleatório” para designar essa situação em que as probabilidades ganham um significado irreduzível. No caso de sistemas com sensibilidade extrema às condições iniciais, as trajetórias seriam apenas uma idealização, pois é impossível para nós prepararmos um sistema de tal sorte que possamos atribuir-lhe uma trajetória bem determinada. Além disso, afirma Prigogine, chegam-se nas distribuições de probabilidades a soluções totalmente novas e irreduzíveis, no sentido de que não se

aplicam a trajetórias individuais. Além disso, a simetria em relação ao tempo é quebrada (PRIGOGINE, 2011, p. 37-39).

Um terceiro ponto envolve a relação entre as ideias científicas de Prigogine e suas teses filosóficas. Na introdução e conclusão de seu artigo, Novaes reconhece o mérito de Prigogine relativo aos seus trabalhos sobre a termodinâmica de não-equilíbrio e as estruturas dissipativas, mas ao mesmo tempo rejeita as suas ideias filosóficas. Isso é curioso, pois as ideias filosóficas de Prigogine parecem derivar diretamente dos seus trabalhos de Termodinâmica, e também de suas pesquisas na Biologia e na Cosmologia. É claro que ideias filosóficas distintas podem ser extraídas de resultados científicos, mas no caso de Prigogine parece haver uma continuidade entre seu trabalho científico e filosófico, de maneira que o primeiro serve como boa sustentação para a sua reflexão filosófica.

Um quarto ponto envolve a crítica de Novaes a uma pretensa falta de modéstia de Prigogine, que se vê como o arauto de uma grande revolução científica. A questão da “falta de modéstia” é uma questão de interpretação. De qualquer maneira, Prigogine de fato defende uma reformulação da Física Clássica, e da formulação usual da Física Quântica também, na medida em que essas teorias lidam apenas com a estabilidade e a ordem. Prigogine considera que essas visões são incompletas, nelas não se encaixando todas as realidades do universo. A instabilidade e o caos são o ponto de partida para a reformulação da dinâmica clássica, que inclua probabilidade e instabilidade. (PRIGOGINE, 2002, p. 53). Nesse sentido, reformular as leis da física não significa modificar as leis da física newtoniana, mas levar em conta o aspecto da instabilidade e caos ausente nela. Prigogine considera que pois a ciência física está em crescimento contínuo, cada nova teoria traz acréscimo e novidade ao grande edifício clássico já existente. É nesse sentido que Prigogine concebe sua reformulação. Se em seus textos ele

exibe alguma falta de modéstia, devemos observar que este traço não é incomum entre cientistas, e que tal atitude não invalida a cientificidade das ideias de um autor. Quantos cientistas brilhantes não foram arrogantes? A falta de modéstia não faz com que as ideias se tornem deficientes.

3. A Crítica de Jean Bricmont

Jean Bricmont é um físico teórico e filósofo da ciência belga, professor da Universidade Católica de Louvain, que criticou severamente a concepção sobre os fundamentos da ciência expressa por Prigogine, especialmente em seus livros de divulgação, a partir da publicação do livro *A nova aliança*, em parceria com Isabelle Stengers. No entanto, Bricmont reconhece os méritos de sua pesquisa como químico e físico teórico. O ponto de partida do autor é defender as ideias clássicas de físicos como Laplace e Boltzmann às críticas feitas por Prigogine. Bricmont situa as ideias de Prigogine no terreno da “popularização da ciência”, que pode veicular confusões e equívocos (BRICMONT, 1995, p. 1). Dentre as afirmações prigoginianas que são criticadas por Bricmont estão as seguintes:

- A noção de caos nos leva a repensar a noção de “lei da natureza”.
- Trajetórias são eliminadas da descrição probabilística.
- A descrição estatística é irreduzível.
- Os sistemas dinâmicos caóticos marcam uma ruptura com uma visão de mundo determinista.
- A concepção clássica é incapaz de explicar a irreversibilidade macroscópica.
- É incapaz também de incorporar a noção de tempo em nossa visão de mundo.

Bricmont defende em seu artigo a concepção clássica, que nega as teses mencionadas acima. O caos não invalida em nada a visão de mundo determinista clássica; pelo contrário, a existência de sistemas dinâmicos caóticos fortalece essa visão. A visão de mundo clássica de Boltzmann, quando corretamente apresentadas, dão conta perfeitamente da irreversibilidade macroscópica, em termos de leis microscópicas deterministas e reversíveis. A maior parte da especulação sobre a “nova aliança” entre as ciências humanas e as naturais é equivocada, e que as pessoas que trabalham em sociologia ou psicologia têm muito pouco a aprender do suposto “salto do newtonianismo ao prigoginiano” (BRICMONT, 1995, p. 1-2).

A fim de situar o debate, façamos uma consideração sobre a ciência clássica. O conceito fundamental da ciência clássica é a noção das leis da natureza. Um exemplo simples destas é a 2ª lei de Newton, que se escreve: $F = m.a$. Essa lei é determinista e reversível, pois conhecendo as condições iniciais se pode prever o futuro e retroceder no passado. Tal concepção levou ao determinismo, expresso por Laplace em 1814 em termos de uma superinteligência, que veio a ser chamado de “demônio de Laplace”:

Podemos considerar o estado atual do universo como o efeito de seu passado e a causa de seu futuro. Uma inteligência que, em um instante determinado, deveria conhecer todas as forças que põem em movimento a natureza, e todas as posições de todos os objetos dos quais a natureza é composta, se esta inteligência fosse ampla o suficiente para submeter esses dados à análise, ela englobaria em uma única fórmula os movimentos dos maiores corpos do universo e dos menores átomos; para tal inteligência nada seria incerto e o próprio futuro, assim como o passado, estariam evidentes a seus olhos. (LAPLACE, 2010, p. 42-43)

O determinismo defendido por Laplace traduz a concepção da natureza herdada da ciência clássica. No entanto, nem tudo é previsível na natureza, o que leva muitos autores a contestar o determinismo defendido por Laplace, entre os quais Prigogine. Perante essa questão, Bricmont esclarece que há uma confusão entre os termos *determinismo* e *previsibilidade*. Enquanto o determinismo diz respeito ao comportamento

ou às leis da natureza, a previsibilidade está relacionada a nós seres humanos sermos capazes de observar, analisar e computar a essa natureza (BRICMONT, 1995, p. 3).

A falta de previsibilidade não significa que o mundo não seja determinista: podem haver leis genuinamente estocásticas (indeterministas) ou pode ser que todas as leis sejam deterministas mas que temos conhecimento incompleto das condições iniciais e de contorno do sistema estudado. “Tudo o que quero enfatizar aqui é que a existência de sistemas dinâmicos caóticos não afeta *de forma alguma* esta discussão” (BRICMONT, 1995, p. 4).

Os sistemas dinâmicos caóticos são aqueles que têm sensibilidades extrema às condições iniciais, como vimos na seção 3.1: uma pequena diferença nas condições iniciais pode levar a trajetórias muito diferentes. Assim, os sistemas dinâmicos caóticos são imprevisíveis. Mas essa imprevisibilidade não afeta o determinismo das leis subjacentes (BRICMONT, 1995, p. 5).

Portanto, há dois fatos que dificultam a previsibilidade da natureza, na opinião de Bricmont a saber: a caoticidade das leis da natureza e a nossa incapacidade em possuir todas informações da natureza a um momento dado ou a nossa ignorância. Tal é o estatuto clássico das probabilidades, como raciocínio lógico quando faltam informações sobre o sistema estudado.

A negação da relevância das trajetórias e o papel irreduzível das probabilidades constituem teses centrais de Prigogine e são objeto de crítica por parte de Bricmont. Este cita o seguinte trecho da edição francesa de *As leis do caos*:

Nosso *leitmotiv* é que a formulação da dinâmica para sistemas caóticos deve ser feita no nível probabilístico. [...] Devemos, portanto, eliminar a noção de trajetória de nossa descrição microscópica. Isso de fato corresponde a uma descrição realista: nenhuma medição, nenhum cálculo leva estritamente a um ponto, à consideração de uma trajetória *única*. Sempre nos deparamos com um *conjunto* de trajetórias”. (PRIGOGINE, apud BRICMONT, 1995, p. 7).

Bricmont se opõe à eliminação da descrição em termos de trajetórias pela descrição em termos de distribuição de probabilidade. Nesse sentido, ele segue a concepção probabilista clássica de Boltzmann, que resumimos na seção 2.6. Ele dá o exemplo de uma bola de bilhar, cuja descrição para tempos futuros é dada por uma distribuição de probabilidade, mas que de fato sempre segue uma trajetória bem definida. As leis de movimento usadas podem até não ser exatas, devido à presença de atrito e imperfeições, mas mesmo assim a bola segue uma trajetória bem definida. A opção pelo uso da distribuição de probabilidades é devido à nossa incapacidade de prever a evolução das trajetórias. É errado atribuir um papel construtivo à ignorância. (BRICMONT, 1995, p. 9).

Como mencionado acima, Bricmont defende a interpretação boltzmanniana da Mecânica Estatística, mantendo que as leis da física microscópica são reversíveis. Ou seja, se considerarmos um sistema isolado de partículas, deixá-lo evoluir por um tempo t , então inverter exatamente as velocidades de todas as partículas, e deixar o sistema evoluir novamente por um tempo t , obtemos o sistema original do tempo inicial com todas as velocidades invertidas. O problema da irreversibilidade, como já vimos, é por que tal comportamento reversível não é evidente nos sistemas macroscópicos. A solução favorecida por Bricmont é a boltzmanniana, que esboçamos na seção 2.6. A posição de Prigogine desconfia da reversibilidade da natureza:

A natureza apresenta-nos ao mesmo tempo processos irreversíveis quanto processos reversíveis, mas os primeiros são a regra, e os segundos, a exceção. Os processos macroscópicos, como reações químicas e fenômenos de transporte, são irreversíveis. A radiação solar é resultado de processos nucleares irreversíveis. [...] Os processos reversíveis, em compensação, correspondem a idealizações: devemos negligenciar a fricção para atribuir ao pêndulo um comportamento reversível, e isto só vale como uma aproximação. (PRIGOGINE, 2011, p. 25)

Um ponto curioso da citação anterior de Prigogine é que ele menciona que sua interpretação é “realista”, mas ele não está usando o termo em seu sentido usual, da Filosofia da Ciência. Neste contexto, “realismo” denota um “realismo de inobserváveis”, ou seja, a consideração de uma realidade não observável, como seriam as trajetórias dos objetos microscópicos. Assim, é a concepção de Bricmont que é realista, não a de Prigogine, que é antirrealista, pois recusa a redução da descrição estatística (mais próxima do mensurável) a entidades inacessíveis à medição.

Voltando à “flecha do tempo”, ela é a intuição segundo a qual o tempo vai do passado para o futuro (e não o contrário). Ela marca a assimetria temporal entre o passado e o futuro. Em que sentido esta assimetria equivale à irreversibilidade? Conforme discutimos na seção 2.1, é preciso antes de tudo distinguir entre uma concepção absolutista de tempo e uma concepção relacional. Para a concepção absolutista, as propriedades do tempo independem dos corpos materiais, então a assimetria do tempo (se tal assimetria for verdadeira) seria uma propriedade primitiva do tempo, independente de discussões sobre a irreversibilidade dos processos materiais. Por outro lado, na concepção relacional do tempo, a propriedade de assimetria temporal pode ser fundada na irreversibilidade dos processos materiais. Enfoquemos nossa atenção, então, na discussão sobre o problema da irreversibilidade.

A posição boltzmanniana a respeito do problema da irreversibilidade era bem clara: na descrição do mundo microscópico os processos são reversíveis, portanto não haveria nesta escala uma flecha do tempo. Prigogine interpreta essa afirmação dizendo que Boltzmann “foi forçado a concluir que a irreversibilidade postulada pela termodinâmica seria incompatível com as leis reversíveis da dinâmica” (apud BRICMONT, 1995, p. 11). Neste ponto, Bricmont corrige esta afirmação, apresentando uma citação do próprio Boltzmann:

O senhor Ostwald deduz que a concepção mecanicista da natureza não pode explicar por que os processos naturais desenvolvem-se preferencialmente num determinado sentido a partir da circunstância de que é possível modificar o sinal do tempo nas equações diferenciais, sem que estas sofram alguma modificação. Todavia me parece ser necessário observar que os processos mecânicos não são apenas determinados pelas equações diferenciais, mas também pelas condições iniciais. Opondo-me frontalmente ao senhor Ostwald, considerei como sendo uma brilhante confirmação da concepção mecanicista da natureza a apresentação de um bom retrato da dissipação de energia, desde que se parta de um estado inicial do mundo, que eu chamei de “estado improvável”. (BOLTZMANN, 2004, p. 63)

Ou seja, Boltzmann não via uma “contradição” entre a reversibilidade microscópica e a irreversibilidade macroscópica, mas entendia que esta pode ser explicada levando em conta que o estado inicial do Universo era improvável, ou seja, tinha baixa entropia (outra defesa moderna de Boltzmann é apresentada por LEBOWITZ, 1993, seguida de uma troca de cartas em BARNUM et al., 1994).

Bricmont (1995, p. 11) admite que a solução boltzmanniana fornece apenas um quadro geral (*framework*), sem resolver em detalhes problemas específicos, como o da difusão ou do crescimento de uma planta. Seria um “paradigma”, no sentido de Thomas Kuhn, que estabelece quebra-cabeças a serem resolvidos pelos cientistas que participam desta ciência normal (KUHN, 1978). Por outro lado, a concepção de Proggine aparentemente estabelece outro paradigma, em que abandona-se a descrição mecânica reversível do mundo microscópico (em caso de muitas partículas, em situação fora do equilíbrio, mas também em equilíbrio), em favor de uma descrição estatística irreduzível em que o indeterminismo e a irreversibilidade são pontos de partida da descrição microscópica. Poderíamos talvez reconhecer essas duas tradições como programas de pesquisa, no sentido de Imre Lakatos (LAKATOS, 1979). Seria interessante avaliar em que medida cada um desses programas de pesquisa é “progressivo”, mas esta é uma tarefa difícil que não será empreendida aqui.

Outra diferença entre esses dois paradigmas refere-se à questão do reducionismo. Em sua nota 41, Bricmont faz uma defesa do reducionismo, inspirado nos textos de Weinberg (1996), salientando que “leis de níveis mais altos, como as leis macroscópicas, são reduzidas às microscópicas *mais* suposições sobre condições iniciais. Se este é o caso na Mecânica Estatística, onde geralmente aceita-se que o reducionismo funciona, ele deve esclarecer a situação em outros campos, como a Biologia, onde o reducionismo é às vezes questionado” (BRICMONT, 1995, p. 13). Em oposição a isso, Prigogine e Stengers são claramente contra o reducionismo, uma posição costumeiramente chamada de *emergentismo* (para este debate na Física, ver GATTI & PESSOA, 2012).

Para finalizar esta análise, notamos a presença de uma atitude emocional negativa de Bricmont e de Novaes em relação a Prigogine. Isso é um indício de que estamos tratando de uma *controvérsia científica*. Uma controvérsia científica pode ser definida como uma disputa pública persistente, envolvendo parcelas significativas da comunidade científica, sem fácil resolução, envolvendo argumentos “epistêmicos” (ou seja, argumentos considerados próprios do método científico) e também *fatores não-epistêmicos*, como emoções, traços de personalidade, pressões institucionais, influências políticas, rivalidades nacionais, eventos fortuitos e até fraude. Controvérsias científicas envolvem diferentes crenças ou opiniões, sendo uma disputa relativa basicamente a fatos, enquanto controvérsias políticas, éticas e tecnopológicas envolvem um conflito de diferentes atitudes ou propostas de ação, sendo uma disputa relativa a valores (McMULLIN, 1987; PESSOA, 2019, seção I.2).

Os argumentos de Novaes e Bricmont fazem uma boa defesa da interpretação boltzmanniana da Mecânica Estatística, diante das críticas de Prigogine, mas eles não apontam inconsistências lógicas ou epistemológicas das teses de Prigogine, mas apenas

buscam desqualificar suas afirmações a respeito de uma nova racionalidade para a ciência. Nota-se o tom enfático com o qual introduzem as críticas.

Em suma, a atitude de Bricmont e Novaes para com Prigogine demonstra a presença de fatores não-epistêmicos, de natureza emocional, o que deixa claro que estamos diante de uma controvérsia científica. Experimentos científicos não irão resolver o debate, pelo menos no futuro mais próximo. Podemos dizer que temos o choque de duas *interpretações* diferentes a respeito da Mecânica Estatística. Por “interpretação”, entendemos “um conjunto de teses que se agrega ao formalismo mínimo de uma teoria científica, e que em nada afeta as previsões observacionais da teoria [...] As teses agregadas pela interpretação fazem afirmações sobre a realidade existente por trás dos fenômenos observados, ou ditam normas sobre a inadequação de se fazerem tais afirmações” (PESSOA, 2003, p. 4-5)

Sendo uma controvérsia entre interpretações, o debate deverá continuar nas próximas décadas, sendo material fértil para a Filosofia da Física.

4. Discussão de Questões Técnicas

Dentre outras resenhas críticas dos livros de Prigogine, iniciaremos com a resenha feita pelo físico estadunidense Heinz Pagels (1985), do livro *A nova aliança* (PRIGOGINE & STENGERS, 1991), lançado nos Estados Unidos em 1984, com o título *Order out of chaos*. Pagels antecipa o tom levemente agressivo de Bricmont e Novaes. Por exemplo, ele comenta que, no prefácio do livro, Prigogine modestamente manifestou surpresa pelo Prêmio Nobel de Química de 1977, mas Pagels adiciona que outros cientistas também ficaram surpresos, o que sugere para o leitor que o trabalho de Prigogine não seria merecedor de um Nobel (PAGELS, 1995, p. 98).

Uma informação interessante é dada por Pagels, a respeito do “critério de evolução universal” proposto por Glandsdorff & Prigogine (1971), que mencionamos na seção 1.4:

[Este critério] foi interpretado erroneamente por alguns cientistas como sendo uma importante generalização, para sistemas longe do equilíbrio, do trabalho matemático anterior de Boltzmann e Lars Onsager (o físico norueguês) em sistemas próximos do equilíbrio. Mas, já em 1974, tornou-se claro a partir do trabalho crítico dos americanos Ronald Fox e Joel Keizer, que este “critério universal” não é universal. A seu favor, Prigogine neste livro [com Stengers] finalmente abandona a afirmação de ter encontrado um critério universal, o que aparecia de maneira proeminente em seus trabalhos anteriores. Invertendo completamente sua visão anterior, ele escreve “Por contraste com situações perto do equilíbrio, o comportamento de um sistema longe do equilíbrio torna-se altamente específico”. (PAGELS, 1985, p. 98)

Pagels também põe em discussão a afirmação de Prigogine & Stengers de que “a vida, longe de estar fora da ordem natural, aparece como a expressão suprema de processos auto-organizados”. Este é um tema controvertido, que envolve também a definição do que seria a “auto-organização”, mas Pagels cita o biofísico russo Lev Blumenfeld (1981) para concluir que “a vida é uma consequência da organização microscópica, não da macroscópica”, no sentido de que depende de padrões genéticos gerados há bilhões de anos atrás, e não do aumento de certos parâmetros de ordem (PAGELS, 1985, p. 98). Como comentário, podemos dizer que tais processos auto-organizados ocorrem de fato em vários momentos no desenvolvimento do embrião, por exemplo nos padrões regulares do pelo de animais (onças, zebras etc.), apesar de provavelmente não ser suficiente para explicar a vida.

Por fim, Pagels insere a interpretação prigoginiana na “zona crepuscular [*twilight zone*] da credibilidade científica”, ao criticar sua tese da irreversibilidade microscópica.

O filósofo Robert Bishop (2004) estudou os aspectos técnicos da obra posterior de Prigogine, e defende o “grupo de Bruxelas-Austin” de uma crítica de Bricmont, referente à afirmação de Prigogine e colaboradores de que não existem trajetórias

deterministas exatas em sistemas dinâmicos instáveis. Bricmont interpreta esta afirmação como afirmando a ausência total de trajetórias para tais sistemas, mas Bishop ressalta que isso só se refere a um tipo particular de trajetória, aquelas “que têm uma espessura inalterada e são diferenciáveis em todos os pontos (“suaves” na nomenclatura de Bruxelas-Austin)” (BISHOP, 2004, p. 7).

Desde o final da década de 1960, Prigogine preocupou-se para a questão da origem da irreversibilidade. Bishop aponta duas fases nesse projeto de pesquisa. Até meados da década de 1980, ele desenvolveu uma abordagem baseada em transformações de similaridade que mapeiam uma descrição instável, clássica ou quântica, em uma descrição probabilista markoviana, a partir de um “grande sistema de Poincaré” [*large Poincaré system*]. Posteriormente, sob a influência teórica dos físicos Arno Bohm e Manuel Gadella, Prigogine adotou um formalismo de espaço de Hilbert “equipado” (*rigged Hilbert space*) para descrever a irreversibilidade intrínseca (BISHOP, 2004, p. 4-18; LOMBARDI, 2012, p. 213).

Em sua conclusão, Bishop sublinha o valor matemático da abordagem do espaço de Hilbert “equipado” para unificar mecânica clássica e quântica, mas salienta algumas limitações conceituais da abordagem:

[...] a promessa do recente trabalho de Bruxelas-Austin deve ser balanceada com duas importantes questões em aberto: (1) Qual é o estatuto físico e matemático do semigrupo dirigido para o passado $t \leq 0$; e (2) Qual é a natureza precisa da probabilidade que repousa no coração do “grande sistema de Poincaré”? As respostas a essas duas perguntas trariam a chave para que se pudesse fornecer uma explicação para a seta termodinâmica do tempo e para que se pudesse desenvolver uma noção de indeterminismo que fosse diferente em espécie daquela discutida na Mecânica Quântica convencional, desenvolvimentos esses que seriam verdadeiramente revolucionários.

Da maneira em que se encontram as coisas, o Grupo de Bruxelas-Austin nos deu um instrumento descritivo poderoso para processos irreversíveis, e para dinâmicas não-lineares em geral, mas eles não nos deram uma explicação para a origem da irreversibilidade que observamos no mundo. Alguém poderia objetar que a abordagem do espaço de Hilbert “equipado” [*rigged*], no final das contas, tem apenas interesse matemático, já que não há nada filosoficamente interessante, dado o estado atual das questões em aberto mencionadas acima. No entanto, tal resposta é muito ligeira. Tais questões em aberto podem ser vistas como oportunidades para a exploração dos conceitos subjacentes da

abordagem, com a finalidade de tentar responder a essas questões. [...] Assim, questões interessantes são levantadas pelo trabalho de Bruxelas-Austin. Além disso, mesmo se as questões (1) e (2) acabarem sendo respondidas de uma maneira que bloqueie este caminho para a Mecânica Estatística de não-equilíbrio, essa informação também seria valiosa para filósofos. (BISHOP, 2004, p. 28)

5. Recepção na Filosofia da Ciência

As ideias de Prigogine tiveram um grande impacto na discussão filosófica em geral e de áreas específicas. Só a versão em inglês do livro de Prigogine & Stengers (1991), *Order out of chaos*, aparece no Google Scholar com 14 mil citações! Na Filosofia da Ciência, a discussão de suas ideias se dá de maneira mais multifacetada do que as críticas que vimos acima por parte de cientistas de posição mais ortodoxa (seguidores da tradição boltzmanniana). Em geral, sua posição tem sido bem recebida não só na Filosofia, mas também em áreas científicas fora da Física, como a Química e a Biologia:

Devido em parte às influências filosóficas em sua origem, o trabalho científico de Prigogine faz contato com problemas complexos que são encontrados por engenheiros, químicos, biólogos e cientistas sociais, de uma maneira que as ciências físicas raramente encontram. Isso pode dar conta do grande número de leitores entusiastas atraídos por seus livros de interesse geral. Mas, ao fazer isso, ele problematizou noções que há muito tempo eram consideradas como bem estabelecidas pelos físicos – gerando portanto uma recepção fria ou até hostil. (EARLEY, 2006, p. 282)

O filósofo da ciência estadunidense Robert Batterman, por exemplo, é conhecido por explorar uma interpretação não reducionista da Física (ver BATTERMAN, 2002). Em 1991 publicou uma resenha crítica em que examina a “reinterpretação radical” feita pela escola de Prigogine à Física Estatística. Chamou-lhe a atenção a proposta de derivar probabilidades que não são originadas na ignorância e nem em considerações da Física Quântica, mas sim de uma noção de aleatoricidade intrínseca. Discorda porém da sugestão de Prigogine et al. de que trajetórias exatas são sem sentido, mesmo como idealizações. Isso seria equivalente à afirmação de que a Mecânica Estatística clássica

não admite variáveis ocultas, mas tal afirmação é questionável, segundo o autor (BATTERMAN, 1991, p. 261-62).

Já o filósofo belga Guido Verstraeten (1991) coloca-se na tradição prigoginiana, mas tece alguns comentários críticos tendo em vista esclarecer esta interpretação. Defende que é incorreto considerar que a visão prigoginiana introduz uma aleatoricidade intrínseca no mundo microscópico. Apresenta quatro teses fundamentais que aparecem no prólogo de Prigogine (1980, p. xiii-xiv):

1. A evolução irreversível não é gerada por nossa falta de conhecimento das condições iniciais e de contorno, nem pela aleatoricidade das equações dinâmicas.
2. A irreversibilidade é inerente no nível microscópico, e atribui-se realidade tanto para os processos reversíveis quanto irreversíveis, quando há uma grandeza física observável apropriada. Além disso, a irreversibilidade começa onde as grandezas físicas da física reversível, como as mecânicas clássica e quântica, deixam de ser observáveis (VERSTRAETEN, 1991, pp. 639-40)

A terceira tese consiste de uma “complementaridade” entre a física dos processos reversíveis (*being*, ser) e a dos irreversíveis (*becoming*, vir-a-ser). “A complementaridade dessas realidades é expressa matematicamente por um comutador de dois operadores representando os observáveis das evoluções reversível e irreversível”. Segundo Verstraeten, Prigogine estende a concepção de Gibbs da entropia estatística para o nível microscópico por meio de um “operador de densidade de entropia microscópica” (VERSTRAETEN, 1991, p. 640). Segundo o autor, a principal ideia revolucionária de Prigogine, sobre a natureza da irreversibilidade, é o conceito de *operador de tempo*.

A filósofa da física argentina Olimpia Lombardi também adota uma postura simpática a Prigogine, reconhecendo na postura epistemológica do químico belga um “pluralismo ontológico”. Esta posição se opõe a um realismo científico, do estilo adotado por Albert Einstein, que concebe a realidade do mundo físico como sendo independente do sujeito do conhecimento e da própria existência de seres humanos. Segundo Prigogine & Stengers (1992), esta posição apaga o ser humano do mundo, e preserva a referência a

Deus, que seria o único ser capaz de conhecer a “realidade em si mesma”, constituindo o “mito da onisciência” (LOMBARDI, 2012, p. 206).

A concepção de Prigogine & Stengers é representada pela posição do poeta indiano Rabindranath Tagore, em suas conversas com Einstein: a realidade não é simplesmente dada, pois o conhecimento é uma construção, uma invenção audaciosa, uma criação de significado. Os pensadores belgas também fazem referência aos filósofos Immanuel Kant e Maurice Merleau-Ponty, que enfatizaram que o conhecimento não é meramente passivo, mas que o sujeito é ativo. Porém, discordam de Kant em sua busca por uma representação única da natureza, salientando que “a natureza fala com mil vozes”. Lombardi aponta que esta é uma visão *pluralista*. Invocando o princípio quântico da complementaridade, Prigogine & Stengers (1992) argumentam que diferentes pontos de vista sobre a realidade são complementares, sendo impossível encontrar uma perspectiva unificadora a partir da qual toda a realidade pudesse ser simultaneamente visível. Nessa perspectiva, rejeitam o reducionismo, defendendo que cada ramo do conhecimento científico tem uma certa autonomia em relação às outras disciplinas. Lombardi articula esta posição com o pluralismo ontológico do filósofo Hilary Putnam, em sua obra *Razão, verdade e história*, lançada em 1981 (PUTNAM, 1992). Para o pluralismo ontológico, “não há uma única ontologia ‘verdadeira’: podemos habitar diferentes ontologias dependendo de nosso contexto particular. [...] Dado que o ponto de vista privilegiado do Olho de Deus não existe, não há uma única ontologia ‘verdadeira’: todas as ontologias *pragmaticamente bem sucedidas* têm o mesmo estatuto ontológico porque todas elas são constituídas por descrições igualmente objetivas” (LOMBARDI, 2012, p. 211).

O pluralismo ontológico defendido por Lombardi é mais abrangente do que o de Prigogine. Para a filósofa argentina, a descrição macroscópica é tão objetiva quanto a

evolução microscópica reversível; já Prigogine “insiste em atribuir ao nível irreversível uma prioridade ontológica” (LOMBARDI, 2014, p. 216). E a visão ortodoxa, naturalmente, prioriza a descrição microscópica.

Em suma, Prigogine parece ter esquecido suas afirmações filosóficas em favor do fim da onisciência e da realidade múltipla. Em seus trabalhos especificamente científicos, ele parece estar buscando a “verdadeira” descrição irreversível do mundo, tradicionalmente ignorada pela ciência dominante, ao mesmo tempo em que ele despreza as descrições reversíveis tradicionais como sendo idealizações inadequadas. (LOMBARDI, 2014, p. 217)

Conclusões

No final desta dissertação, o que guardar da contribuição de Prigogine? Que impacto trouxe na ciência e na filosofia? Como compreender a controvérsia com parte da comunidade dos físicos?

Vimos que as ideias filosóficas de Prigogine surgiram da insatisfação intelectual em relação às teorias da física clássica. O grande problema consistiria na concepção determinista, reversível e temporalmente simétrica do universo, imposta pela ciência clássica. Além disso, a ciência clássica teria feito uma transposição indevida da concepção das leis para a natureza, supondo que a natureza se iguala às leis da física.

Para Prigogine, a descoberta da instabilidade e do caos, nos sistemas dinâmicos e fenômenos naturais, exige a extensão da dinâmica clássica e da mecânica quântica. Além disso, o ser da natureza não deveria ser entendido simplesmente a partir das induções e deduções matemáticas, mas também a partir da fenomenologia, ligada à intuição das experiências cotidianas, como defendia Bergson.

O desenvolvimento espetacular da física, química e biologia longe de equilíbrio ratificou o sentido de aleatoriedade no universo. Prigogine atribui igualmente à entropia, que sempre era associada à desordem, um sentido construtivo, criador da ordem. Muitos fenômenos naturais são puramente aleatórios, o que não significa que todo universo seja aleatório. Prigogine propõe um caminho estreito. Quer uma concepção de universo que contenha as leis deterministas-reversíveis e também indeterministas-irreversíveis. Um universo no qual existem as leis de Newton e as leis vida, um universo no qual o ser humano não é concebido como um estranho, mas como parte integrante.

Em relação ao tempo, Prigogine convida a integrar na descrição do universo, além do tempo puramente geométrico, também o tempo termodinâmico, sinônimo de evolução, novidade e criatividade; e enfim o tempo do ser humano, como tempo de decisão.

As ideias de Prigogine constituem uma Filosofia da Natureza, na medida em que traz uma reflexão crítica sobre o comportamento do universo e da matéria. Como filosofia da natureza, Prigogine pretendeu mostrar que a natureza é uma realidade complexa, que tem autonomia e mistério, contrariamente à concepção de que a natureza é uma realidade límpida, totalmente decifrável e dominável pelo homem.

E quanto à recepção controvertida das ideias prigoginianas entre cientistas e filósofos: que conclusão tirar disso? A principal conclusão da discussão do último capítulo é que as visões boltzmannianas de Novaes e Bricmont, por um lado, e a de Prigogine, por outro, constituem *interpretações diferentes* a respeito da Mecânica Estatística, do problema da irreversibilidade e da questão da flecha do tempo. Isso significa que não há desacordo entre eles a respeito dos fenômenos *observáveis*. O que há é uma discussão sobre qual a melhor maneira de explicar os fenômenos observáveis. Boltzmann adota uma perspectiva realista, considerando que os átomos possuem trajetórias e energias bem definidas, e que são regidos por leis reversíveis, mas que tomando-se um número imenso de partículas e considerando condições iniciais improváveis para o Universo, a evolução macroscópica adquire a aparência de ser irreversível. Já Prigogine considera que a irreversibilidade macroscópica é real (não ilusória como em Boltzmann), e que ela se funda em uma irreversibilidade e indeterminismo a nível microscópico, abandonando a perspectiva realista de atribuir trajetórias bem definidas a partículas, e adotando a tese de que a descrição probabilista dos ensembles é irreduzível. Por outro lado, Prigogine & Stengers defendem um pluralismo ontológico em seus escritos filosóficos. Esta seria a “nova racionalidade” que

de fato passou a ter uma influência muito grande no público de divulgação científica, e também bastante grande entre cientistas. A natureza emocional do debate envolvendo o “prigoginianismo” entre os físicos indica que se trata de uma verdadeira controvérsia científica.

Referências bibliográficas

- BALESCU, R. (2007). Ilya Prigogine, his life, his work. In: RICE, S.A. (org.). *Special volume in memory of Ilya Prigogine*. Advances in Chemical Physics, v. 135. Hoboken (NJ): Wiley, p. 1-81. Original em francês: *Ilya Prigogine, sa vie, son oeuvre*. Mémoire de la Classe des Sciences, In-8° - 3e série. Bruxelles: Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique, 2006.
- BATTERMAN, R.W. (1991). Randomness and probability in dynamical theories: on the proposals of the Prigogine school. *Philosophy of Science*, v. 58, p. 241-63.
- (2002). *The devil in details: asymptotic reasoning in explanation, reduction, and emergence*. Oxford: Oxford University Press.
- BARNUM, H.; CAVES, C.M.; FUCHS, C.; SCHACK, R.; DRIEBE, D.J.; HOOVER, W.G.; POSCH, H.; HOLIAN, B.L.; PEIERLS, R.; LEBOWITZ, J.L. (1994). Is Boltzmann entropy time's arrow's archer? *Physics Today*, v. 47, n. 11, p. 11-17.
- BATTERMAN, R.W. (1991). Randomness and probability in dynamical theories: on the proposals of the Prigogine school. *Philosophy of Science*, v. 58, p. 241-263.
- BÉNARD, H. (1901). Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. Méthodes optiques d'observation et d'enregistrement. *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, v. 10, p. 254-266.
- BERGSON, H. (2005). *A evolução criadora*. Trad. Bento Prado Neto. São Paulo: Martins Fontes. Original em francês: 1907.
- (2006). O possível e o real. In: Bergson, H. *O pensamento e o movente*. Trad. Bento Prado Neto. São Paulo: Martins Fontes, p. 103-21. Original em francês: 1930.
- BISHOP, R.C. (2004). Nonequilibrium statistical mechanics: Brussels-Austin style. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, v. 35, p. 1-30.
- BLUMENFELD, L.A. (1981). *Problems of biological physics*. Springer Series in Synergetics, v. 7. Berlin: Springer.
- BOLTZMANN, L. (2004). “Uma consideração matemática sobre o energetismo”. In: *Escritos populares*. Trad. A.A.P. Videira. São Leopoldo (RS): Ed. Unisinos, p. 57-66. Original do texto em alemão: 1895.
- BRICMONT, J. (1995). Science of chaos or chaos in science? Preprint disponível online: <https://arxiv.org/abs/chao-dyn/9603009> O artigo foi publicado primeiramente no periódico belga *Physicalia Magazine*, v. 17, p. 159-208, 1995, seguido de um debate com Prigogine. No ano seguinte foi publicado em: *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 775, n. 1, p. 131-175.

- COURBAGE, M. & PRIGOGINE, I. (1983). Intrinsic randomness and intrinsic irreversibility in classical dynamical systems. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.*, v. 80, p. 2412-16.
- DOERING, C.R. (2020). Turning up the heat in turbulent thermal convection. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, v. 117, p. 9671-73.
- DUHEM, P. (2014). *A teoria física: seu objeto e sua estrutura*. Trad. R. Soares da Costa. Rio de Janeiro: EdUERJ. Orig. em francês: 1906.
- EARLEY Sr., J.E. (2006). Some philosophical influences on Ilya Prigogine's statistical mechanics. *Foundations of Chemistry*, v. 8, p. 271-283.
- EDDINGTON, A.S. (1929). *The nature of the physical world*. New York: Macmillan.
- GATTI, F.G. & PESSOA JR., O. (2012). O debate entre as interpretações reducionista e emergentista da física. In: SILVA, C.C. & SALVATICO, L. (orgs.). *Filosofia e História da Ciência no Cone Sul. Seleção de trabalhos do 7º Encontro da AFHIC*. Porto Alegre: Entrementes, p. 93-101.
- GLANSDORFF, P.; BOSQUET, J. & GÉHÉNIAU, J. (1987). Notice sur Théophile De Donder. *Annuaire Académie Royale de Belgique*. Online em: [https://www.bestor.be/wiki/index.php/De_Donder,_Th%C3%A9ophile_Ernest_\(1872-1957\)](https://www.bestor.be/wiki/index.php/De_Donder,_Th%C3%A9ophile_Ernest_(1872-1957))
- GLANSDORFF, P. & PRIGOGINE, I. (1954). Sur les propriétés différentielles de la production d'entropie, *Physica*, v. 20, p. 773-780.
- (1971). *Structure, stabilité et fluctuations*. Paris: Masson. Em inglês: *Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations*. New York: Wiley, 1971.
- GLEICK, J. (1990). *Caos: a criação de uma nova ciência*. Trad. W. Dutra. Rio de Janeiro: Campus.
- GUNZIG, E.; GÉHÉNIAU, J. & PRIGOGINE, I. (1987). Entropy and cosmology. *Nature*, v. 330, p. 621-624.
- KEIZER, J. & FOX, R.F. (1974). Qualms regarding the range of validity of the Glansdorff-Prigogine criterion for stability of non-equilibrium states. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.*, v. 71, p. 192-196.
- KOYRÉ, A. (1968). *Études newtoniennes*. Trad. A. Koyré, G. Vignaux & J. Tallec. Paris: Gallimard. Orig. em inglês: 1965.
- KUHN, T.S. (1978). *A estrutura das revoluções científicas*. Trad. B.V. Boeira & N. Boeira. São Paulo: Perspectiva. Original em inglês: 1962.
- LAKATOS, I. (1979). O falseamento e a metodologia dos programas de pesquisa científica. In: LAKATOS, I. & MUSGRAVE, A. (orgs.). *A crítica e o*

- desenvolvimento do conhecimento*. Trad. O.M. Cajado. São Paulo: Cultrix, pp 109-243. Orig. em inglês: 1970.
- LAPLACE, P.-S. (2010). *Ensaio filosófico sobre as probabilidades*. Trad. P.L. Santana. Rio de Janeiro: Contraponto/Ed. PUCRio. Original em francês: 1814.
- LEBOWITZ, J.L. (1993). Boltzmann entropy and time's arrow. *Physics Today*, v. 46, n. 9, p. 32-38.
- LOMBARDI, O. (2012). Prigogine and the many voices of nature. *Foundations of Chemistry*, v. 14, p. 205-219.
- LUKAS, Mary (1980). The world according to Ilya Prigogine. *Quest*, v. 4, n. 10, 1980, p. 15-18, 86-88.
- MACH, E. (1902). *The science of mechanics*. Trad. T.J. McCormack. Chicago: Open Court. Original em alemão: 1883.
- McMULLIN, E. (1987). Scientific controversy and its termination. In: ENGELHARDT, Jr., H.T. & CAPLAN, A.L. (orgs.). *Scientific controversies*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 49-91.
- NEWTON, I. (2008). *Principia: princípios matemáticos de filosofia natural*, Livro I. Trad. T. Ricci, L.G. Brunet, S.T. Gehring & M.H.C. Célia. São Paulo: Edusp. Original em latim: 1687.
- NICOLIS, G. & PRIGOGINE, I. (1977). *Self-organization in nonequilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations*. New York: Wiley.
- NOVAES, M. (2010). Ilya Prigogine: uma visão crítica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 32, artigo 1306, p. 1-4.
- NUSSENZVEIG, H.M. *Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor*. Vol. 2, 4a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.
- PAGELS, H. (1985). Is the irreversibility we see a fundamental property of nature? *Physics Today*, v. 38, n. 1, p. 97-99.
- PESSOA Jr., O. (2019). *Filosofia da física clássica*. Notas das aulas. São Paulo: FFLCH, USP. Disponível em: <http://opessoa.fflch.usp.br/FiFi-19>
- PIETTRE, B. (1997). *Filosofia e ciência do tempo*. Trad. M.A. Figueiredo. Bauru: EDUSC. Original em francês: 1994.
- POINCARÉ, H. (1908). *Science et méthode*. Paris: Flammarion.
- PRIGOGINE, I. (1955). *Introduction to thermodynamics of irreversible processes*. Springfield (IL): Charles C. Thomas Publishers. 2ª ed. pela Wiley, New York, 1962.

- (1962). *Nonequilibrium statistical mechanics*. New York: Wiley.
- (1967). *Introduction to thermodynamics of irreversible processes*. New York: Interscience.
- (1980). *From being to becoming: time and complexity in the physical sciences*. San Francisco: Freeman.
- (1993). Biographical. In: FRÄNGSMYR, T. & FORSÉN, S. (orgs.). *Nobel lectures, Chemistry 1971-1980*. Singapore: World Scientific. Online em: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1977/prigogine/biographical/>
Versão original em francês, do livro *Les prix Nobel*.
- (1997). *Chercheurs de notre temps: Ilya Prigogine*. Entrevista televisiva dada para Dominique Bollinger. Online em: <https://www.youtube.com/watch?v=7dACfzsEgIc>
- (1999) *O nascimento do tempo*. Trad. Marcelina Amaral. Lisboa: Edições 70. Original em italiano: *La nascita del tempo*. Roma: Theoria, 1988.
- (2002). *As leis do caos*. Trad. R. Leal Ferreira. São Paulo: Editora Unesp. Original em francês: *Les lois du chaos*. Paris: Flammarion, 1994.
- (2009). *Ciência, razão e paixão*. Coletânea de artigos organizados por Edgard S. Carvalho & Maria da Conceição de Almeida. 2ª ed. São Paulo: Livraria da Física.
- (2011). *O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza*. Com a colaboração de Isabelle Stengers. 2ª ed. Trad. R. Leal Ferreira. São Paulo: Editora Unesp (1ª ed. em português: 1996). Original em francês: *La fin de certitude: temps, chaos et lois de la nature*. Paris: Odile Jacob, 1996.
- PRIGOGINE, I.; GEORGE, C.; HENIN, F. & ROSENFELD, L. (1973). A unified formulation of dynamics and thermodynamics. *Chemica Scripta*, v. 4, p. 5-32.
- PRIGOGINE, I.; MATHOT, V. & BELLEMANS, A. (1957). *The molecular theory of solutions*. Amsterdam: North Holland.
- PRIGOGINE, I. & NICOLIS, G. (1967). On symmetry-breaking instabilities in dissipative systems. *Journal of Chemical Physics*, v. 46, p. 3542-3550.
- PRIGOGINE I. & STENGERS, I. (1991). *A nova aliança: metamorfose da ciência*. Trad. M. Faria & M.J.M. Trincadeira. Brasília: Editora da UnB. Original em francês: *Nouvelle alliance: métamorphose de la science*. Paris: Gallimard, 1979. Versão levemente ampliada em inglês: *Order out of chaos: man's new dialogue with nature*. New York: Bantam, 1984.
- (1992). *Entre o tempo e a eternidade*. Trad. R. Leal Ferreira. São Paulo: Cia. das Letras. Original em francês: *Entre le temps et l'éternité*. Paris: Fayard, 1988.

- PRIGOGINE, I. & WIAME, J.M. (1946). Biologie et thermodynamique des phénomènes irréversibles. *Experientia*, Basileia, v. 2, p. 451-453.
- PUTNAM, H. (1992). *Razão, verdade e história*. Trad. A. Duarte. Lisboa: Dom Quixote. Original em inglês: 1982.
- SKLAR, L. (1993). *Physics and chance: philosophical issues in the foundations of statistical mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- SPIRE, A. (2001). *O pensamento Prigogine*. Trad. F. Duarte. Lisboa: Inst. Piaget. Orig. em francês: 1999.
- TURING, A. (1952). The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, London, series B, v. 237, p. 37-72.
- VERSTRAETEN, G. (1991). Some critical remarks concerning Prigogine's conception of temporal irreversibility. *Philosophy of Science*, v. 58, p. 639-654.
- WEINBERG, S. (1996). *Sonhos de uma teoria final: a busca das leis fundamentais da natureza*. Trad. C. Irineu da Costa. Rio de Janeiro: Rocco. Original em inglês: 1993.
- WHITROW, G.J. (2003). *O que é tempo? Uma visão clássica sobre a natureza do tempo*. Trad. M.I. Duque Estrada. Rio de Janeiro: Zahar. Orig. em inglês: 1972.