

# Ilya Prigogine: uma visão crítica

(*Ilya Prigogine: a critical assessment*)

Marcel Novaes<sup>1</sup>

*Departamento de Física, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil*

Recebido em 13/5/2009; Aceito em 1/7/2009; Publicado em 26/3/2010

A obra de divulgação científica de Ilya Prigogine é avaliada de forma crítica. Com relação à sua suposta teoria que encontraria na dinâmica caótica uma explicação determinista para a tendência irreversível ao equilíbrio, argumento que suas motivações são infundadas, suas contribuições inexistentes e suas conclusões exageradas. As áreas da física para as quais ele busca chamar atenção são de fato interessantes, mas ele presta um desserviço ao público ao mistificá-las.

**Palavras-chave:** irreversibilidade, caos, determinismo.

Ilya Prigogine's work on the popularization of science is critically discussed. Concerning his alleged theory that would find in chaotic dynamics the deterministic mechanism for an irreversible approach to equilibrium, I argue that his motivation is unsound, his contributions nonexistent and his conclusions exaggerated. The areas of physics to which he tries to draw attention are quite interesting, but he does a disservice to the public when he mystifies them.

**Keywords:** irreversibility, chaos, determinism.

## 1. Introdução

No volume 30(2) desta Revista [1] a Profa. Neusa Massoni apresenta uma introdução às idéias filosóficas do químico Ilya Prigogine [1], ganhador do Nobel de 1976 e autor de diversos livros de divulgação científica. As idéias de Prigogine são expostas de maneira clara e fiel, mas o tom geral do artigo é entusiasmado e talvez demasiado laudatório. Por exemplo: “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”; e ainda: “A visão de Prigogine é radicalmente nova com relação à física ocidental”. Na conclusão lemos que “uma reformulação das leis fundamentais da física como propõe Prigogine (...)”.

O próprio Prigogine não é muito dado à modéstia. Em *O Fim das Certezas* [2] ele escreve na Introdução que “A ambição deste livro é apresentar essa transformação das leis da física e, portanto, de toda a nossa descrição da natureza”. Mais para o final do livro, ele afirma que “em qualquer nível que seja, a física e as outras ciências confirmam nossa experiência da temporalidade: vivemos num universo em evolução. O essencial deste livro visa a mostrar que a última fortaleza que resistia a esta afirmação acaba de ceder. Estamos, agora, em condições de decifrar a mensagem da evolução tal

como ela se enraíza nas leis fundamentais da física”. Aparentemente o que se anuncia é realmente de tirar o fôlego. Prigogine parece ter se tornado uma espécie de guru em diversos meios, nos quais se admite como evidente que a ciência está passando a um novo “paradigma” no qual o determinismo teria sido superado. No livro *Do Caos à Inteligência Artificial* [3], ele é saudado como fundador de “uma nova visão de mundo” e, segundo a autora, “sua teoria admite extrapolações nos mais diversos domínios: desde a formação dos ciclones até a organização das formigas, passando pelo crescimento urbano”.

Prigogine fez excelentes trabalhos na área de termodinâmica de não-equilíbrio [4–6], além de ter formado dois bons grupos de pesquisa (em Bruxelas e em Austin). Além disso, ganhou o Prêmio Nobel. Mas esses trabalhos foram feitos nas décadas de 50 e 60, enquanto que sua atividade de elaboração de livros de divulgação científica foi bem posterior. A verdade é que as idéias filosóficas de Prigogine estão longe de encontrar aceitação unânime ou mesmo geral entre os especialistas [7–10] (não é que suas idéias sejam controversas; elas são antes ignoradas e consideradas inofensivas do que propriamente criticadas), e creio que seria importante a exposição de considerações mais críticas. Neste breve artigo eu argumento que: 1) A motivação

<sup>1</sup>E-mail: marcel.novaes@gmail.com.

mesma da argumentação de Prigogine é deficiente; 2) A “revolução” que ele pretende ter introduzido foi feita por outras pessoas; 3) Suas conclusões não se sustentam.

## 2. Sua motivação

A preocupação central de Prigogine é como reconciliar a existência de fenômenos naturais irreversíveis com a reversibilidade das equações de movimento da mecânica clássica. O leitor talvez imagine que a preocupação é anacrônica, já que o problema foi resolvido pela mecânica estatística há mais de um século (Boltzmann): a segunda lei da termodinâmica, ligada à existência de processos irreversíveis, só é válida no limite termodinâmico, em que a probabilidade de ocorrência de fenômenos contrários a ela tende a zero. Em outras palavras, o movimento microscópico é sempre reversível e determinístico, enquanto que macroscopicamente pode-se observar tendência irreversível ao equilíbrio. Isso se deve ao fato de que há uma tremenda diferença de escala, e as variáveis em jogo são completamente distintas. Posições e velocidades de um número imenso de partículas, no primeiro caso, e volume, pressão, temperatura, densidade, energia média, etc. no segundo. Essas variáveis macroscópicas (ditas fenomenológicas) só fazem real sentido no limite termodinâmico e são definidas em termos de comportamentos médios das variáveis microscópicas. Não é o caso de fazer aqui uma revisão dessa teoria, que se encontra em dezenas de livros.

O ponto é que Prigogine não se contenta com essa explicação probabilística. O fato de que para observar uma flutuação espontânea de 0.1% na densidade de um centímetro cúbico de gás em equilíbrio tenhamos de esperar um tempo maior que a idade do universo não é suficiente para ele. Ele quer uma teoria na qual a evolução para o equilíbrio seja realmente, mecanicamente, microscopicamente, irreversível. Para Prigogine, a interpretação probabilística faz da irreversibilidade macroscópica uma “ilusão”. Em *O Fim das Certezas* (p. 11) ele escreve “Desde a época de Boltzmann, a flecha do tempo foi, portanto, relegada ao domínio da fenomenologia. Nós, humanos, observadores limitados, seríamos responsáveis pela diferença entre passado e futuro. Esta tese, que reduz a flecha do tempo ao caráter aproximado de nossa descrição da natureza, ainda é defendida na maior parte dos livros recentes”. Um pouco mais à frente (p. 28) ele diz “Ora, essa interpretação, que implica que nossa ignorância, o caráter grosseiro das nossas descrições, sejam responsáveis pelo segundo princípio [da termodinâmica] e, portanto, pela flecha do tempo, é insustentável. Ela nos força a concluir que o mundo pareceria perfeitamente simétrico no tempo para um observador bem informado, como o demônio imaginado por Maxwell, capaz de observar os microestados”.

Atualmente, a descrição dada acima é de fato considerada perfeitamente correta. Descontada a mecânica quântica, o mundo é determinístico e simétrico para um observador bem informado (é claro que na prática a mecânica quântica existe e esse tal observador não existe, mas estamos falando em princípio). Isso não significa que o futuro seja “equivalente” ao passado ou que descrições termodinâmicas macroscópicas, fenomenológicas, sejam erradas. Elas se aplicam a um determinado regime de observação e descrevem muito bem inúmeros processos físicos, inclusive irreversíveis. Se Prigogine deseja invalidar essa visão, ele precisa revolucionar a mecânica clássica. É isso que ele diz que faz, mas será que faz mesmo? Seu objetivo é introduzir uma descrição que inclua desde o começo a noção de probabilidade, e para isso ele considera sistemas de poucos graus de liberdade com dinâmica caótica. Entretanto, veremos que o que ele descreve é equivalente à visão tradicional.

## 3. Sua “revolução”

A fim de derivar “microscopicamente” a irreversibilidade, Prigogine descreve um formalismo probabilístico da mecânica. Essa é naturalmente a teoria dos ensembles, introduzida por Gibbs e Einstein. Imaginamos um conjunto grande de sistemas mecânicos idênticos, preparados em diferentes condições iniciais. A quantidade central passa a ser a função de distribuição  $\rho(x)$  que é a densidade de probabilidade de encontrarmos um sistema que esteja no ponto  $x$  do espaço de fase. De um outro ponto de vista, podemos pensar que há apenas um sistema e que temos inicialmente não apenas uma condição inicial precisa, mas um conjunto de condições iniciais, cada uma com uma probabilidade associada. Temos em mente um sistema de poucos graus de liberdade.

O uso de probabilidades neste contexto se deve unicamente à impossibilidade prática de se determinar a posição do sistema com precisão infinita. Não há indeterminismo essencial, como na mecânica quântica. A evolução temporal é dada pelo operador de Perron-Frobenius  $U(t)$  cuja ação é simplesmente  $[U(t)\rho](x) = \rho(x(-t))$ , ou seja, propagamos os pontos do espaço de fase para trás. Suponhamos um mapa com tempo discreto (que é o exemplo dado por Prigogine), de modo que  $U = U(1)$ . Esse operador pode ser diagonalizado num dado espaço funcional. Se admitimos funções de distribuição singulares,  $U$  é um operador unitário e portanto todos os seus autovalores têm módulo igual a 1. Sabemos que todo sistema caótico tem um conjunto de órbitas periódicas instáveis que é denso no espaço de fase. A cada órbita dessas corresponde uma autofunção de  $U$  que é singular (é uma função do tipo Delta de Dirac sobre a órbita).

Entretanto, podemos restringir o espaço funcional a funções suaves. Isso corresponde a levar em conta

a precisão finita da determinação da condição inicial e descartar trajetórias “puras”. O operador  $U$  nesse caso deixa de ser unitário. Temos assim uma teoria espectral do caos. Se o autovalor 1 for não-degenerado o sistema é dito *ergódico*. A autofunção correspondente,  $\rho_1(x)$ , é uniforme na superfície de energia constante. Se além disso o módulo do segundo autovalor for estritamente menor que 1, ou seja, se existir um gap espectral, o sistema é dito *mixing* e o tamanho do gap está ligado ao tempo de relaxação, isto é, o tempo de evolução para o equilíbrio. Alguns dos nomes ligados ao desenvolvimento dessa teoria: Ruelle, Sinai, Bowen, Pollicott. Os autovalores mencionados são também conhecidos como ressonâncias de Ruelle-Pollicott.

Vamos detalhar a questão da evolução para o equilíbrio. Vamos supor um sistema mixing que possui 1 e  $z$  como os primeiros autovalores e vamos supor que  $z = e^{-1/\tau + i\phi}$ . Dada uma distribuição de probabilidade inicial (suave) que é uma soma das autofunções (suaves) de  $U$ ,  $\rho_0 = a\rho_1 + b\rho_2 + \dots$ , ao longo do tempo temos  $\rho_0(t) = a\rho_1 + be^{it\phi}e^{-t/\tau}\rho_2 + \dots$  e é fácil ver que assintoticamente apenas a distribuição  $\rho_1$  irá permanecer, que podemos chamar de distribuição de equilíbrio. Para tempos longos a correção desaparece como  $e^{-t/\tau}$  ( $\tau$  é o tempo de relaxação). Portanto a evolução temporal de uma condição inicial arbitrária (desde que suave) é irreversível.

Tudo o que vai acima é matéria de livros-texto de sistemas caóticos. O leitor pode consultar por exemplo as Refs. [11–13]. Ampla literatura existe também referente a questões análogas no contexto de cadeias de Markov (ver por exemplo a Ref. [14]). 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.

#### 4. Suas conclusões

Prigogine acredita que a teoria exposta na seção anterior revolucionaria não só a mecânica clássica mas toda a física, ao revelar 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. Fundamental para seu argumento é a idéia de que a descrição em termos em ensembles e distribuições de probabilidade seria essencialmente diferente, mais rica, do que a descrição em termos de trajetórias. “A descrição probabilista é mais rica que a descrição individual (...) A equivalência entre o nível individual e o nível estatístico é totalmente destruída” [2, p. 39]. “As trajetórias são eliminadas da descrição probabilística (...) Devemos, portanto, eliminar a noção de trajetória de nossa descrição mi-

croscópica” (Ref. [15], *apud* Ref. [1]).

As declarações são evidentemente exageradas. Em nenhum momento se faz necessário repensar as leis fundamentais da física. De maneira alguma eliminamos a noção de trajetória da nossa descrição microscópica. Simplesmente optamos por uma descrição estatística como consequência da nossa ignorância sobre as condições iniciais. Por mais que Prigogine diga que a representação estatística é irreduzível, ela não é. Como vimos na seção anterior, o operador de Perron Frobenius é definido a partir das trajetórias. Portanto não há hipótese de qualquer resultado obtido a partir dele ser mais rico do que a descrição em termos de trajetórias.

A idéia de que a descrição probabilística é a mais fundamental simplesmente não faz sentido. Suponhamos uma bola de sinuca sobre uma mesa sem atrito, na qual a dinâmica é caótica. No instante inicial a bola se encontra numa determinada posição com uma determinada velocidade. Como não podemos medir essas quantidades com precisão infinita, representamos a bola no espaço de fase por uma distribuição de probabilidade fortemente concentrada mas com suporte finito. Depois de um tempo longo, a distribuição de probabilidade terá convergido para o equilíbrio, tornando-se uniforme sobre a superfície de energia. Mas o que isso significa realmente? Por acaso a bola de sinuca está espalhada pela mesa? Por acaso temos igual probabilidade de encontrá-la em qualquer ponto? Ora, é claro que não! A bola continua tendo posição e velocidade bem definidas, e seguindo uma trajetória perfeitamente determinística. A distribuição de probabilidade constante reflete apenas nossa ignorância, ditada pelas limitações de medida. Isto é algo absolutamente elementar, mas que se perde na retórica hiperbólica (ergódica?) de Prigogine.

#### 5. Conclusão

Ilya Prigogine deu importantes contribuições à termodinâmica de não-equilíbrio. Seus livros mais antigos [4–6] são considerados muito bons. Foi agraciado com o Prêmio Nobel e deram seu nome ao Centro de Sistemas Complexos da Universidade do Texas em Austin. Estimulou toda uma geração de físicos a se dedicarem aos problemas da auto-organização, dos fenômenos fora do equilíbrio e das estruturas dissipativas.

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. Mais do que isso, seus textos de divulgação científica buscam sempre enfatizar aspectos “revolucionários” de teorias que em verdade são plenamente tradicionais. Atraem a atenção de leigos interessados das áreas de ciências sociais, filosofia, biologia, etc. mas ao custo de passar-lhes uma imagem equivocada do que seja o determinismo e de como os

físicos encaram o tempo. Sobre a “flecha do tempo” o leitor pode consultar por exemplo [16–18].

Em [3] Prigogine diz que “existe ainda hoje um paradoxo do tempo, pois o tempo que vivemos é essencialmente irreversível, enquanto que nos objetos físicos simples não se vê essa flecha do tempo. (...) o mundo científico aceitou que ‘o tempo é uma ilusão’ (...) quando se compreender que a dinâmica não é determinista, que a noção de trajetória se perde com o tempo, e que essa perda de informação conduz necessariamente a uma forma de irreversibilidade, deve-se concluir que a solução do paradoxo do tempo está ligada a uma melhor compreensão dos sistemas dinâmicos instáveis”. Como já deixei claro, não acho que se deva dar qualquer importância a declarações como essas. Por outro lado, acho que Prigogine é um bom escritor, que discute temas interessantes e que enfatiza uma série de tópicos que são dignos de muita atenção, como sistemas complexos, caóticos, fora do equilíbrio, fenômenos irreversíveis, auto-organizados, etc. Enfim, o tipo de coisa que se estuda no Instituto Santa Fé [19], digamos. Mas o fato é que quem se interesse seriamente por essas áreas pode encontrar melhores fontes e melhores guias.

## Referências

- [1] N.T. Massoni, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **30**, 2308 (2009).
- [2] I. Prigogine, *O Fim das Certezas* (Ed. Unesp, São Paulo, 1996).
- [3] G. Pessis-Pasternak, *Do Caos à Inteligência Artificial* (Ed. Unesp, São Paulo, 1992).
- [4] I. Prigogine, *Non-equilibrium Statistical Mechanics* (Interscience, New York, 1962).
- [5] I. Prigogine, *Introduction To Thermodynamics of Irreversible Processes* (Interscience, New York, 1967).
- [6] G. Nicolis and I. Prigogine, *Self-Organization in Non-equilibrium Systems* (John Wiley & Sons, New York, 1977).
- [7] J. Bricmont, *Physica Magazine* **17**, 159 (1995) [[arxiv.org/abs/chao-dyn/9603009](http://arxiv.org/abs/chao-dyn/9603009)].
- [8] C. Zuppa, *Cinta de Moebio* **18**, Dezembro (2003), <http://www.moebio.uchile.cl/18/zuppa.htm>.
- [9] D. Ruelle, in: *Highlights of Mathematical Physics*, edited by A.S. Fokas, J. Halliwell, T. Kibble and B. Zegarlinski (American Mathematical Society, Providence, 2002).
- [10] O Prof. Robert Dorfman (ver [11]) ameaçou pedir demissão caso Prigogine fosse contratado pela Universidade de Maryland como chegou a ser cogitado.
- [11] J.R. Dorfman, *An Introduction to Chaos in Nonequilibrium Statistical Mechanics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1999).
- [12] P. Gaspard, *Chaos, Scattering and Statistical Mechanics* (Cambridge University Press, Cambridge, 2008).
- [13] A. Katok and B. Hasselblatt, *Introduction to the Modern Theory of Dynamical Systems* (Cambridge University Press, Cambridge, 1996).
- [14] D.A. Levin, Y. Peres and E.L. Wilmer, *Markov Chains and Mixing Times* (American Mathematical Society, Providence, 2008).
- [15] I. Prigogine, *As Leis do Caos* (Ed. Unesp, São Paulo, 2002).
- [16] H.D. Zeh, *The Physical Basis of the Direction of Time*, (Springer-Verlag, Berlin, 2007).
- [17] H. Price, *Time's Arrow and Archimedes' Point* (Oxford University Press, Oxford, 1997).
- [18] J.J. Halliwell, J. Pérez-Mercader and W.H. Zurek (eds.), *Physical Origins of Time Asymmetry* (Cambridge University Press, Cambridge, 1996).
- [19] <http://www.santafe.edu/>.