

Ilya Prigogine: uma contribuição à filosofia da ciência

(*Ilya Prigogine: a contribution for the philosophy of science*)

Neusa Teresinha Massoni¹

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Recebido em 27/10/2007; Revisado em 5/3/2008; Aceito em 20/3/2008; Publicado em 6/8/2008

Este trabalho tem o objetivo de trazer para o debate epistemológico algumas das principais idéias filosóficas de Ilya Prigogine enquanto cientista e um pequeno resumo de suas teorias científicas enquanto filósofo. Queremos crer que ele próprio, um eminente físico-químico ganhador do Prêmio Nobel de Química em 1977, não se dizia filósofo da ciência. Mas sua inovadora interpretação do tempo, do *caos* e da instabilidade, fontes de desordem e também de ordem, nos proporciona *uma excursão por uma ciência em evolução*, nas palavras de Prigogine, e não deixa dúvidas de suas profundas contribuições para uma renovada visão de inter-relação entre ciência e filosofia. As idéias aqui sumarizadas, no entanto, não devem ser tomadas como generalizações indevidas, pois as pesquisas nessa área ainda estão em curso, mas tão somente como uma instigante contribuição às visões epistemológicas contemporâneas.

Palavras-chave: filosofia da ciência, Prigogine, paradoxo do tempo.

The objective of this paper is to bring to the epistemological debate some of the major philosophical ideas of Ilya Prigogine as a scientist and a short summary of his scientific theories as a philosopher. We believe that he, a well known physicist-chemist, 1977 Nobel Prize winner in chemistry, did not consider himself a philosopher of science. However, his new interpretation of time, of chaos and instability, sources of disorder as well as of order, takes us to an excursion through a science in evolution, according to Prigogine's words, and it leaves no doubts about his deep contributions to a renewed view of the interrelationship between science and philosophy. The ideas summarized in this paper should not be taken as undue generalizations, since studies in this area are still underway, but just as an stimulating contribution to contemporary epistemological views.

Keywords: philosophy of science, Prigogine, time paradox.

1. Introdução

Este pretende ser apenas um texto introdutório às idéias epistemológicas de Ilya Prigogine (1917-2003). Prigogine nasceu em Moscou e faleceu em Bruxelas, com 86 anos de idade. Estudou física e química na Universidade Livre de Bruxelas, Bélgica, para onde seus pais se mudaram quando ele tinha 4 anos, e obteve nacionalidade belga. Ganhou o prêmio Nobel de Química em 1977 por suas contribuições à termodinâmica de não-equilíbrio e pela teoria das estruturas dissipativas. Foi diretor dos Institutos Solvay de Física e Química, em Bruxelas, e diretor do Centro Ilya Prigogine de Mecânica Estatística, Termodinâmica e Sistemas Complexos de Austin, Texas. Suas idéias 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. Seu enfoque centra-se em que sistemas instáveis (de não-equilíbrio) estão na base da des-

crição microscópica do universo e, com isso, as leis da dinâmica precisam ser formuladas em nível estatístico, aonde a irreversibilidade e a seta do tempo surgem como elementos fundamentais e indissociáveis dos sistemas instáveis.

2. Uma nova visão da física

A visão de Prigogine é radicalmente nova com relação à física ocidental, sem dúvida um triunfo extraordinário do pensamento humano dos últimos séculos, mas uma física alicerçada em sistemas estáveis e deterministas, onde sistemas instáveis são tratados como exceções. Na nova visão, inverte-se essa perspectiva, ou seja, sistemas estáveis passam a ser casos especiais de uma dinâmica estendida, com formulação estatística, não mais baseada em trajetórias individuais (caso clássico) ou em funções de onda (caso quântico).

Chassott [1], ano da morte de Prigogine, afirma que "a Ciência, que iniciara o século (referindo-se ao

¹E-mail: massoni@cpovo.net.

século XX) arvorada em certezas, no seu ocaso as havia abandonado. Foi, muito provavelmente, Prigogine quem muito nos ajudou a entender de uma maneira diferente a linguagem usada para descrever o universo. [...] a abandonar uma ciência dogmática e neutra e tê-la também como um instrumento para contribuir para a existência de uma sociedade mais justa”. Destaca parte do pronunciamento de Prigogine em agradecimento ao Prêmio Nobel de 1977, em que ele afirmou que “a ciência para o benefício da humanidade somente é possível se uma atitude científica for profundamente arraigada na cultura como um todo. Isso implica certamente na melhor disseminação da informação científica para o público de um lado, mas do outro, em um melhor entendimento dos problemas do nosso tempo pela comunidade científica” [1, p. 214]. Entendemos, de pleno acordo com Chassott, que essa proposta é oportuna ainda em nossos dias. Talvez se constitua em uma das maiores lições que podemos retirar das idéias de Prigogine.

Para expô-las faz-se necessário entrar em alguma medida na estrutura formal de sua teoria. Procuraremos fazer isso de forma qualitativa tanto quanto possível.

Em seu livro *As Leis do Caos* [2], Prigogine afirma que a física tem formulado as leis da natureza referindo-se a um universo fundamentalmente reversível, isto é, que não conhece a diferença entre o passado e o futuro. Esta formulação tradicional atemporal se contrapõe às descrições fenomenológicas² que incluem a seta do tempo.

Ao longo das últimas décadas, um conceito novo tem conhecido êxito cada vez maior: a noção de instabilidade dinâmica associada ao ‘caos’. Este último sugere desordem, imprevisibilidade, mas veremos que não é assim. É possível (...) incluir o caos nas leis da natureza, mas contanto que generalizemos

essa noção para nela incluirmos as noções de probabilidade e de irreversibilidade [2, p. 8].

Assim, uma reformulação das leis fundamentais da física com base evolutiva, como sugere Prigogine, deve incorporar o *indeterminismo*,³ a “assimetria do tempo” e a *irreversibilidade*.

A equação de Newton na mecânica clássica e a de Schrödinger na mecânica quântica descrevem processos dinâmicos reversíveis porque são equações invariantes frente à inversão do tempo (“+t” e “-t” ambos fornecem movimentos plausíveis). Essa descrição física apresenta, portanto, simetria temporal.

Na natureza, entretanto, muitos processos possuem uma direção privilegiada no tempo, isto é, são irreversíveis. Exemplos destes processos são: a decomposição radioativa, a fricção, a evolução cosmológica, a viscosidade que desacelera o movimento nos fluidos, a difusão térmica, as reações químicas, os fenômenos de transporte, etc. Na termodinâmica a distinção entre processos reversíveis e irreversíveis é feita através da introdução de uma função de estado (que depende apenas do estado inicial e final, ou, independe do caminho) chamada *entropia*.⁴ Associada ao segundo princípio da termodinâmica, que estabelece que não existe processo cujo *único produto* seja transformar calor em trabalho, a entropia do universo cresce em direção a um máximo. Assim, sistemas reversíveis (no equilíbrio) apresentam variação de entropia nula, mas os sistemas irreversíveis produzem entropia. Segundo Prigogine, “o crescimento da entropia designa, pois, a direção do futuro” [6, p. 25].

O *paradoxo do tempo* (o que diferencia o passado do futuro) tem acompanhado a história da humanidade e remonta à Antiguidade. Entretanto, segundo Prigogine, nenhum saber jamais afirmou a equivalência entre o que se faz e o que se desfaz, entre uma planta que cresce, floresce e morre e uma planta que renasce, reju-

²Fenomenológico: Kerson Huang, na Ref. [3], texto usualmente utilizado em cursos de mecânica estatística na formação de físicos, afirma na introdução do cap. 1 que “a termodinâmica é uma teoria fenomenológica da matéria. Como tal, ela estabelece seus conceitos diretamente da experiência” [3, p. 3].

³Indeterminismo tomado não como ausência de previsibilidade, mas em termos de limites da previsibilidade.

⁴Entropia (S): do ponto de vista termodinâmico, como já referido, a entropia é uma propriedade que distingue entre processos reversíveis e irreversíveis ($S > 0$ para processos espontâneos). Comumente, entropia nos remete à ideia de aumento da desordem ou aleatoriedade espacial no universo. Murray Gell-Mann na Ref. [4, p. 218-220], afirma: “...há mais maneiras de as moléculas de um gás de oxigênio e nitrogênio se misturarem do que de se separarem. Na medida em que se deixam as coisas evoluírem ao acaso, pode-se prever que um sistema fechado, caracterizado por alguma ordem inicial, evoluirá para a desordem, que oferece tantas possibilidades a mais.”

O conceito de entropia é, no entanto, mais abrangente. Para Prigogine, fenômenos irreversíveis não se reduzem a um aumento de “desordem” mas, longe do equilíbrio podem produzir certas formas de ordem: as estruturas dissipativas ou “auto-organizadas”. A literatura na pesquisa em ensino de ciências tem mostrado que existem incompreensões e ambiguidades no ensino-aprendizagem desse conceito, cujo significado, em geral, é oculto pelas equações e expressões matemáticas. Segundo Lowe [5], a entropia deveria também ser discutida a partir do reconhecimento das diferentes formas nas quais a energia total dos sistemas pode ser dividida no nível molecular. Por exemplo, a expansão de um gás ideal no vácuo faz com que os níveis de energia translacional estejam mais próximos, o que permite armazenar energia em um maior número de formas, aumentando, assim, a entropia do sistema. Neste exemplo, o aumento da entropia está associado ao aumento da aleatoriedade posicional devido ao distanciamento das partículas. Levando em conta os tipos de energia (eletrônica, translacional, vibracional e rotacional), diferentes moléculas podem apresentar diferenças no número de formas com as quais distribuem energia e assim gerar entropias diferentes. Nessa linha, a entropia é a força motriz que está por trás de mudanças físicas como: mudança na temperatura de ebulição e de congelamento de uma solução quando comparada ao solvente puro, osmose, solubilidade, etc.; deixa de ser um conceito abstrato (matemático) e pode ser entendida como uma propriedade extensiva fundamental das substâncias, tão importante quanto o volume, a massa, etc.

venesce e retorna à semente primitiva.

O problema do tempo exprime, na verdade, uma forma de dualismo. De um lado, a imagem que a física construiu, de um universo sujeito a leis deterministas e reversíveis no tempo, onde o passado e o futuro desempenham papéis equivalentes; de outro lado, avanços nas técnicas matemáticas (*e.g.*, Mandelbrot [7] *apud* Prigogine [6]) e descobertas recentes de estruturas de não-equilíbrio (*e.g.*, Glansdorff e Prigogine [8] *apud* Prigogine [6]), também chamadas *dissipativas*, reconhecem o papel fundamental das *flutuações* e da *instabilidade*, abrem um novo mundo, novas interrogações, noções de múltipla escolha, de liberdade e criatividade, que não têm lugar no mundo determinista.

Convém falarmos um pouco de estabilidade e instabilidade. Um pêndulo na sua posição de equilíbrio é um sistema estável, pois uma pequena perturbação na condição de equilíbrio produz pequenas oscilações e o sistema retorna, em seguida, a sua posição de equilíbrio. Existe, todavia, uma classe de sistemas dinâmicos para os quais uma pequena perturbação inicial sofre amplificação ao longo do tempo, ou seja, trajetórias que correspondiam a condições iniciais muito próximas divergem exponencialmente no tempo. Esses sistemas apresentam *sensibilidade às condições iniciais* e são chamados de sistemas dinâmicos instáveis. O caos é um exemplo extremo de sistemas dinâmicos instáveis.

As leis da física em sua formulação tradicional, descrevem um mundo idealizado, um mundo estável e não o mundo instável, evolutivo em que vivemos. [6, p. 29]

Em situações de equilíbrio tudo é simples, estável e não há variação de entropia. Ocorre que processos irreversíveis, aos quais se aplica o segundo princípio da termodinâmica (a entropia do universo cresce na direção de um máximo) constituem a imensa maioria no universo. Longe do equilíbrio pode aparecer o instável e o complexo, mas surge também a possibilidade de formação de estruturas complexas e delicadas. As estruturas biológicas, a auto-organização, a vida só é possível longe do equilíbrio. Isso mostra que o “caos” assume um papel construtivo e é nesse sentido que Prigogine fala em generalização desse conceito (de caos).

Na termodinâmica clássica (parte da física que trata de sistemas em que o número N de partículas e o volume V que elas ocupam tendem ao infinito, enquanto a razão N/V permanece constante) o equilíbrio é definido como o estado em que a função de distribuição de probabilidades ρ (mais adiante definiremos com maior precisão o significado desta função) independe do tempo, ou seja, depende apenas da energia total do sistema. A energia total expressa em termos das coordenadas momento p e posição q é chamada *hamiltoniano* [$H(p, q)$]. Casos *especiais* importantes são aqueles em que os conjuntos de todas as possibilidades de representar um sistema têm a mesma energia.

Esses conjuntos são chamados *microcanônicos*. Eles satisfazem às leis da termodinâmica de equilíbrio: ρ é constante no espaço de fases. O conjunto *canônico* é aquele em que todos os sistemas interagem com um reservatório de temperatura constante (T). Neste caso, a função de distribuição de probabilidades (ρ) depende exponencialmente do *hamiltoniano*. Mas como a função de distribuição é dada, todas as propriedades termodinâmicas de equilíbrio podem ser calculadas (pressão, calor específico, etc.). No equilíbrio termodinâmico a entropia tende a um máximo e a energia atinge um mínimo. Em ambos os casos, o extremo da entropia ou da energia garante que as flutuações que aparecem nesses sistemas microscópicos (compostos de muitas partículas em interação) possam ser amortecidas e que ocorra um retorno ao equilíbrio. Por outro lado, em situações próximas do equilíbrio (o domínio do que é chamado termodinâmica de não-equilíbrio linear) a produção de entropia é mínima e leva o sistema a estados estacionários (estados em que ocorre regressão das flutuações, mas que pode ser de maior complexidade do que o estado de equilíbrio, ou seja, levam à formação de uma ordem que não poderia ocorrer no equilíbrio). Entretanto, nas situações longe do equilíbrio estudos recentes têm mostrado resultados surpreendentes: os sistemas não levam a extremos das funções de estado (energia livre ou entropia) e não é certo que as flutuações sejam amortecidas. As instabilidades passam a desempenhar um papel essencial. Longe do equilíbrio as flutuações “escolhem” um dos possíveis regimes de funcionamento do sistema, colocam em jogo o mecanismo dos processos irreversíveis, e a matéria adquire novas propriedades.

Num tom metafórico, pode-se dizer que no equilíbrio a matéria é ‘cega’, ao passo que longe do equilíbrio ela começa a ‘ver’. E esta nova propriedade, esta sensibilidade da matéria a si mesma e a seu ambiente, está ligada à dissipação associada aos processos irreversíveis. [6, p. 71]

Estruturas dissipativas são próprias de processos irreversíveis e revelam que ocorre a criação de ordem longe do equilíbrio termodinâmico. Fenômenos caóticos ou irreversíveis não se reduzem a um aumento de “desordem”, como se pensa comumente, mas, ao contrário, têm um importante papel construtivo. Voltaremos a esse assunto oportunamente.

E o indeterminismo no sentido de Prigogine, por que ele se faz necessário para uma nova descrição do universo? O matemático Henri Poincaré (1854-1912) mostrou que é fundamentalmente diferente calcular a trajetória de uma pedra que cai, descrita pela lei de Newton, do que tentarmos calcular o movimento de três (ou mais) corpos, por exemplo, o Sol, a Terra e a Lua. Este último é um sistema instável. O estado inicial de um objeto é dado pela posição (coordenada

representada pela letra q) e pelo momento (representado pela letra p). Assim p e q , chamadas coordenadas canônicas, definem um ponto em um espaço chamado de *espaço de fases*. Quando tratamos de muitas partículas existem muitas possibilidades diferentes de representar um sistema, como referido anteriormente. Em outras palavras, o sistema não pode mais ser representado por um único ponto, mas sim por um conjunto, uma nuvem de pontos no *espaço de fases*. Aí faz sentido se falar em *função de distribuição de probabilidades* [$\rho = \rho(p, q)$] que representa a distribuição de probabilidade de encontrar os pontos no espaço de fases.

3. Ruptura

Até bem recentemente entendia-se que a introdução das probabilidades era apenas uma questão técnica, um instrumento de cálculo quando as condições iniciais das partículas não eram conhecidas (essa foi a posição assumida por Gibbs e Einstein). Nesse ponto de vista, as probabilidades traduziam a ignorância, ou a falta de informação de todas as condições iniciais para se obter as trajetórias individuais de cada partícula. As probabilidades (o nível estatístico) eram interpretadas como uma aproximação, pois descrever o sistema através das trajetórias individuais ou obter a evolução da função de distribuição de probabilidades (ρ) eram procedimentos equivalentes. Mas não é assim. Estudos detalhados de sistemas instáveis (*e.g.*, Refs. [9-11] *apud* Prigogine [6]) mostram que a equivalência entre o nível individual e o estatístico é destruída.

A ruptura da equivalência entre a descrição individual (trajetórias) e a descrição estatística é o ponto central da abordagem de Prigogine. Ela evidencia a descoberta de novas propriedades da matéria, associadas ao não-equilíbrio, e levou-o a propor uma dinâmica estendida, baseada em sistemas instáveis, para as mecânicas clássica e quântica.

A noção de probabilidade introduzida empiricamente pelo físico austríaco Ludwig Boltzmann (século XIX) foi incompreendida na sua época, pois a teoria cinética que ele desenvolveu dizia respeito a processos irreversíveis e era altamente incompatível com as leis reversíveis da dinâmica clássica de então. Poincaré, no final do século XIX, mostrou que existem sistemas chamados *integráveis*, mas que a maioria dos sistemas dinâmicos é *não-integrável*. Um sistema integrável é aquele em que existem N quantidades conservadas independentes para N graus de liberdade, de forma que as soluções podem ser escritas em termos de *funções analíticas*,⁵ como função do tempo e das condições iniciais. A chamada *sensibilidade às condições iniciais* nada mais é do que a manifestação da descontinuidade de funções *não analíticas* que, em geral, governam os sistemas não integráveis.

⁵ *Funções analíticas* são aquelas representáveis por séries de potências, portanto, são contínuas bem como suas derivadas de qualquer ordem (se f é uma função analítica num conjunto aberto Ω , então f é indefinidamente diferenciável em Ω).

O mundo não é tão simples assim. Se conjuntos de muitas partículas microscópicas não interagissem de forma persistente (não apenas de forma transitória, como veremos mais adiante) o universo seria isomorfo, não haveria lugar para a auto-organização, nem para a vida, nem para a flecha do tempo.

4. Ressonâncias de Poincaré e nível estatístico

Poincaré identificou a existência de *ressonâncias* (acoplamentos) entre as frequências (modos de oscilação) que caracterizam cada um dos N graus de liberdade de um sistema de muitas partículas. Nos pontos de ressonância ocorrem divergências (descontinuidades) que tornam impossível o cálculo das trajetórias. Estes sistemas foram chamados de *não-integráveis*. As ressonâncias de Poincaré, segundo Prigogine, representaram por muito tempo uma dificuldade para integrar as equações da mecânica, pois apareciam divergências ou descontinuidades. Prigogine, todavia, atribuiu às divergências um *sentido físico construtivo* e procurou mostrar que elas assinalam, de certo modo, a barreira entre sistemas dinâmicos reversíveis e sistemas dissipativos, com simetria temporal quebrada.

As ressonâncias de Poincaré desempenham um papel fundamental na física. A absorção e a emissão da luz devem-se a ressonâncias. (...) O fato de poder superar o obstáculo que elas opõem à descrição dinâmica dos sistemas pode, pois, com razão, ser considerado uma ampliação da dinâmica, uma extensão que escapa ao modelo estático e determinista aplicável aos sistemas dinâmicos integráveis. [6, p. 43]

As divergências não aparecem no nível estatístico. A estatística, assim, é incluída para resolver a não-analiticidade do problema original. Nos pontos críticos, cada ponto (p_o) do espaço de fases pode ser associado *não* a um ponto (p_τ) que poderia ser predito com certeza como sendo o estado do sistema decorrido um tempo τ , mas a um conjunto de pontos (p_1, p_2, p_3, \dots), sendo que cada um destes pontos tem probabilidade não nula de vir a representar o sistema. Sistemas que apresentam essas propriedades são precisamente sistemas dinâmicos caóticos. O estudo de vários sistemas caóticos simples mostrou que a instabilidade e a irreversibilidade são partes integrantes da descrição em nível fundamental. A *instabilidade* e a *não-integrabilidade* rompem a equivalência entre a descrição individual (em termos de trajetórias ou funções de onda) e a descrição estatística.

...a não-integrabilidade se deve às ressonâncias. Ora, as ressonâncias exprimem

condições que devem ser satisfeitas pelas frequências: não são eventos locais que ocorrem num ponto dado do espaço e num instante dado. Elas introduzem, portanto, um elemento estranho à noção de trajetória, que corresponde a uma descrição local de espaço-tempo. Tenho consciência de que o abandono da noção de trajetória corresponde a uma ruptura radical com o passado. (...) Veremos situações em que as trajetórias se desmoronam (...). Esse colapso significa que as trajetórias não são mais objetos submetidos a leis deterministas como a de Newton. Elas se tornam objetos probabilistas, estocásticos, como no movimento browniano. [6, p. 114/115]

Um exemplo simples de sistema dinâmico instável, explicitado por Prigogine, é o “deslocamento de Bernoulli”.⁶ Neste tipo de aplicação trajetórias calculadas a partir de pontos iniciais vizinhos divergem ao longo do tempo e a divergência torna-se proporcional a exponencial [$\exp(\lambda t)$], aonde λ é chamado de expoente de Lyapounov (um sistema caótico tem pelo menos um expoente de Lyapounov). Se ao invés de considerarmos pontos individuais associados a trajetórias no espaço de fases considerarmos um conjunto de pontos descritos pela distribuição de probabilidade ρ , teremos que a evolução do sistema corresponde à atuação de um operador de evolução temporal (U), chamado operador de Perron-Frobenius, sobre a função de distribuição (ρ). Essa atuação gera um contraste: enquanto as trajetórias permanecem instáveis (erráticas), a função ρ tende rapidamente para um valor constante. Em outras palavras, “a equivalência entre o ponto de vista individual e o ponto de vista estatístico é rompida” [6, p. 90].

Esse tipo de estudo está em curso e em expansão. Faz uso de operadores, como aqueles utilizados na mecânica quântica. Um operador é uma prescrição matemática que transforma uma função em outra diferente (multiplicada, diferenciada, etc.). Cada operador possui funções que se mantêm invariantes quando ele atua sobre elas, a menos de um fator multiplicativo. Estas

são chamadas *autofunções* e os números que as multiplicam são os *autovalores*. O conjunto de autofunções e autovalores de um operador define um espaço funcional, a exemplo do espaço de Hilbert da mecânica quântica.

5. Para além do espaço de Hilbert

A novidade no estudo de sistemas caóticos é que se faz necessário ir além do espaço de Hilbert, fala-se em espaço de Hilbert generalizado ou “estriado” (*rigged Hilbert space*). O operador de Perron-Frobenius (U), anteriormente referido, exprime-se em termos de uma família de polinômios chamados polinômios de Bernoulli (que são funções *normais*) e por um segundo conjunto de funções chamadas funções *singulares*, das quais as funções delta $\delta(x - x_o)$ são um exemplo (delta é uma função diferente de zero apenas para o ponto x_o e nula em todos os outros pontos).

Especificamente, um operador de evolução U contém uma integral que envolve uma função delta [$\delta(x - x_o)$] e esta só tem sentido se associada a uma função de distribuição contínua. Ora, *funções de distribuição contínuas* sob integração não podem ser aplicadas a trajetórias. O que significa “...que as trajetórias são eliminadas da descrição probabilística. (...) A seta do tempo aparece no plano das funções de distribuição contínuas. Será que isso representa uma limitação do nosso método? Julgo que é antes o contrário que é verdade. A existência da seta, tão evidente em nível macroscópico, mostra que a descrição microscópica e essa seta devem estar em harmonia. Devemos, portanto, eliminar a noção de trajetória da nossa descrição microscópica. Aliás, esta corresponde a uma descrição realista: nenhuma medida, nenhum cálculo leva estritamente a um ponto, à consideração de uma trajetória “única”; estaremos sempre diante de “conjuntos” de trajetórias” [2, p. 50-51].

Como vimos, a descrição em termos estatísticos leva a melhor, é mais rica do que a descrição de trajetórias individuais, pois trata da evolução de conjunto. Os fenômenos de ruptura de simetria⁷ são sempre fenômenos coletivos em que estão em jogo bilhões de moléculas. O indeterminismo, entretanto, não signi-

⁶ *Deslocamento de Bernoulli* trata-se de uma iteração em que se escolhe um número x qualquer entre 0 e 1, multiplica-se por 2 a intervalos regulares, por exemplo a cada segundo, e subtrai-se a parte que ultrapassa a unidade. Obtém-se a equação de movimento $x_{n+1} = 2x_n$ (módulo 1). Módulo 1 significa que somente são considerados os números compreendidos entre 0 e 1. Obtém-se uma sucessão de números que crescem até superar a unidade e depois voltam a fazer parte do intervalo (0-1). Esta é uma aplicação que leva a um comportamento periódico. Se conhecemos x_n , então o número x_{n+1} é determinado, por este motivo trata-se de um exemplo de caos determinista. Simulações numéricas mostram que trajetórias calculadas a partir de pontos iniciais vizinhos divergem ao longo do tempo. Como a cada passo a coordenada é duplicada, a divergência é proporcional a $2n$ depois de n passos. Se ao invés de descrevermos o movimento através de trajetórias utilizarmos a descrição estatística, em termos de aplicação do operador de Perron-Frobenius (U) sobre a função de distribuição (ρ), obteremos um contraste impressionante: enquanto a trajetória permanece errática a função $\rho_n(x)$ tende rapidamente a um valor constante. Nas palavras de Prigogine, “...deve existir uma diferença fundamental entre a descrição em termos de trajetórias, por um lado, e em termos de conjunto, por outro” [6, p. 89].

⁷ Um mecanismo que exemplifica a *ruptura de simetria*: as moléculas de clorato de sódio (NaClO_3), ao contrário dos cristais de NaClO_3 , são opticamente inativas, isso é, não fazem girar o plano de polarização da luz. Existem duas formas: a levógira e a dextrógira. Ao se resfriar uma solução de NaClO_3 forma-se o mesmo número de cristais levógiros e dextrógiros. Se durante o processo de resfriamento, no entanto, for colocado um instrumento que ao agitar torne a misturar completamente a solução, constata-se que as moléculas levam a cristais todos levógiros ou todos dextrógiros. A escolha entre um cristal levógiro ou dextrógiro é dada por um processo probabilístico, ocorre a partir de uma “bifurcação”. A agitação, neste caso, rompe a simetria do sistema.

fica ausência de previsibilidade, trata sim de limites da previsibilidade.

A ruptura da equivalência entre a descrição estatística e o nível individual (em termos de trajetórias) conduz, segundo Prigogine, para além da mecânica de Newton. A equação fundamental de Newton ($\mathbf{F} = m\mathbf{a}$) liga a aceleração (dv/dt) de uma massa pontual à força a ela aplicada. A força determina a mudança da trajetória através de uma derivada segunda em relação ao tempo e por isso é invariante à inversão do tempo ($t/-t$). Para o caso de N massas pontuais as coordenadas de posição (q) e de momento (p) são variáveis independentes. O hamiltoniano (H), como já referido, é a energia do sistema expressa em termos dessas variáveis. No caso de uma partícula *livre* o hamiltoniano só depende da energia cinética, mas para conjuntos de N partículas, H é a soma da energia cinética (dependente de p) e da energia potencial de interação (dependente de q). Assim, H passa a ser uma função do tipo $H = H_o(p) + \lambda V(q)$, em que $H_o(p)$ é o hamiltoniano associado à energia cinética de partículas livres (integrável) e $\lambda V(q)$ é o termo de energia potencial devido às interações. O fator λ mede a importância das interações entre as partículas. A questão é que são conhecidas poucas soluções das equações de movimento, somente os casos integráveis. Em geral, recorre-se a métodos de perturbação e aí surgem as ressonâncias entre os diferentes graus de liberdade do sistema e, por consequência, a dificuldade de integração. Uma classe de sistemas não integráveis de interesse são os chamados *grandes sistema de Poincaré* (GSP). Nestes sistemas a frequência varia de forma contínua com relação ao comprimento de onda. A descrição do sistema é obtida introduzindo-se, como nos casos anteriores, uma função de distribuição de probabilidades $\rho(p, q, t)$ sobre a qual atua um operador, agora não mais o operador de Perron-Frobenius como no deslocamento de Bernoulli, mas sim um operador já conhecido na mecânica clássica chamado operador de Liouville (L). A solução formal da equação de Liouville é dada por $\rho = e^{(-iLt)}$. Quando atua no espaço de Hilbert o operador de Liouville é do tipo “hermitiano”, ou seja, tem como autovalores (l_n) apenas números reais. Mas o fato é que o espaço de Hilbert precisa ser abandonado para descrever sistemas irreversíveis, e daí os autovalores de L precisam ser complexos (do tipo $l_n = \varpi_n + i\gamma_n$). Isso leva a que as contribuições exponenciais de evolução temporal para a distribuição de probabilidades (ρ) desapareçam progressivamente para o futuro ($t > 0$) enquanto se amplificam para o passado ($t < 0$). Como consequência, a simetria do tempo é quebrada.

Mas por que é necessário abandonar o espaço de Hilbert? A resposta exige a distinção entre as funções “normais” e as “singulares”. O espaço de Hilbert lida apenas com funções “normais”, contínuas. Qualitativamente falando, é porque o mundo, especialmente os sistemas microscópicos, apresenta interações persis-

tentes e não apenas transitórias. Por exemplo, “(...) as moléculas na atmosfera estão continuamente em colisão. Ora, não podemos entender esse processo contínuo de colisões a partir de uma idealização que consiste em só considerar algumas moléculas no vácuo. Uma tal idealização corresponderia às interações transitórias” [6, p. 120]. Em geral, a mecânica newtoniana considera movimentos em que as interações são transitórias ao passo que a irreversibilidade só tem sentido se considerarmos as partículas mergulhadas em um meio aonde as interações não param nunca, são persistentes. As interações transitórias são descritas por distribuições de probabilidade localizadas e as interações persistentes estão associadas a distribuições de probabilidade não-localizadas. A distribuição de probabilidade não-localizada conduz a funções “singulares” (mais uma vez, o espaço de Hilbert deve ser abandonado) e levam em conta as ressonâncias de Poincaré. Isso implica que no nível estatístico a solução do problema dinâmico pressupõe uma representação espectral irreduzível e complexa do operador de evolução de Liouville. “Complexo” significa que essa representação quebra a simetria temporal; e “irreduzível”, que ela não se aplica a trajetórias (as quais correspondem a interações transitórias).

A descrição dinâmica de não-equilíbrio proposta por Prigogine permite assim, construir funções no nível microscópico que são análogos dinâmicos da entropia. Em outras palavras, realiza a unificação da dinâmica e da termodinâmica. “A validade das equações utilizadas na mecânica clássica revela-se extremamente limitada. A maioria dos sistemas dinâmicos correspondentes aos fenômenos que nos rodeiam são não-integráveis no sentido de Poincaré e são GSP, isto é, apresentam interações persistentes. Esses fenômenos admitem uma descrição termodinâmica incompatível com uma descrição em termos de trajetórias. As interações dinâmicas transitórias, como o espalhamento, não são representativas das situações que encontramos na natureza. (...) na natureza, as interações são persistentes e os processos de colisão que correspondem às ressonâncias de Poincaré são a regra” [6, p. 124-133]. Em outras palavras, no nível microscópico o indeterminismo é a regra enquanto os sistemas estáveis são exceção.

Situação idêntica ocorre com os sistemas caóticos quânticos, ou seja, não é possível exprimir a evolução desses sistemas em termos de funções de onda, que obedecem à equação de Schrödinger.

6. O surgimento da incerteza

O advento da mecânica quântica está ligado ao postulado da quantização, isto é, os níveis de energia de um oscilador, por exemplo, são quantizados: formam um conjunto discreto de valores. Portanto, a idéia de fundo foi associar os diversos níveis observados aos au-

tovalores de um operador. Na mecânica quântica um estado é descrito por uma função de onda (ψ), sobre a qual atua o operador hamiltoniano que determina sua evolução no tempo. Como no caso clássico, parte-se de sistemas onde o hamiltoniano é a soma de um hamiltoniano livre (H_0) e um termo determinado pelas interações λV . A busca das autofunções e autovalores de H leva a perturbações e estas levam a divergências que mostram o “colapso” das funções de onda. Também na mecânica quântica as ressonâncias de Poincaré⁸ introduzem eventos dinâmicos novos que acoplam a criação e a destruição de correlações e descrevem processos difusivos. Portanto, faz-se necessário o advento de uma nova formulação da teoria quântica, não mais em termos de funções de onda, mas sim diretamente em termos de probabilidade irreduzível. “Como na mecânica clássica, as funções de distribuição quânticas ρ que correspondem a interações persistentes são não-localizadas. Isto leva a funções singulares (...) e nos força a sair do espaço de Hilbert” [6, p. 152].

A nova visão, segundo Prigogine, toca em um dos pontos fracos da chamada “interpretação de Copenhague” da mecânica quântica: como descrever um aparelho de medida em termos clássicos num mundo regido por leis quânticas? A nova abordagem introduz um tempo comum entre o aparelho que realiza as medidas, quer seja ele nosso dispositivo sensorial ou um aparelho físico, ambos devem obedecer a leis que incluem uma quebra de simetria temporal, ou seja, a direção do tempo é comum ao aparelho de medida e ao observador (a medição é um modo de comunicação).

Nas palavras de Prigogine:

Quanto ao ideal clássico da ciência, o de um mundo sem tempo, sem memória e sem história, ele evoca os pesadelos descritos nos romances de Huxley, de Orwell e de Kundera. [6, p. 158].

Um aspecto fundamental da nova visão que Prigogine nos propõe, portanto, é o surgimento do elemento “incerteza”. Uma vez que os sistemas aonde surgem fenômenos instáveis não são explicáveis através de partículas e trajetórias individuais ou funções de onda, mas sim através da evolução de conjunto (N partículas), torna-se necessária uma descrição estatística, fundamentalmente probabilística. A probabilidade está ligada à incerteza. Exprime o que é “possível” e não o que é “certo”. Ao abandonarmos as trajetórias deixamos de lado as tranqüilas certezas da dinâmica tradicional. A probabilidade, ligada ao elemento “incerteza”, ou, se quisermos, ao “indeterminismo”, ganha um significado intrínseco.

Vivemos em um universo em evolução. Existem sistemas complexos que nos rodeiam e que impõem

uma ruptura da equivalência entre a descrição individual (trajetórias ou funções de onda) e a descrição estatística. É no nível estatístico que podemos incorporar a instabilidade às leis fundamentais e elas, então, passam a adquirir um significado novo: não mais se tratam de certezas mas sim de possibilidades.

7. Conclusão

De qualquer forma, uma visão evolutiva das ciências não é novidade no campo da epistemologia. Toulmin [12] já referiu-se à construção da ciência como um processo evolutivo, darwiniano, no sentido de que a base do pensamento humano são os conceitos, e estes se desenvolvem e se transformam com o tempo, de geração em geração, tornando-se mais abrangentes a cada avanço científico. E mais, entende que fatores sócio-histórico-culturais influenciam no processo de mudança conceitual. A visão toulminiana inverte o ponto de prova. Antes o problema era o fenômeno que devia ser explicado, num cenário de estabilidade e imutabilidade intelectual; agora o fluxo intelectual é esperado e tudo o que é contínuo, estável ou universal se converte no fenômeno que exige explicação. Para Toulmin a regra é a variabilidade conceitual.

Para Prigogine, as escolhas, as possibilidades, a incerteza, são ao mesmo tempo uma propriedade do universo e próprias da existência humana. Elas abrem novas perspectivas para a ciência e uma nova racionalidade, aonde verdade científica não mais é sinônimo de certo ou determinado e aonde o incerto e o indeterminado não estão baseados na ignorância, no desconhecimento. Assinala que a marca do nosso tempo é uma ciência em que o *ser* e a *estabilidade* deram passagem para a *evolução* e a *mudança*.

O biólogo Ernest Mayr [13] provavelmente atribuiria ao enfoque de Prigogine o caráter de uma redução “fiscalista” (no sentido de Mayr), pois trata principalmente das teorias fundamentais da física, questionando o determinismo subjacente e propondo uma reformulação de suas bases em termos probabilísticos e de certa forma reforçando a visão de que a física é o paradigma da ciência. Ainda assim, entendemos que a contribuição de Prigogine, muito mais do que uma autêntica epistemologia, tem o mérito de mostrar que mesmo em nossos tempos, que a muitos parece transcorrer um período de ciência normal nos moldes kuhnianos, existe espaço para o novo. Uma reformulação das leis fundamentais da física como propõe Prigogine é uma transformação, sem dúvida, arrojada e inovadora. Ela coloca em evidência o “caráter imprevisível do desenvolvimento da ciência” [2, p. 31] e nos mostra como o avanço da ciência está intimamente relacionado com um permanente questionamento, uma desilusão, com o

⁸Com base nos GSPs e das interações persistentes é que Prigogine procura descrever a auto-organização física e biológica da natureza. As ressonâncias de Poincaré e GSPs quânticos requerem, segundo Prigogine, uma formulação estatística da mecânica quântica fora do espaço de Hilbert, que inclui a quebra da simetria temporal e é irreduzível à descrição em termos de função de onda.

conhecimento anterior, como asseverava Bachelard [14].

Mais do que isso, através da recuperação da importância do tempo e dos processos irreversíveis Prigogine pretendeu nos mostrar que é possível reconstruir uma aliança entre o homem (sua cultura, sua sociedade e seus saberes) e a aventura de exploração da natureza (o saber científico). Tendo iniciado estudos de sistemas físicos longe do equilíbrio, Prigogine levou vinte anos para chegar ao conceito de *estrutura dissipativa* e perceber que, longe do equilíbrio termodinâmico, a matéria adquire novas propriedades. Sensibilidade e, portanto, movimentos coerentes de grande alcance, possibilidade de estados múltiplos e em consequência, uma história das “escolhas” feitas pelo sistema são tipicamente propriedades estudadas pela física matemática não-linear. Prigogine não cessou, ao longo de sua carreira, de aprofundar as temáticas envolvidas com o conceito de *estruturas dissipativas* estendendo os estudos para outros campos, como biologia e meteorologia. O resultado foi uma nova imagem da ciência que ele, incessantemente, procurou disseminar. O “novo estado da matéria” (longe do equilíbrio, e descrito por equações não lineares) permite compreender melhor o mundo que nos rodeia. “O respeito à vida tem um grande significado. A vida não é somente química [...] a vida expressa melhor do que qualquer outro fenômeno físico algumas leis essenciais da natureza. A vida é o reino do não linear, da autonomia do tempo, é o reino da multiplicidade das estruturas. E isso não se pode ver facilmente no universo não vivente” [15, p. 33-35].

Agradecimento

Agradecimento especial aos Professores Doutores Marco Antonio Moreira e Felipe Rizzato, do Instituto de Física da UFRGS, pela colaboração e revisão deste

trabalho.

Referências

- [1] Attico Chassott, *Episteme* **17**, 213 (2003).
- [2] Ilya Prigogine, *As Leis do Caos* (Editora UNESP, São Paulo, 2002).
- [3] Kerson Huang, *Statistical Mechanics* (John Wiley & Sons, Massachusetts, 1987) 2^a ed., 512 p.
- [4] M. Gell-Mann, *The Quark and the Jaguar* (Little Brown and Co., London, 1994).
- [5] J.P. Lowe, *Journal of Chemical Education* **65**, 403 (1988).
- [6] Ilya Prigogine, *O Fim das Certezas - Tempo, Caos e Leis da Natureza* (Editora UNESP, São Paulo, 1996).
- [7] B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature* (J. Wiley, San Francisco, 1982).
- [8] P. Glansdorff e I. Prigogine, *Structure, Stabilité et Fluctuations* (Masson, Paris, 1971).
- [9] D. Ruelle, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 405 (1986) e *Commun. Math. Phys.* **125**, 239 (1989).
- [10] H. Hasegawa and W.C. Saphir, *Phys. Rev. A* **46**, 7401 (1993).
- [11] P. Gaspard, *J. of Physics A*, **25**, L483 (1992).
- [12] Stephen Toulmin, *La Comprensión Humana* (Alianza Editorial, Madrid, 1977).
- [13] Ernst Mayr, *O Desenvolvimento do Pensamento Biológico: Diversidade, Evolução e Herança* (Editora da UnB, Brasília, 1998).
- [14] Gaston Bachelard, *A Filosofia do Não* (Editorial Presença, Lisboa, 1988).
- [15] Ilya Prigogine, *El Nacimiento del Tiempo* (Tusquets Editores, Buenos Aires, 2006).