

O que é vida? O aspecto físico da célula viva de Erwin Schrödinger

What is life? The Physical Aspect of the Living Cell by Erwin Schrödinger

Saulo Luis Lima da Silva^{*1}, Angélica Sousa da Mata²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

²Universidade Federal de Lavras, Departamento de Física, Lavras, MG, Brasil.

Recebido em 31 de dezembro de 2020. Revisado em 31 de janeiro de 2021. Aceito em 01 de fevereiro de 2021.

Neste trabalho apresentamos a resenha do livro *O que é vida?* de Erwin Schrödinger, escrito há quase 80 anos. Sua leitura nos permite uma experiência única de apreciar como um dos maiores físicos do século XX levantava suas questões e como buscava soluções das mesmas. A interdisciplinaridade é uma característica da obra. O leitor será apresentado a conteúdos de física, química, biologia, filosofia, religião, entre outros. Os temas abordados na obra foram, e continuam sendo, de grande importância para o desenvolvimento da ciência. Esse é mais um dos motivos para considerar sua leitura extremamente atual. Com esta resenha, esperamos auxiliar a leitura dessa obra atemporal.

Palavras-chave: Schrödinger, O que é vida?, livro, resenha.

In this work we present a review of *What is life?* by Erwin Schrödinger, written almost 80 years ago. Reading this book allows us a unique experience to appreciate as one of the greatest physicists of the 20th century raised his questions and how he searched for solutions to them. Interdisciplinarity is a characteristic of this book. The reader will be introduced to contents of physics, chemistry, biology, philosophy, religion, among others. The themes covered in the book were, and still being, of major significance for the development of science. This is one more reason to consider it reading extremely current. With this review, we hope to help reading of this timeless book.
Keywords: Schrödinger, What is Life?, book review.

O livro *o que é vida?: O aspecto físico da célula viva* de Erwin Schrödinger (Prêmio Nobel de Física de 1933) foi publicado em 1944 [1] e foi baseado em palestras proferidas sob os auspícios do Dublin Institut for Advanced Studies do Trinity College, em fevereiro de 1943. A ideia central da obra é estudar a possibilidade de se entender a vida a partir das leis fundamentais da física e da química. A versão em português da obra foi publicada pela editora Unesp junto com a Cambridge University Press. Além do livro supracitado que será objeto dessa resenha, esta edição também contém mais duas obras do autor: “*Mente e Matéria*” e “*Fragments Autobiográficos*” [2]. A introdução foi feita pelo Prêmio Nobel de Física de 2020, Roger Penrose.

Sobre esse livro, a primeira questão que vem à mente é: por que ler um livro sobre a relação da biologia com a física escrito há quase 80 anos, antes, portanto, até mesmo da descoberta da estrutura em dupla hélice do DNA? O número de respostas que podem ser dadas a essa pergunta beira ao infinito, vamos nos limitar a apenas algumas aqui. A começar pela que o leitor encontrará na introdução do livro, onde Penrose diz que esta obra:

“*deve certamente figurar entre os mais influentes escritos científicos deste século¹. (...) muitos dos cientistas que fizeram contribuições fundamentais à biologia, como J. B. Haldane e Francis Crick, já admitiram ter sido fortemente influenciados pelas amplas ideias apresentadas aqui por este muito original e profundamente judicioso físico*”.

A obra também merece ser lida e relida pois ver um cientista de tamanha importância apresentando suas ideias e a estrutura de seu pensamento de forma tão didática é, certamente, uma experiência única. Ao longo da obra, o leitor será frequentemente presenteado com citações, analogias e referências a pensadores como Goethe, Descartes, Espinosa, Rafael, Schopenhauer, Kant, Planck, Darwin, Mendel, De Vries, Boltzmann, entre outros. Grande parte dos questionamentos bioquímicos levantados na obra já foram resolvidos, mas a maneira de pensá-los continua inteiramente original e de uma riqueza inigualável. Embora o autor não mencione suas grandiosas contribuições científicas em momento algum, todos sabem que, dentre elas, está a criação da Mecânica

* Endereço de correspondência: saulosilva@cefetmg.br

¹ Referindo-se, obviamente, ao século XX. A introdução foi escrita em 1991.

Quântica moderna. Por isso, percebemos ao longo do texto, seu inquestionável e valioso conhecimento sobre física. Durante a leitura, nos deparamos com várias explicações de conceitos físicos abstratos e de grande profundidade de forma tão sedutora que é impossível não se interessar pelo estudo dessa área do conhecimento. Essa é uma leitura não só desejável, mas obrigatória para todos aqueles que trabalham com física. De qualquer forma, uma obrigação extremamente prazerosa.

O autor, no prefácio, apresenta um pedido de desculpas antecipadas. Ele se desculpa por apresentar uma obra que versa sobre alguns assuntos que não são sua principal área de pesquisa. No entanto, dado a grandeza intelectual do autor, pode-se entender esse prefácio como um lamento disfarçado. O autor, como todo amante do conhecimento, lamenta não ter condições de acompanhar os desenvolvimentos de ponta em todas as áreas de pesquisa. Nosso tempo sobre a terra é demasiado curto até mesmo para dominarmos nossa área de atuação, que dirá para todo o conhecimento produzido pela humanidade!

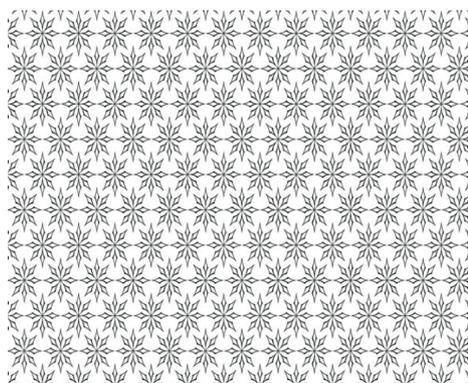
A linearidade é uma característica marcante do texto. Apesar de ser uma coleção baseada em palestras proferidas pelo autor, é importante que o texto de cada capítulo seja lido de maneira contínua. O leitor é advertido logo no início, para alívio de muitos, que não encontrará deduções matemáticas nas páginas seguintes. O motivo não é o fato de o tema ser tão fácil que não necessite deduções matemáticas para explicá-lo, mas exatamente o oposto: é complexo demais para ser explicado por nossa matemática ainda insuficiente. Rapidamente somos apresentados ao objetivo do livro: “*como podem eventos no espaço e no tempo, que ocorrem dentro dos limites espaciais de um organismo vivo, serem abordados pela física e pela química?*” Schrödinger nos diz que a física e a química atuais são incapazes de lidar com o tema, mas não se desanime. Logo em seguida ele não

considera que esse motivo seja suficiente para que tais assuntos não possam ser abordados por essas ciências, inclusive é justamente isso que sua obra se propôs a fazer.

Para exemplificar essa incapacidade, o autor menciona, logo no primeiro capítulo, a fibra cromossômica, que constitui o elemento mais fundamental da célula viva. Tal componente pode ser descrita por um cristal aperiódico, algo considerado, pelos físicos e químicos, extremamente complexo, uma vez que eles estão acostumados a estudar cristais periódicos. Metaforicamente, o cristal periódico é comparado a papéis de paredes em que o mesmo padrão é repetido infinitamente numa periodicidade regular, conforme o exemplo apresentado na Figura 1(a). Nessa metáfora, os cristais aperiódicos seriam como uma tapeçaria de Rafael, uma verdadeira obra de arte representada por um bordado sofisticado sem repetições simples como mostrado na Figura 1(b).

Ainda no primeiro capítulo, de uma forma muito agradável e modesta – se chamando de físico ingênuo – o autor nos leva a concluir que nosso tamanho em relação aos átomos precisa ser incrivelmente grande, isto é, precisamos ser constituídos por um número absurdamente grande de átomos. Caso não fosse assim, nossos movimentos no mundo, bem como dos constituintes de nossos corpos ficariam à mercê dos constantes impactos sofridos pelos átomos que nos cercam. Nós e quase todos os objetos com os quais interagimos estaríamos sujeitos a um movimento aleatório e irregular, denominado movimento browniano.

Para que o comportamento macroscópico dos sistemas físicos seja regular e ditado pela mecânica é necessário que estejamos no domínio em que seja válida uma lei que a estatística chama de lei dos grandes números. Para nos convencer disso, o autor nos mostra alguns exemplos bastante didáticos relacionados ao comportamento paramagnético de alguns materiais ou a difusão de uma solução com concentração variável. Isso se deve



(a)



(b)

Figura 1: (a) Papel de parede com padrão repetido com periodicidade regular^a que pode ser comparado a um cristal periódico. (b) Tapeçaria de Rafael^b que foi comparado, por Erwin Schrödinger, a um cristal aperiódico.

^a Retirado de <https://pixabay.com>, “Imagem de Gordon Johnson por Pixabay”

^b Retirado de “<https://twitter.com/lucasferraz/status/1229369379764211713>”

ao fato de que a precisão de uma lei física é da ordem de \sqrt{n} , onde n é o número de partículas constituintes do sistema. Para deixar mais claro a importância desta lei podemos pensá-la em termos de probabilidade. Ao sortear um número inteiro aleatório de 1 a 10, temos a probabilidade de $1/10 = 0,1$ de obter o número 2, por exemplo. Isso significa que, se sortearmos um número 100 vezes, aproximadamente em 10 delas obteríamos o número desejado com um erro estimado da ordem de $\sqrt{n} = \sqrt{100} = 10$, o que corresponde a 10%. Porém, se realizarmos esse sorteio um milhão de vezes, o erro relativo se torna $\sqrt{1000000} = 1000$, que corresponde a um erro de 0,1%. Sendo assim, quanto maior n , maior a precisão da lei, ou seja, mais ela se comporta de forma regular e previsível. Para mais detalhes, o leitor pode consultar um bom livro de Física Estatística, como os citados nas referências [3] e [4].

Os Capítulos 2 e 3 levarão o leitor de volta às suas aulas de biologia do ensino médio. Levando-se em consideração o argumento apresentado no capítulo 1, o autor inicia o capítulo 2, afirmando que todo organismo ou processo biológico deve apresentar uma estrutura composta por muitos átomos, isto é, multiatômica, para que eventos aleatórios e monoatômicos não sejam relevantes. O capítulo 2 apresenta os conhecimentos contemporâneos sobre o código hereditário, onde o autor fala, brevemente, sobre reprodução, estrutura celular, meiose, mitose, etc. A estrutura e o desenvolvimento ontogenético dos seres vivos são guiados por um cromossomo – estrutura que se encontra dentro do núcleo da célula fertilizada (ovo). A caracterização do cromossomo feita por Schrödinger foi, de fato, fundamental para o desenvolvimento da genética [5, 6]. Para exemplificar, relembramos a descoberta revolucionária de J. Watson e F. Crick sobre o formato em dupla hélice da estrutura do DNA, em 1953 [7]. É sabido que pelo menos um dos cientistas admitiu a influência da obra de Schrödinger nesta descoberta.

O ponto crucial aqui é que o tamanho típico de um gene² e, portanto, o número de átomos que ele pode ter, não satisfaz a lei dos grandes números. Isso significa que o comportamento dos átomos no gene (e do próprio gene) não pode ser previsto por nenhuma lei regular da física ou da química, isto é, são movimentos completamente aleatórios. Quando acreditamos que nossos objetivos estão frustrados, o autor nos apresenta uma luz no fim do túnel. No capítulo 3, ele nos lembra que, conforme mostrado por De Vries em 1902, as mutações se dão por saltos. Talvez, sugere o autor, possamos relacionar esse fato com a mecânica quântica, onde sabemos que as mudanças nos níveis de energia também se dão por saltos. Outros fatores que nos permitem pensar que as duas coisas podem estar relacionadas é o fato de que as mutações são eventos raros e fortemente influenciados pela incidência de radiação.

² Gene é um segmento de molécula que armazena as características hereditárias e o cromossomo contém vários genes diferentes [8].

A questão central agora, apresentada no capítulo 4, é: como o gene, que possui poucos átomos, pode seguir numa ordem estável por gerações mesmo estando à temperatura da ordem de 37°C ? Por que as flutuações térmicas não destroem essa regularidade? A física do final do século XIX não seria capaz de responder essas questões, mas poderia ter um palpite: o gene se comporta como uma molécula. Já se sabia que uma molécula é estável mesmo possuindo poucos átomos (embora não se soubesse como). Esse entendimento só foi possível com o amadurecimento da teoria quântica na segunda década do século XX (na qual o autor teve contribuição fundamental³).

No capítulo 5, o autor nos apresenta, de uma maneira extremamente didática, as bases da estatística de Boltzmann [3] para introduzir o conceito de isomeria. Duas moléculas são ditas isoméricas quando possuem os mesmos átomos mas, por estarem arranjos de formas diferentes, apresentam propriedades químicas totalmente diferentes. Dessa forma, o número de átomos não precisa ser muito grande para formar uma quantidade significativa de arranjos possíveis. Além disso, uma transição espontânea não leva uma molécula isomérica em outra. Para que essa transição ocorra, é necessário mais energia que a diferença de energia entre seus respectivos estados fundamentais.

Pronto! Schrödinger nos preparou gradativamente para nos apresentar o modelo de Delbrück, no capítulo 5. A ideia é entender a mutação como uma mudança isomérica que afeta parte do gene. Nesse caso, o limiar de energia que separa as duas configurações é alto o suficiente para que as mutações sejam raras. Isso também explica o motivo pelo qual a radiação aumenta a taxa de mutação. Outro fato importante é que as ligações entre os átomos de uma molécula se parecem mais com as ligações entre os átomos de um sólido que de um líquido ou um gás. A partir disso, podemos classificar o gene como um sólido aperiódico. Mesmo com poucos átomos, esse sólido aperiódico seria ideal para armazenar informações, uma vez que configurações diferentes “guardam” informações diferentes (nesta parte, o autor faz uma bela analogia com o código Morse).

No Capítulo 6, o leitor se depara com questões ainda sem respostas mas que o autor prevê, corretamente, que serão futuramente resolvidas pela bioquímica devido ao progresso da fisiologia e da genética. Além disso, aqui podemos ver de forma direta a resposta à questão que dá título ao livro. Segundo Schrödinger, vida é algo que “faz alguma coisa”. Ele esclarece um pouco mais: matéria viva é aquela que se esquivava do decaimento para

³ É creditado a Schrödinger a formulação ondulatória da mecânica quântica, em distinção à formulação matricial creditada a Werner Heisenberg. O estado de um sistema na mecânica quântica é dado pela função de onda $\Psi(\vec{x}, t)$, e essa função de onda pode ser obtida através de uma equação, conhecida como equação de Schrödinger, pois foi obtida por ele e é uma das equações mais famosas e usadas da mecânica quântica [9, 10].

o equilíbrio. A ilustração dessa ideia é apresentada em um experimento mental digno dos criados por Einstein.

A questão que se levanta a seguir é: como a matéria viva pode fugir do equilíbrio? A resposta apresentada é de uma simplicidade e beleza inacreditáveis: se alimentando de entropia negativa, não de energia⁴. Todo ser vivo produz entropia pelo simples fato de estar vivo. Se não fizer nada, atingirá o equilíbrio que corresponde ao estado de entropia máxima. Para evitar que isso ocorra, precisa se alimentar de entropia negativa através do que conhecemos como metabolismo, isto é, “*comendo, bebendo, respirando*”. Dito de forma mais cuidadosa, o autor explica que se alimentar de entropia negativa significa que o organismo seja capaz de se livrar da entropia que ele produz devido ao fato de estar vivo. O leitor que não domina o conceito físico de entropia pode ficar tranquilo, o autor nos presenteia com uma sempre clara, bela, precisa e didática explicação desse conceito.

O Capítulo 7, que encerra o livro, exige do leitor uma concentração extra e, talvez, uma releitura. Nele, Schrödinger defende a ideia de que talvez as leis que permitem a vida não possam ser reduzidas às leis físicas comuns. Não por incluir elementos sobrenaturais, mas por serem muito diferentes do que os físicos estão acostumados a lidar em seus modelos, teorias e experimentos. Schrödinger escreve:

“É um fato observacional simples que o princípio-guia em toda célula é corporificado em uma única associação atômica que existe em apenas uma (...) cópia e é também um fato observacional que o princípio resulta na produção de eventos que são um paradigma de ordem. Quer achemos espantoso ou plausível que um pequeno, mas altamente organizado grupo de átomos seja capaz de agir dessa forma, a situação não tem precedentes, sendo desconhecida em qualquer outro lugar além da matéria viva. O físico e o químico, investigando a matéria inanimada, nunca testemunharam fenômenos que precisassem ser interpretados dessa forma.”

A argumentação é que a natureza estudada pelos físicos segue a lei da física estatística: ordem a partir da desordem. Já os organismos vivos seguem a lei da ordem a partir da ordem. Com premissas diferentes, é natural esperarmos que as leis resultantes desses dois processos sejam totalmente diferentes.

No epílogo, somos agraciados com uma reflexão mais pessoal e subjetiva do autor sobre o livre-arbítrio. Aqui somos conduzidos a uma comparação entre as religiões orientais e ocidentais e também a questões filosóficas que nos remetem a Kant, como o próprio autor nos lembra.

⁴ Aqui o leitor verá uma discussão/esclarecimento do autor sobre o fato de que o termo mais preciso seria energia livre no lugar de entropia negativa.

O livro termina, como era de se esperar, com a sensação de incompletude. Algumas questões levantadas já foram resolvidas, outras podemos vislumbrar suas respostas no horizonte não muito distante e algumas talvez tenhamos que esperar ainda muito tempo para serem solucionadas completamente. Essa é a grande beleza da ciência: ser inerentemente incompleta, interminável, infinita. Assim também somos nós, humanos. Assim também é o tema abordado pelo livro: a vida! Em ciência é comum as questões serem mais interessantes que as respostas e os caminhos que nos levam a elas serem, muitas vezes, de uma beleza fascinante. Esse livro mostra exatamente isso: perguntas embriagantes e uma deliciosa viagem na busca por respostas. O que mais se pode esperar de uma obra científica?

A leitura dessa obra se mantém atual pela sua originalidade, abrangência e profundidade das questões levantadas. O leitor, através dela, consegue apreciar como um dos mais renomados físicos da história levanta questões e investiga suas soluções. Nesse contexto, é oportuno a frase atribuída a Einstein: “O importante não é o que você pensa, mas como você pensa”. Ao ler essa obra, temos o privilégio de ver um pouco de como Schrödinger pensava. Certamente, isso já é motivo suficiente para lê-la.

Em 1993, pesquisadores renomados se reuniram também no Trinity College para homenagear Erwin Schrödinger, na comemoração dos 50 anos da sua obra *O que é vida? O aspecto físico da célula viva*. Na ocasião, cientistas renomados discutiram o desenvolvimento da biologia. A coletânea de suas palestras foram publicadas, também pela Cambridge University Press e a Editora Unesp (versão em português), em 1997, na obra intitulada: *O que é vida? 50 anos depois – Especulações sobre o Futuro da Biologia* [5]. Nesta coletânea, os palestrantes ressaltaram o espírito inovador de Schrödinger por ter tido a coragem de falar sobre um tema diferente da sua área de expertise. Certamente, isso contribuiu para estimular a pesquisa do ponto de vista interdisciplinar. Além disso, foi mencionado que a obra de Schrödinger colaborou de maneira expressiva para o desenvolvimento da biologia molecular na segunda metade do século XX. Os autores atribuíram tal conquista ao pensamento revolucionário de Schrödinger de que a vida, de modo geral, segue a lei da ordem a partir da ordem.

Por fim, no 70º aniversário do livro de Schrödinger, em 2013, houve uma nova homenagem, no mesmo lugar, com uma palestra proferida por J. Craig Venter que, junto com Francis Collins, foi o primeiro cientista a sequenciar o genoma humano. Na palestra, intitulada *O que é vida? Perspectivas do século XXI*, Venter fala, de maneira bastante clara e didática, como Schrödinger, sobre a era digital da biologia e sobre os desenvolvimentos decorrentes da identificação do DNA. Até onde sabemos, essa palestra não foi publicada como livro mas pode ser lida, em inglês, na referência [6]. Além dessas duas obras derivadas do livro de Schrödinger, podemos sugerir

aos leitores mais interessados, outras leituras também muito fascinantes relacionadas ao tema nas referências [8, 11, 12], além de um texto com reflexões muito atuais sobre termodinâmica e vida na referência [13], o que mostra como este livro continua tão influente.

Agradecimentos

A autora Angélica Sousa da Mata agradece o financiamento da FAPEMIG (Grant No. APQ-02482-18) e do CNPq (Grant No. 423185/2018-7).

Referências

- [1] E. Schrödinger, *What Is Life? The Physical Aspect of the Living Cell* (Cambridge University Press, Cambridge, 1944).
- [2] E. Schrödinger, *O que é vida?: O aspecto física da célula viva – seguido de Mente e matéria e Fragmentos autobiográficos* (Cambridge University Press, Cambridge, 1997).
- [3] S.R.A. Salinas, *Introdução a Física Estatística* (Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997).
- [4] R.K. Pathria, *Statistical Mechanics*, (Elsevier Science, Amsterdam, 1996).
- [5] M.P. Murphy e O'Neill, *O que é vida? 50 anos depois – Especulações sobre o futuro da biologia* (Cambridge University Press, Cambridge, 1997).
- [6] https://www.edge.org/conversation/j_craig_venter-what-is-life-a-21st-century-perspective.
- [7] J. Watson e F. Crick, *Nature* **171**, 737 (1953).
- [8] H.M. Nussenzveig, *De onde viemos? O que somos? Para onde vamos?* (Blucher, São Paulo, 2019).
- [9] R. Liboff, *Introductory Quantum Mechanics* (Addison-Wesley Professional, Londres, 2002).
- [10] R. Eiberg, *Física quântica* (GEN LTC, São Paulo, 1979).
- [11] R. Dawkins, *O gene egoísta* (Companhia das letras, São Paulo, 2007).
- [12] I. Prigogine, *O fim das certezas* (Unesp, São Paulo, 2012).
- [13] E.A. Mukamel e A.M. Glaser, *Science* **371**, 38 (2021).