



Quem nunca se perguntou a razão de existirmos? Afinal, se a tendência é sempre aumentar a entropia ou a desordem no universo, como justificar o aparecimento de sistemas ordenados e altamente complexos, que levaram à criação de formas de vida tão diversas? Para muitos, isso só pode ser explicado pela existência de uma força divina, acima da natureza e que tudo teria criado. Não cabe à ciência discutir essa questão, mas tentar entender a natureza, os mecanismos e os processos envolvidos na evolução do universo, que, partindo de um amontoado de partículas elementares há cerca de 14 bilhões de anos, levaram à formação de estrelas, planetas e, finalmente, ao surgimento de formas de vida altamente organizadas e complexas que conhecemos hoje.

Nos últimos 50 anos, um grande progresso foi realizado no estudo dos seres vivos, graças a técnicas que permitiram examinar os sistemas biológicos na escala atômica e molecular, possibilitando entender os processos químicos e físicos que governam as trocas dos sistemas biológicos com o mundo exterior. Desse cenário, surgiu uma nova ciência, a biofísica, que atua na fronteira entre a biologia e a física.

É disso que vamos falar neste folder, fazendo uma reflexão sobre esse fascinante tema que é a vida e os processos que a caracterizam.

João dos Anjos
COORDENADOR DO PROJETO DESAFIOS DA FÍSICA

PRESIDENTE DA REPÚBLICA
Luiz Inácio Lula da Silva

MINISTRO DE ESTADO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Sergio Machado Rezende

SUBSECRETÁRIO DE COORDENAÇÃO DAS UNIDADES DE PESQUISA
Avílio Antônio Franco

DIRETOR DO CBPF
Ricardo Magnus Osório Galvão

REDAÇÃO E EDIÇÃO CIENTÍFICA
Henrique Lins de Barros (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas / MCT)
Daniel Acosta Avalos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas / MCT)

APOIO FINANCEIRO
Vitae

EDIÇÃO DE TEXTO
Cássio Leite Vieira

PROJETO GRÁFICO
Ampersand Comunicação Gráfica
(www.amperdesign.com.br)

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150
22290-180 - Rio de Janeiro - RJ
Tel: (0xx21) 2141-7100
Fax: (0xx21) 2141-7400
Internet: <http://www.cbpf.br>

Para receber gratuitamente pelo correio um exemplar deste folder, envie pedido com seu nome e endereço para ncs_cbpf@cbpf.br. Este e outros folders da série *Desafios da Física*, bem como a revista *CBPF – Na Vanguarda da Pesquisa*, estão disponíveis em formato PDF em <http://www.cbpf.br/Publicacoes.html>

Vitae não compartilha necessariamente dos conceitos e opiniões expressos neste trabalho, que são da exclusiva responsabilidade dos autores.



Ministério da
Ciência e Tecnologia



Biofísica

Duas visões da vida



Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

2006

Sumário

A BIOLOGIA E A FÍSICA
Élan vital
Domínio da física
Dois enfoques

ENTROPIA E VIDA
Trocas com o meio
Ainda sem definição
Conceito revolucionário
Desordem máxima
Preto no branco
Flecha do tempo

EVOLUÇÃO POR SELEÇÃO NATURAL
Semelhante, mas não igual

ESCALAS DA BIOFÍSICA
Do molecular ao cosmológico
Micro, meso e macro
Instrumentos e equipamentos

COMPLEXIDADE
Quatro átomos de ferro
Ferramentas para macromoléculas
Canais de passagem

O DNA E O CÓDIGO GENÉTICO
Molécula da vida
Quatro bases
Pontes de hidrogênio
Hélices idênticas
Sutilezas desconhecidas

DETECTORES BIOLÓGICOS
Migrar é preciso
Perguntas sem resposta
Otimizados pela natureza

NEURÔNIOS
Espalhados pelo corpo
Substâncias liberadas
Computador biológico

APLICAÇÕES
Técnicas, drogas e terapias

VIDA EXTRATERRESTRE
Além da imaginação
Vida fora da Terra?

Sugestões para leitura

BRYSON, B. *Uma breve história de quase tudo* (Companhia das Letras, São Paulo, 2005)
EL-HANI, C. N. e VIDEIRA, A. A. P. (org.) *O que é vida? – Para entender a biologia do século XXI* (Relume Dumará, Rio de Janeiro, 2000)
HUNTER, G. K. *Vital forces – The discovery of the molecular basis of life* (Academic Press, Nova York, 2000)

PALHETA, F. C. e BRITO, L. P. *Biofísica do corpo humano*. Disponível em www.ufpa.br/ccen/fisica/biofisica/index.html
SCHRÖDINGER, E. *O que é vida?* (Editora Unesp, São Paulo, 1997)
SILVA, S. C. da e GONZÁLEZ, F. H. D. Aulas virtuais de bioquímica e biologia molecular (UFRGS). Disponível em www6.ufrgs.br/bioquimica/
VOLKENSHEIN, M. V. *Biofísica* (Mir, Moscou, 1985)

Biofísica
Duas visões da vida

A BIOLOGIA E A FÍSICA

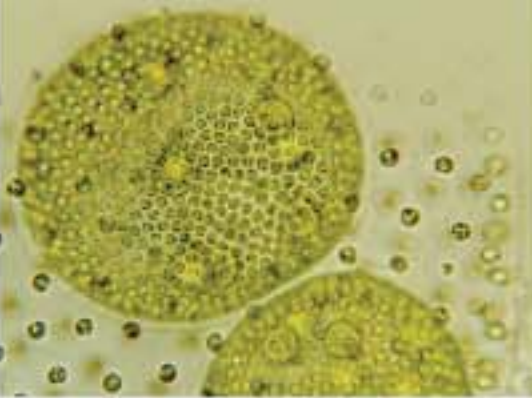
ÉLAN VITAL • Uma das mais importantes descobertas da ciência moderna tem um aparente sabor de negação que, no entanto, introduziu um novo desafio diante da perplexidade que a natureza oferece: não há substância vital ou elemento primário que sejam particulares à vida. A procura desse élan vital, que mobilizou muitos alquimistas, mostrou-se infrutífera. A vida é uma manifestação de uma forma sutil de organização de elementos encontrados no mundo inorgânico.

DOMÍNIO DA FÍSICA • A vida é, portanto, organização que possibilita processos de transformação (metabólicos) e de reprodução. E, nesse sentido, ela é um assunto a ser tratado na escala microscópica. Esse é, porém, o domínio da física, pois os fenômenos que acontecem nesse âmbito são dominados por interações que fogem à nossa experiência cotidiana. Aí entra em cena a mecânica quântica, teoria que descreve a natureza nas dimensões moleculares, atômicas e subatômicas. No entanto, o fenômeno conhecido como vida continua sem explicação.

DOIS ENFOQUES • Ao analisar um organismo, o biólogo estará interessado em descrever sua estrutura, fisiologia e suas partes, bem como qual a função de cada uma delas. Já o físico tentará entender como é a interação das forças em cada uma dessas partes, para que o organismo consiga realizar suas funções. E, num nível mais profundo, quais forças motivam o funcionamento fisiológico e anatômico do organismo.

EVOLUÇÃO POR SELEÇÃO NATURAL

SEMELHANTE, MAS NÃO IGUAL • Os seres vivos têm a capacidade de se reproduzir. **Bactérias**, por exemplo, após certo tempo, dividem-se, originando duas novas bactérias semelhantes, mas não completamente idênticas à 'mãe'. Em organismos mais complexos, como animais ou plantas, a reprodução é um processo mais elaborado. O importante é compreender que o novo indivíduo é semelhante ao que lhe deu origem, mas nunca exatamente igual. Essa pequena diferença é que permite a adaptação ao novo meio, alterado pela presença de organismos que viveram anteriormente nele. É esse mecanismo que permite uma evolução por seleção natural, pois, a cada geração, novos organismos surgem, e aqueles que têm maior capacidade de adaptação poderão se proliferar.



ENTROPIA E VIDA

TROCAS COM O MEIO • A vida é um fenômeno que ocorre em sistemas abertos. Portanto, todos os seres vivos mantêm uma intensa atividade de troca de energia, matéria e informação com o meio externo, o que torna difícil definir uma fronteira clara. Uma das mais interessantes características dos seres vivos é sua complexidade. Desde as bactérias, com apenas alguns micrômetros de diâmetro (cerca de um milésimo de milímetro), até seres complexos, como o *Homo sapiens*, todos os seres vivos são compostos por moléculas de alto grau de complexidade. Forma e função caminham juntas, e parece que essa estreita relação é uma exigência que garante a manutenção da vida.

AINDA SEM DEFINIÇÃO • Os seres vivos se caracterizam pela capacidade de manter suas funções, apesar de estarem em constante troca com o meio em volta deles. Átomos são trocados permanen-

temente, de forma que um indivíduo não é uma coleção constante deles, nem de moléculas. Há um fluxo permanente de energia e informação. Com isso, o organismo consegue manter sua organização e, em troca, desorganiza o meio em que vive.

CONCEITO REVOLUCIONÁRIO • A termodinâmica estuda as características macroscópicas (volume, pressão, temperatura etc.) de um sistema, sem se importar com o comportamento das partes que do compõe. Quando estas são levadas em consideração, essa área da física tem que ser estudada através da mecânica estatística. E é aqui que surge um dos conceitos mais revolucionários da física: o da entropia.

DESORDEM MÁXIMA • Todo sistema físico sempre evolui, espontaneamente, para situações de máxima entropia. Essa é conhecida como a segunda lei da termodinâmica. Porém, ela só é válida para sistema fechados, ou seja, que não trocam energia, matéria e informação com o meio.

PRETO NO BRANCO • Todo sistema natural, quando

ESCALAS DA BIOFÍSICA

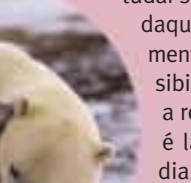
DO MOLECULAR AO COSMOLÓGICO • Os sistemas que a biologia estuda têm diferentes níveis (ou escalas):

i) na escala molecular (da ordem de 10^{-10} m, ou seja, algo menor que um milionésimo de milímetro), a biofísica estuda como as moléculas se organizam e como a composição delas permite o funcionamento de estruturas ou dos seres vivos;

ii) nas escalas de 10^{-8} m a 10^{-6} m (objetos menores que um milésimo do milímetro), a biofísica estuda o comportamento de aglomerados organizados, formados por diferentes moléculas, apresentando o que se pode chamar de vida, como no caso dos vírus ou das bactérias e dos protozoários;

iii) aumentando a escala, na ordem de 10^{-4} m a 10^{-2} m (de décimos de milímetro a centímetros), são estudadas as estruturas formadas por células com igual funcionamento (órgãos) ou aglomerados de microrganismos, num nível de organização ainda não compreendido;

iv) na escala acima de 10^1 m (10 cm), diferentes formas de vida são estudadas, suas interações



com o meio e as interações com outras formas de vida. Mesmo nas escalas cosmológicas (maiores que 10^6 m ou mil km), a biofísica tenta entender como seria a vida se ela existisse fora da Terra, bem como a influência de fatores planetários no desenvolvimento e na adaptação da vida terrestre.

MICRO, MESO E MACRO • Para cada escala, há modelos que permitem analisar a interação entre as estruturas e os sistemas. Diferentes modelos podem ser usados para entender o que acontece nas diferentes escalas: nas escalas microscópicas, sabemos que estamos na região da mecânica quântica; nas escalas intermediárias, é preciso empregar uma teoria que contenha tanto elementos da mecânica quântica quanto da física dos fenômenos macroscópicos (a mecânica clássica ou newtoniana); nas escalas macroscópicas, estamos nos domínios da mecânica clássica.

INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS • Os diferentes equipamentos desenvolvidos para estudar sistemas físicos têm sido aplicados ao estudo daqueles na biologia. Exemplos desses equipamentos: os microscópios eletrônicos, que nos possibilitam ver a matéria em escalas diminutas; a ressonância magnética nuclear, que também é largamente empregada como aparelho de diagnóstico na medicina; os magnetômetros *Squid*, detectores extremamente sensíveis; os difratômetros de raios X, uma das mais poderosas ferramentas para a análise de materiais.

deixado livre, evolui para um estado de máxima desordem, correspondente a uma entropia máxima. Desordem, porém, é entendida aqui como a falta de localização espacial. Por exemplo, abra uma lata de tinta branca e pingue sobre ela uma gota de tinta preta. Inicialmente, é possível localizar espacialmente a gota, ou seja, apontar com precisão onde ela está, pois o sistema ainda está organizado (ou com baixo grau de desordem). Passado muito tempo, a gota terá se espalhado de tal modo que fica impossível localizá-la ou mesmo reconhecer que ela esteve ali. Aumentou a desordem (ou a entropia) do sistema.

FLECHA DO TEMPO • O conceito de entropia contribui para a compreensão de um dos maiores mistérios do universo: o tempo nunca volta ao passado. E isso está relacionado como o fato de a entropia sempre crescer em um sistema fechado. Assim, em um processo qualquer, se a entropia de uma das partes do sistema diminuir, necessariamente haverá aumento dela em outras partes. Esse fato (ou seja, o sistema sempre evoluir rumo a um grau maior de desordem) nos define o sentido da flecha do tempo.

COMPLEXIDADE

QUATRO ÁTOMOS DE FERRO • As moléculas que participam da vida são complexas. **A hemoglobina**, por exemplo, é uma proteína presente nas células vermelhas do sangue de animais e tem mais de 8 mil átomos. Nela, encontram-se só quatro átomos de ferro, localizados em posições estratégicas e que são capazes de capturar oxigênio nos pulmões e liberá-lo para o tecido, mantendo as células vivas. Os mecanismos de captura e liberação são extremamente complexos, e verifica-se que há uma cooperação entre os átomos de ferro da hemoglobina. Essa propriedade está associada à geometria da molécula que, em última análise, é definida pelos tipos de ligações atômicas.



O DNA E O CÓDIGO GENÉTICO

MOLÉCULA DA VIDA • Todos os seres vivos têm uma molécula, o ácido desoxirribonucléico (DNA), muito extensa (pode atingir, se esticada, mais de um metro de comprimento), composta por duas fitas que se juntam formando uma dupla hélice. Podemos imaginá-la também com o formato de uma escada retorcida. Essa estrutura complexa é fundamental para a perpetuação da vida.

QUATRO BASES • Cada uma das duas fitas do DNA é constituída por quatro bases: adenina (A), timina (T), guanina (G) e citosina (C). Essas bases nitrogenadas (assim chamadas por conterem nitrogênio em sua composição) se ligam a uma molécula de açúcar (desoxirribose) e a um grupo de átomos que contém o elemento químico fósforo, formando o chamado nucleotídeo. Caso imaginemos a molécula de DNA como uma escada, as laterais dela seriam formadas pela desoxirribose e pelo grupo fosfato. Já os degraus seriam feitos pela ligação entre duas bases nitrogenadas.

PONTES DE HIDROGÊNIO • A ligação entre os nucleotídeos de uma fita é extremamente forte, enquanto a ligação entre as bases de duas fitas é fraca, feita através das chamadas pontes de hidrogênio, a mesma ligação química responsável por

manter unidas as moléculas de água no estado líquido e sólido. Só é possível a ligação entre determinadas bases: A liga-se à base T, enquanto a G só pode se ligar à C. Ligações entre as bases A e T, por exemplo, não ocorrem.

HÉLICES IDÊNTICAS • Durante o ciclo de vida de uma célula, o DNA passa por uma divisão. As ligações entre as fitas são desfeitas (como se os degraus da escada fossem cerrados ao meio) através da participação de outras moléculas (enzimas extremamente especializadas) que ajudam na divisão e se recombinam de forma a produzir duas hélices duplas idênticas à original. Esse processo é de uma complexidade extrema, e pouco se conhece sobre os diversos mecanismos envolvidos.

SUTILEZAS DESCONHECIDAS • O DNA tem um código que fornece à célula a informação necessária para a fabricação de proteínas e de outras moléculas essenciais para o metabolismo. Essa informação deve ser preservada no novo organismo para garantir sua sobrevivência. O processo é elaborado e exige a participação de várias outras moléculas – ácido ribonucléico (RNA), ácido ribonucléico mensageiro (RNAm), enzimas, proteínas etc. – que 'aceleram' (catalisam) as reações e facilitam a reprodução. Mas o processo em si, com todas suas sutilezas, permanece desconhecido.

FERRAMENTAS PARA MACROMOLÉCULAS • O estudo da estrutura de uma macromolécula, como a das proteínas, baseia-se nas leis da mecânica quântica, do eletromagnetismo e da mecânica clássica. As ferramentas usadas para estudar esse tipo de biomolécula (como a difração de raios X, a ressonância magnética nuclear e a ressonância paramagnética eletrônica) foram desenvolvidas pela física.

CANAIS DE PASSAGEM • As células que constituem um organismo são limitadas por uma membrana na qual se encontram proteínas que formam canais que permitem a passagem de determinados elementos e bloqueiam a entrada de outros. As membranas são compostas por uma camada dupla de moléculas bipolares, nas quais uma das extremidades se afasta da água, ou seja, é hidrofóbica. O estudo das ligações moleculares que permitem manter estável a membrana é um dos temas importantes da biofísica.

DETECTORES BIOLÓGICOS

MIGRAR É PRECISO • Todos os seres vivos estão em permanente contato com o meio externo (ou seja, com todo o espaço além da membrana) e são capazes de perceber pequenas mudanças desse ambiente, uma vez que eles mesmos são parte dele. Muitos animais mudam periodicamente seus locais de moradia, num processo conhecido como migração. Assim, por exemplo, as andorinhas, os salmões, os macacos, as formigas, as borboletas, os albatrozes migram, às vezes, milhares de quilômetros. A migração é fundamental para a preservação da espécie.

PERGUNTAS SEM RESPOSTA • Como, porém, os indivíduos sabem a hora de iniciar a jornada ou a rota? O Sol, a Lua, as estrelas, o campo magnético terrestre desempenham papel importante. A polarização da luz (ou seja, o plano em que ela vibra) também é um fator usado para a orientação. Enfim, os fatores físicos do meio são elementos essenciais

NEURÔNIOS

ESPALHADOS PELO CORPO •

Um dos desafios mais intrigantes na biofísica é a questão da memória. Sabemos que temos vários bilhões de neurônios, além de outras células localizadas no cérebro (as células gliais, por exemplo). Os neurônios, por sua vez, estão espalhados pelo corpo (com maior concentração no cérebro) e são responsáveis, em parte, pela transmissão de estímulos sensoriais.



SUBSTÂNCIAS LIBERADAS • Um neurônio é constituído por um corpo celular, dendritos ('ramificações' que partem desse corpo) e uma 'cauda' (ex-

APLICAÇÕES

TÉCNICAS, DROGAS E TERAPIAS • A biofísica tem levado ao desenvolvimento de técnicas de diagnóstico como a tomografia ou a ressonância magnética nuclear, bem como à produção de drogas ou à descoberta de substâncias que podem ser assimiladas pelo organismo, auxiliando na cura de doenças. **Novas terapias, como a hipertermia magnética (aumento da temperatura corporal com a ajuda da aplicação no paciente de campo e compostos magnéticos) ou a deposição de drogas com o auxílio de nanopartículas magnéticas, têm se mostrado eficientes.**

para a preservação de espécies. Como esses organismos conseguem detectar e elaborar a informação desses fatores? Como funciona o relógio biológico? São perguntas ainda sem resposta.

OTIMIZADOS PELA NATUREZA • A física tem desenvolvido sistemas de detecção que nos permitem compreender o funcionamento daqueles que a própria natureza já se encarregou de fabricar em diversos seres vivos. Assim, animais têm detectores de luz mais sofisticados que os construídos pelo homem, bem como detectores de substâncias químicas mais sensíveis que os mais modernos equipamentos de análise de materiais. Os peixes da família dos elasmobrânquios, como o tubarão e a raia, são capazes de detectar campos magnéticos. Tubarões brancos podem sentir um campo elétrico até 20 mil vezes menor que 1 volt, equivalente ao da batida do coração de um peixe. E, assim, há outros exemplos de detectores que têm analogia com aparelhos já desenvolvidos pela ciência, porém com dimensões e sensibilidade otimizadas pela natureza.

tensão), o axônio. Quando estimulado, ele produz uma diferença de potencial que gera uma tênue corrente elétrica. Esse estímulo elétrico se propaga e permite que ele libere substâncias específicas (neurotransmissores) que fazem o contato dele com neurônios vizinhos, formando sinapses. Esse conjunto de células interligadas forma uma rede que mantém semelhança com redes de sistemas físicos.

COMPUTADOR BIOLÓGICO • Não se sabe como, mas a rede de neurônios tem a capacidade de gerar informação. Temos lembranças graças a esse complexo sistema de células. O estudo do cérebro e de suas redes (redes neurais) tem contribuído para o desenvolvimento de sistemas de informação que podem levar a um computador biológico.

VIDA EXTRATERRESTRE

ALÉM DA IMAGINAÇÃO • A enorme extensão de nossa galáxia, a Via Láctea, com mais de 100 mil anos-luz de diâmetro e aproximadamente 10^{11} estrelas, pode abrigar outros sistemas planetários em que a estrela é semelhante ao Sol e onde há possibilidade de existir vida em diferentes formas.

VIDA FORA DA TERRA? • Como dizer que não exista vida fora da Terra? Mesmo que ela tenha se desenvolvido em sistemas semelhantes ao nosso, talvez o *Homo sapiens* esteja condenado a desconhecê-la. As dimensões que nos separam de qualquer outro desses possíveis sistemas planetários são tão grandes que a informação levaria mais tempo para chegar a nós do que aquele destinado à nossa permanência na Terra. Eis aí, portanto, outro dos grandes desafios da física na biologia: a procura de vida extraterrestre.