

BIOLOGIA NOS CURSOS DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Paulo Celso Ferrari

Instituto de Física – UFG

Caixa Postal 131 – Campus II

74 001-079 – Goiânia – GO – Brasil

Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica – UFSC

José André Peres Angotti¹

Departamento de Metodologia de Ensino

Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica – UFSC

Campus Universitário – Trindade

88040-900 – Florianópolis – SC – Brasil

É inquestionável que os cursos de Biologia tenham em seus programas uma disciplina que introduza conceitos fundamentais de Física, com destaque usual aos universais da “mecânica”. Muito se discute sobre o conteúdo curricular de Física para esses cursos, que consiga atender às necessidades reais dos futuros biólogos (Okumo, 1982). No entanto, nos cursos de Física não existe uma disciplina que introduza conceitos da Biologia. Os físicos que decidem se dedicar à biofísica, por exemplo, o fazem através de atividades de iniciação científica ou somente na pós-graduação. O reduzido número de físicos que eventualmente se alinham na pesquisa interdisciplinar não justifica a introdução de uma disciplina específica, porém, há motivos mais fortes que atingem todas as possíveis carreiras de um físico, dentre elas a do *educador* que deverá ser formado para desenvolver atividades didático/pedagógicas disciplinares, multidisciplinares e interdisciplinares, até mesmo os reconhecidos “temas transversais”, complexos por natureza.

Um dos motivos dos mais relevantes é que a Biologia acrescenta a necessidade de se enfrentar os sistemas abertos, além de partilhar o enfrentamento de questões primevas do conhecimento, a exemplo da *origem* e do *conceito* de vida, similarmente às da Física e Cosmologia: *origem e conceito de universo*. Fenômenos da Biologia oferecem a oportunidade de se introduzir conceitos de complexidade e caos. Através dos sistemas biológicos pode-se desenvolver com maior profundidade a Termodinâmica, pois permite uma compreensão mais profunda de conceitos como determinismo, entropia e irreversibilidade.

Foi procurando dar uma contribuição a um problema da Biologia que o célebre físico austríaco Erwin Schrödinger se deparou com uma situação inédita para a Física. Após ter sido convidado para proferir um ciclo de palestras no Dublin Institut for Advanced Studies, em fevereiro de 1943, Schrödinger publicou um “pequeno” livro intitulado *O que é a vida?*, onde expõe sua opinião sobre a ainda hoje delicada questão da variabilidade genética.

Apesar da abrangência do título do seu livro, Schrödinger não aborda muitas das questões pertinentes ao tema “vida”. Referenda conclusões já evidentes para os biólogos na época, relativas à divisão celular e à hereditariedade, e reforça as contribuições que julgava pudessem ser dadas pela mecânica quântica a questões relativas aos genes. Sua preocupação estava concentrada na *permanência* do padrão genético total de uma espécie durante séculos e a riqueza de detalhes preservados de uma geração a outra numa mesma família apesar da variabilidade a que estão sujeitos os organismos.

Schrödinger inicia sua explicação para a permanência apresentando uma solução para a estrutura do gene. Para tanto, reforça algumas conclusões já indicadas pelo também físico Max Delbrück para a pressuposta estabilidade da molécula componente do gene em face às

¹ Apoio CNPq

constantes ameaças de mutação a que estariam sujeitas, tanto por influências externas quanto pelas possíveis transições entre isômeros. A Física Clássica desenvolvida até aquele momento nada tinha a contribuir para a explicação da estabilidade das ligações químicas. A Mecânica Quântica, finalmente, fornecia uma explicação plenamente satisfatória, uma vez que esclarecia a existência da barreira energética que separa um estado do outro, cuja altura limita a incidência de transições. No entanto, por si, a existência da barreira não seria condição suficiente para impedir as mutações. Para garantir uma estabilidade tão grande a ponto de preservar as características genéticas era preciso que as forças entre os átomos do material constituinte dos genes fossem comparáveis às existentes entre os átomos de um cristal. Ainda mais, para satisfazer a necessidade de acumular uma enorme quantidade de informações, responsáveis pela formação de um novo ser, um tal cristal não poderia ser periódico. Assim, concluiu que a estrutura básica do gene deveria ser um “cristal aperiódico”:

Com a hipótese do sólido aperiódico estaria resolvida a baixa incidência de mutações, mas um outro desafio o levaria a cogitar a necessidade de novas leis físicas, um problema relacionado com a ordem existente num organismo: a Física deveria explicar a permanência do alto grau de ordem através de gerações seguidas. A termodinâmica estatística prevê que nos processos irreversíveis um sistema tende a um aumento de entropia, estreitamente vinculado a um aumento na desordem. Além do sólido aperiódico, ao se auto-replicar, ter que enfrentar o risco das mutações, segundo a termodinâmica estatística, estaria exposto, portanto à “tendência à desordem”. Para superar esta tendência o organismo teria que estar constantemente absorvendo ordem do ambiente, para evitar a desordem.

Tentando resolver o problema da manutenção da ordem, recorre a dois mecanismos pelos quais eventos ordenados podem ser produzidos: “ordem a partir da desordem” e “ordem a partir da ordem”. Logo no início do livro o autor argumenta que mesmo leis macroscópicas que se manifestam de maneira muito regular (como o comportamento magnético e a difusão de gases) são, no fundo, aproximações de leis estatísticas na escala microscópica. A ordem resultante observada no comportamento de muitas partículas tem sua origem numa atividade conjunta, no interior da qual a atividade individual é desordenada. Este seria um possível mecanismo através do qual um evento produz ordem, mas, esse mecanismo, da “ordem a partir da desordem”, seria aplicável somente a certos tipos de eventos em sistemas onde as partículas estariam fracamente agregadas. Para os sistemas compostos de sólidos, como o movimento planetário ou mesmo o mecanismo de um relógio, valeria o mecanismo da “ordem a partir da ordem”. Esta manutenção da ordem seria garantida pelo fato desses fenômenos se referirem a um estado mais agregado da matéria, o estado sólido. A “ordem a partir da ordem” seria mantida pela mesma razão: um sólido não estaria sujeito às variações aleatórias típicas que ocorrem em outros estados físicos menos agregados. O sólido aperiódico teria uma enorme capacidade de armazenar informações através das múltiplas seqüências possíveis, uma molécula grande o suficiente para assegurar a manutenção de toda a ordem.

Argumentando que o cristal aperiódico, além das fortes ligações químicas, seria grande o suficiente para escapar das leis da termodinâmica, Schrödinger opta pelo mecanismo da ordem a partir da ordem e acaba remetendo a solução de todo o problema da permanência para a estabilidade do cristal aperiódico, garantida pela mecânica quântica. Mas, se além de manter a ordem pré-existente, um organismo é capaz ainda de aumentar seu grau de ordem, de alguma forma teria que eliminar entropia. Para explicar esta misteriosa capacidade Schrödinger apelou para um conceito eminentemente biológico: o metabolismo. O metabolismo seria responsável pela eliminação de entropia, o organismo se alimentaria de “entropia negativa”.

O conceito de entropia negativa foi muito bem aceito. Eliminar entropia correspondia a absorver ordem. Mas o organismo teria a capacidade quase mágica de reconhecer a ordem existente nos alimentos para se valer da entropia negativa. Tudo funcionaria como se o

organismo fosse um sistema que não dissipasse energia. A entropia negativa parecia resolver o problema da manutenção da ordem no processo de auto-replicação, mas uma nova característica percebida nos sistemas de não-equilíbrio acabou tornando esta solução ainda mais complexa.

Quando um organismo está no estado estacionário, sua entropia permanece constante ao longo do tempo. A produção de entropia $d_i S$ deve, então ser compensada pelo fluxo de entropia. Podemos, pois, escrever: $dS = 0 = d_e S + d_i S$, ou $d_e S = -d_i S < 0$. A vida, concluía Schrödinger, nutre-se de um “fluxo entrópico negativo”, mas pode-se também dizer, e para mim era o mais importante, que a vida se acha associada à produção de entropia e, portanto, aos processos irreversíveis. (Prigogine, 1996, p.65)

Embora sua afirmação pareça concordar com a de Schrödinger, o detalhe sutil sublinhado por Prigogine subverte a solução proposta para conter o aumento da desordem associada ao aumento da entropia nos processos irreversíveis. O reconhecimento de que a vida está associada à produção de entropia, sendo a vida essencialmente um sistema aberto, longe do equilíbrio e mesmo assim se mantendo organizado, equivale a afirmar que um sistema irreversível pode permanecer organizado, ou mesmo ter sua ordem aumentada! Os sistemas abertos são tipicamente sistemas de não-equilíbrio. Prigogine utiliza a denominação “estruturas dissipativas” para descrever o comportamento dos sistemas de não-equilíbrio. Este comportamento é a chave para a explicação atual da permanência na transmissão genética, as chamadas etapas catalíticas.

A característica sem precedentes encontrada neste tipo de sistema é a capacidade de auto-organização. A distância do equilíbrio é um parâmetro que define o regime de atividade de um sistema. Quanto mais longe do equilíbrio, maior a possibilidade de auto-organização. O material genético não exerce o papel tão determinante quanto lhe atribuiu Schrödinger, atua em conjunto com uma série de outras moléculas que lhe asseguram, inclusive, a estabilidade.

Schrödinger não abordou o problema da evolução da vida ou suas origens, limitou-se a discutir o problema da variação hereditária tentando justificar a permanência pela estabilidade atribuída ao cristal que, segundo ele, seria responsável pela manutenção da ordem dinâmica no processo de reprodução. Mesmo para este caso, a resposta de Stuart A. Kauffman para a solução apresentada por Schrödinger também é negativa. Kauffman descarta a necessidade ou a suficiência de uma estrutura estável como a de um sólido para garantir a ordem.

O microcódigo que o grande sólido aperiódico possibilitou obviamente não é suficiente para garantir a ordem. O genoma especifica uma vasta rede de atividades de processamento paralelo. O comportamento dinâmico de uma rede dessas poderia ser catastroficamente caótico, barrando aos comportamentos extremamente variáveis do sistema codificado qualquer herança selecionável. Ter um código em uma estrutura estável como o DNA não pode, em si, assegurar que o sistema codificado se comporte de maneira suficientemente ordenada para uma variação hereditária. (Kauffman, 1997, p. 117)

Mas os estudos do DNA vão ainda mais longe e descartam totalmente o modelo de sólido estável para assegurar a ordem no processo de replicação. Para começar, não se pode falar em auto-replicação, o DNA não se replica por si mesmo. Além disso, não é tão estável quanto previa Schrödinger:

De fato, deixado a si mesmo, o DNA não pode sequer copiar a si próprio: a duplicação do DNA simplesmente não prosseguirá na ausência das enzimas necessárias para realizar o processo. Mais ainda, o DNA não é intrinsecamente estável: sua integridade é mantida por toda uma parafernália de proteínas envolvidas em impedir ou reparar erros de cópia, quebras espontâneas e outros tipos de danos que ocorrem no processo de replicação. (Keller, 2002, p. 39)

Diante da reconhecida competência de Schrödinger, poderíamos nos perguntar por que ele não foi capaz de admitir que sistemas abertos, como os sistemas vivos, poderiam desenvolver um mecanismo ao mesmo tempo irreversível e cada vez mais ordenado? Quais seriam as limitações técnicas ou filosóficas impostas naquela época? Afinal, quais limitações epistemológicas tiveram que ser superadas para que a ciência contemporânea conseguisse vislumbrar o problema da permanência – ou o problema da variação hereditária – como ele está colocado hoje?

No aspecto técnico, vale considerar que a entrada dos computadores na simulação de modelos matemáticos foram de importância vital para o estudo de estruturas químicas não periódicas. Mas o aspecto mais relevante envolvido na impossibilidade de se admitir a auto-organização de um sistema é de cunho filosófico. Durante anos os cientistas perseguiram o ideal de que era possível reduzir um sistema complexo em partes mais simples, em constituintes fundamentais, a partir dos quais se chegaria à explicação de fenômenos complexos. Hoje este ideal é questionado em função do comportamento coletivo que aparece em determinados sistemas, como nas estruturas dissipativas de Prigogine.

Este debate filosófico pode afetar profundamente a visão de ciência dos professores de Física. Formados dentro da visão hegemônica, essencialmente determinista, os professores tendem a reproduzir em sua prática de ensino uma concepção bastante dogmática e disciplinar da produção científica. Ao situar três questões de Física para o ensino de Física na discussão de conteúdos curriculares, um dos autores deste texto identifica três grandes conflitos: Física material e ondulatória; Física clássica e moderna; Física do equilíbrio e irreversível. A respeito da compreensão dos professores do ensino médio, observa que os professores sequer acompanham o terceiro conflito.

A possibilidade de um tratamento matemático probabilístico, inclusive para fenômenos macroscópicos, rompe com a obrigatoriedade do determinismo. O alerta dado por Prigogine tem o valor pedagógico de salientar que a reversibilidade é uma decorrência da modelagem matemática linear que fomos obrigados a fazer antes dos computadores. Essa espetacular possibilidade de abordar matematicamente os seres vivos como sistemas abertos inaugura uma ruptura epistemológica justamente porque liberta a pesquisa científica do determinismo dos sistemas lineares. Já não seremos obrigados a submeter a natureza às nossas limitações matemáticas. A possibilidade de a Física abordar o não determinismo dos sistemas abertos, como são os sistemas da Biologia e da Química, ao mesmo tempo que possibilita a percepção de diferenças metodológicas, oferece também a oportunidade de reconciliar essas disciplinas científicas. Tal aproximação pode facilitar o encaminhamento da interdisciplinaridade como possibilidade efetiva de investigação, ao lado das tradicionais, pautadas pela disciplinaridade. No ensino/aprendizagem de Física e Ciências da Natureza, cabe a “tradução ou transposição” dos achados de hoje e do futuro breve, para o universo de compreensão e tratamento didático-pedagógico dessas questões e outras similares que demandam *trabalho interdisciplinar* em sala de aula para os níveis de graduação e também da escolaridade básica, a saber: ensino fundamental e médio.

Bibliografia

- ANGOTTI, José André Peres (1991)– *Fragmentos e Totalidades no Conhecimento Científico e no Ensino de Ciências* – Tese de Doutorado – São Paulo: USP.
- BOHM, David (1996) – *A Totalidade e a Ordem Implicada* - São Paulo: Editora Cultrix Ltda.
- DYSON, F. (2000) – *Infinito em todas as direções* – São Paulo, Companhia das Letras.

GLEICK, James (1989) – *Caos - a criação de uma nova ciência* – Rio de Janeiro: Editora Campus

HAUSMANN, Rudolf (1997) – *História da biologia molecular* – Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética.

KELLER, Evelin Fox (2002) – *O século do gene* – Belo Horizonte: Crisálida.

MORIN, Edgar; ALMEIDA, Maria da Conceição de; CARVALHO, Edgard de Assis (orgs.) (2002) – *Educação e complexidade: os sete saberes e outros ensaios* – São Paulo: Cortez.

KAUFFMAN, Stuart A. (1997) – “O que é vida?": Schrödinger estava certo? – in MURPHY, Michael P.; O'NEILL, Luke A. J. (organizadores)– *O que é vida? 50 anos depois* – São Paulo: Fundação Editora UNESP.

OKUMO, Emico; CALDAS, Iberê Luiz; CHOW, Cecil (1982) – *Física para Ciências Biológicas* – São Paulo: Harper & Row do Brasil.

PRIGOGINE, Ilya (1996) – *O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza* – São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista.

SCHRÖDINGER, Erwin (1997) – *O que é vida? O aspecto físico da célula viva* – São Paulo: Fundação Editora UNESP.

UFSC, CFM/Coord. de Graduação do curso de Física (2002) – *Projeto político pedagógico - curso de licenciatura* – Florianópolis: mimeo.