

ABSTRACT The standard cosmological model suggests that after the “Big Bang”, 14 billion of years ago, the universe entered a period of expansion and cooling. In the first one millionth of a second appear quarks, gluons, electrons and neutrinos, followed by the appearance of protons and neutrons. In this paper, we describe the “cosmic battle” between gravitation and energy, responsible for the lighter chemical elements and the formation of the stars. We describe the thermodynamics of irreversible processes of systems which are far away from equilibrium, a route that is followed by the universe, seen as a living system.

O UNIVERSO VIVO*

FRANCISCO CÉSAR DE SÁ BARRETO¹

Professor Visitante/Universidade de São João Del Rey (UFSJ) e Professor Emérito/Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

LUIZ PAULO RIBEIRO VAZ

Professor Associado do Departamento de Física/Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

GABRIEL ARMANDO PELLEGGATTI FRANCO

Professor Associado do Departamento de Física/Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

* Os autores agradecem ao Professor Márcio Q. Moreno pela revisão crítica do texto.

¹ • Bolsista do Programa Professor Visitante Nacional Sênior da CAPES.

Apresentação

O modelo de universo mais aceito pela comunidade científica, conhecido como *modelo cosmológico padrão*, prevê que o universo teve início há cerca de pouco mais de 14 bilhões de anos². Esse instante inicial é denominado de *Big Bang*. Após o *Big Bang*, o universo expandiu e se resfriou. No primeiro milionésimo de segundo, ou logo após este intervalo, existiam *quarks*, glúons, elétrons e neutrinos. Prótons e nêutrons surgiram após 0,0001 de segundo. A formação de átomos leves ocorreu três minutos depois, ao passo que os átomos neutros formaram-se após 400 mil anos.

Na próxima seção, descreveremos a “batalha cósmica”, tendo a gravitação e a liberação de energia como seus protagonistas e, como resultado, a formação dos elementos químicos mais leves. Em seguida, apresentaremos a formação das estrelas e o aparecimento da vida. As estrelas se formaram após 3×10^8 anos, com o surgimento dos primeiros elementos químicos (H e He). Logo após esses eventos, explosões estelares (supernovas) dispersaram os elementos químicos mais pesados no espaço sideral. Cerca de 10^9 anos após o *Big Bang*, surge a Terra. No início, ela é quente e

² • Esse valor é corroborado pelos dois trabalhos que motivaram a nomeação dos ganhadores do premio Nobel de Física em 2011: Saul Perlmutter recebeu metade do prêmio, enquanto a outra metade foi dividida por Adam G. Riess e Brian P. Schmidt. Estes últimos lideraram os dois grupos que, utilizando supernovas distantes, encontraram, independentemente, evidências de que o universo está se expandindo aceleradamente.

BIG BANG
LUZ E PARTÍCULAS400 MIL ANOS
FORMAÇÃO DOS ASTROS E EVOLUÇÃO QUÍMICA

seca. É difícil dizer com segurança quando a água aparece no universo, mas temos certeza de que ela não estava presente no universo na sua fase muito jovem, isto é, com menos de 10^8 anos. A água presente hoje na Terra foi trazida por cometas e asteróides que caíram sobre nosso planeta. Esses aspectos serão tratados na seção 3.

Em outros termos, o universo nasce, expande-se, gera vida em algumas regiões, desaparece em outras e continuamente sofre mudanças, tornando-se mais complexo seja ao gerar vida mais elaborada, seja ao gerar a desordem, isto é, a morte.

A descrição apresentada na seção 4 trata o universo como um sistema que trilha esses caminhos dinâmicos; o tratamento dado ao tema baseia-se na termodinâmica de processos irreversíveis de sistemas muito afastados do equilíbrio. Os conceitos e metodologias apresentados nessa seção foram aplicados por seus autores para descrever o comportamento dos sistemas ecológicos (JORGENSEN, S., 2001; JORGENSEN, S.; SVIREZHEV, 2004). No caso presente, o tratamento, apesar de ter uma base científica, não apresentará dados e teorias completas que o comprovem. Todavia, achamos que as conjecturas são plausíveis e que poderão servir para levantar críticas e comentários.

Energia: a batalha cósmica

Um dos aspectos mais importantes do universo parece ser a *energia*, que se apresenta de inúmeras formas. Aparentemente, a energia total de um sistema isolado, onde não se permitem interações com seu exterior, somada em todas as suas diferentes formas, mostra-se constante. Uma de suas formas é a própria



FIGURA 1: Síntese das teorias atuais de evolução. Com início no *Big Bang*, representa-se várias fases pelas quais passou nosso universo: a formação dos astros e a evolução química, a formação de nosso sistema solar e a evolução da vida na Terra. Uma descrição mais detalhada das ideias contidas nesse painel pode ser encontrada em <http://www.astro.iag.usp.br/~damireli/evolucao/evolucao-zoom.htm>.

matéria, cuja quantidade (*massa*) relaciona-se com a energia através da conhecida relação $\Delta E = \Delta m c^2$. Devido ao grande valor de c , podemos inferir que a matéria é uma forma extremamente condensada de energia. Esta forma possui, entre outras, a propriedade de sua existência influenciar sua vizinhança, de tal maneira que ela sempre atrai outra matéria, o que denominamos *gravitação*. Em um outro nível de energia muito menor, se comparado com a energia contida em uma certa quantidade de massa, há a energia na interação gravitacional da matéria, denominada *energia potencial gravitacional*; essa energia potencial *diminui* quando duas massas *se aproximam*. Como a quantidade total de energia não pode variar, essa energia “liberada” pela aproximação das massas aparece como outra forma de energia, relacionada com o movimento das partes envolvidas. O movimento é a forma mais objetiva de se perceber a evolução do universo, dando origem ao conceito de *tempo*.

Pelo que sabemos, quando o universo teve início, ele era constituído essencialmente de hidrogênio (H), pequena quantidade de hélio (He), traços de lítio (Li) e berílio (Be). Atualmente, estimamos que aproximadamente 74% da massa do universo visível é de H, 24% de He e 2% dos elementos de massa maior que a do He. Nuvens primordiais imensas de H e He eventualmente se atraíram, capturadas pela sua própria gravidade, liberando energia gravitacional. Parte dessa energia transformou-se em movimento. No universo, a energia tende a se dissipar, aumentando a desordem, ao passo que a gravidade não requer nada além da existência de matéria para atuar sempre em direção à ordem, ou seja, aproximando os corpos materiais.

3 • Aqui, cabe um pequeno parêntese explicativo. Identificamos, no universo, até o presente, somente três tipos de interação entre as formas altamente condensadas de energia a que chamamos matéria. A primeira é a já mencionada atração **gravitacional** que, aparentemente, atua apenas como atração e possui um alcance infinito. A segunda forma de interação é a também já mencionada interação **eletromagnética** que, ao contrário da gravidade, pode atuar como atração e como repulsão, também possuindo um alcance infinito. Se comparadas em intensidade, a interação eletromagnética é muito maior do que a gravitacional, com a diferença de que a segunda sempre atua na mesma direção (atração), enquanto que, na média, a interação eletromagnética é nula. Esses são os únicos tipos de força a que estamos normalmente sujeitos em nossa experiência diária. Quando o alcance de interação é muito pequeno, dentro dos limites do núcleo atômico, a interação que se manifesta como eletromagnética em alcances maiores passa a se manifestar como a força nuclear fraca (interação **eletrofraca**), mas, nesses limites, aparece um terceiro tipo de interação denominada força **nuclear forte**, muito mais intensa que as demais, porém, de alcance limitado aos domínios nucleares. Todas essas interações estão relacionadas com diferentes formas de energia e manifestam-se através de variações das suas correspondentes formas.

A energia “perdida” pela aproximação dos corpos transforma-se em movimento (energia cinética) e agitação (*energia térmica*), que aumenta a temperatura do meio e dissipa-se através de radiação (*radiação do corpo negro*). A radiação – transportada por fótons, partículas sem massa, mas com energia – afasta-se de onde é produzida e interage com a matéria, empurrando-a para fora e contrapondo-se à ação de organização da gravidade que, depois de o excesso de energia se dissipar, volta a atuar, aumentando a ordem.

Os elementos químicos são combinações de formas mais fundamentais de matéria que possuem uma outra propriedade, independente da massa, que é a sua *carga* (prótons, elétrons e nêutrons). A ação dessa propriedade (*interação eletromagnética*) dá aos átomos sua estrutura, regida pelas leis da *física atômica e quântica*. Como os átomos de H e de He, especificamente, possuem estrutura relativamente simples, com poucos canais por onde a energia possa fluir (transições atômicas), as grandes nuvens primordiais em colapso não tinham muita facilidade em se livrar do excesso de energia liberado no seu colapso gravitacional, que acontecia num passo relativamente lento, dando oportunidade de uma uniformização de seu conteúdo. Com isso, o processo de contração gravitacional produz grandes concentrações de matéria, que aumentam sua temperatura de forma inexorável. Os átomos, nas regiões mais quentes, perdem sua estrutura (*ionizam-se*) e enormes quantidades de energia excedente, que quer dissipar-se, fugindo dessa concentração, impedem parcialmente a gravidade de ordenar tudo de uma vez. Mas, sempre que o excedente escapa, a gravidade pacientemente segue na sua tendência de ordenamento, à medida que a temperatura no interior da nuvem aumenta. Eventualmente, porém, o movimento térmico das partículas do gás torna-se tão energético que sua colisão consegue vencer as propriedades eletromagnéticas da matéria (repulsão, no caso de prótons) e essas partículas podem se fundir, obedecendo às leis da física nuclear³. Por exemplo, quatro prótons podem se fundir para dar origem a um núcleo de hélio, com a liberação de dois antielétrons (elétrons positivos), além de fótons e neutrinos. Novos aspectos do universo manifestam-se no aparecimento de diferentes tipos de energia, entre eles aquela denominada neutrino, que quase não possui massa e tem a propriedade única de praticamente não interagir com a matéria, apesar de possuir energia. Porém, se houver a fusão dessas partículas mais elementares, a massa do produto resulta ser um pouco menor do que a das partículas originais. A massa “faltante” é representada por uma correspondente “liberação” de energia, pois são grandezas equivalentes. Se a energia “excedente” (térmica) já estava se contrapondo

à ação da gravidade, no seu processo de dissipação e na interação com a matéria, esta energia “extra” vai somar-se à energia excedente e, juntas, vão essencialmente estacionar o processo de contração gravitacional. Formou-se o que conhecemos como *estrela*.

As estrelas apresentam, durante suas vidas, fases que lembram as dos seres vivos: nascem, evoluem e morrem. Podemos até dizer que as estrelas possuem “personalidade própria”. Em uma visão mais geral, estrelas de massas semelhantes parecem semelhantes, mas uma análise mais detalhada e mais próxima revela características próprias de cada uma. Quando jovens, elas são “temperamentais” – apresentam variabilidades, depois assumem um caráter mais “maduro” – e, mesmo mais estáveis, morrem algumas vezes de forma bombástica. Há, no entanto, uma diferença: ao contrário dos seres vivos, as estrelas perdem massa ao longo desse processo.

Mas esta estabilização do processo que chamamos estrela dá-se às custas de transformar H em He aos poucos, pois como o processo de fusão nuclear somente ocorre no núcleo estelar, esta região fica pobre em H e rica em He. A gravidade, como não gasta nada para existir, espera pacientemente que se esgotem os recursos energéticos da estrela. Ao ocupar o núcleo estelar, o He, que não consegue se fundir nas mesmas condições que o H, passa a sofrer os efeitos da gravidade das camadas superiores da estrela e volta a ser comprimido, aumentando a temperatura. Imediatamente “acima” deste núcleo, em uma casca, o H continua fundindo-se em He, e como a temperatura do núcleo aumenta, a taxa de fusão também aumenta. Com isso, as camadas externas da estrela, estáveis porque a energia que sai contrabalança o ímpeto de organização da gravidade, começam temporariamente a “vencer” a gravidade e a estrela aumenta de tamanho e de brilho. Eventualmente, o núcleo de He, cada vez maior (pelo aumento da taxa de fusão de H em He) e mais

As estrelas
apresentam, durante
suas vidas, fases
que lembram as
dos seres vivos:
nascem, evoluem e
morrem. Podemos
até dizer que as
estrelas possuem
‘personalidade
própria’. Quando
jovens, elas são
‘temperamentais’ e,
mesmo mais estáveis,
morrem algumas
vezes de forma
bombástica

quente (pela compressão das camadas de cima), atinge temperaturas onde três núcleos de He formam um de carbono (C); o C pode fundir-se com um H formando um núcleo de nitrogênio (N); além disso, quatro átomos de He formam um núcleo de oxigênio (O). Todos esses processos “liberam” massa em forma de energia e a estrela, dessa forma, constitui-se numa fábrica cósmica de elementos.

Cada um desses elementos possui condições especiais para se fundir com outros ou entre si. A gravidade agora cede terreno à energia que quer sair, a estrela aumenta de raio e de brilho, e o processo continua até à formação do elemento ferro (Fe). Este é o elemento que possui a maior energia de ligação por núcleon (partícula que compõe o núcleo atômico). Até o Fe, os elementos de menos massa liberam energia ao se fundirem; nos elementos com massa maior que a do Fe, ocorre o contrário. Ao formar o Fe em seu núcleo, a estrela encontra seu destino final. Aquela enorme massa, mantida coesa pela gravidade, somente se sustenta com a produção de energia através de fusões nucleares. Quando a quantidade de Fe no núcleo estelar fica muito grande, a temperatura nessa região também cresce violentamente e, depois de uma série de processos, os fótons tornam-se tão energéticos que conseguem desintegrar o núcleo de Fe em partículas menores. Toda aquela concentração de matéria confinada pela gravidade, resistindo bravamente às custas da produção de energia numa fornalha atômica em suas regiões centrais, recebe o golpe final: ao ser desintegrado, o Fe atua como um extintor de incêndio e rompe o balanço entre a gravidade e o fluxo de energia. As camadas superiores são repentinamente trazidas para regiões mais internas, de maior temperatura, onde passam a fundir de forma descontrolada. Praticamente toda a estrela produz energia e, em instantes, libera mais energia do que uma galáxia pequena... A estrela explode como uma supernova, devolvendo grande parte de suas camadas ao espaço, enriquecendo-o com os elementos que produziu em sua vida. As outras nuvens, agora enriquecidas com elementos mais pesados, vão continuar sofrendo o ímpeto de organização da gravidade e vão formar estrelas que, durante gerações, foram enriquecendo o universo até a sua composição atual.

O sistema solar e a Terra, de acordo com os modelos mais aceitos, têm idade da ordem de 4,6 bilhões de anos, o que concorda bem com a ideia de que nosso sistema foi formado com material enriquecido de elementos químicos durante pelo menos uma geração de estrelas (possivelmente duas), tal a sua composição química média (70% de H, 28% de He e 2% do resto).

As estrelas produzem os elementos necessários à vida

Cada elemento possui suas propriedades químicas. Durante a batalha cósmica descrita anteriormente, os elementos mais abundantes, além do H e do He, são C, N e O, os quais, com pequeníssima contribuição dos demais elementos, são a base do que conhecemos como vida. O elemento mais abundante do universo continua sendo, de longe, o H. O segundo elemento mais abundante, o He, é um gás nobre e inativo quimicamente. A seguir, o terceiro mais abundante é o O, que é, dentre todos esses, o elemento mais ávido por elétrons (oxidante, daí o seu nome). O oxigênio, ao contrário do hélio, gosta de combinar com quase tudo. Em peso, cerca de dois terços de nossos corpos são constituídos de oxigênio. Os dois elementos, hidrogênio e oxigênio, adoram se combinar para formar um dos compostos mais comuns no cosmos – a água (H₂O). Em sua forma sólida, isto é, como gelo, compõe os anéis de Saturno, o corpo dos cometas e luas inteiras. Na forma gasosa (vapor), paira como um manto em volta de toda estrela não azulada, incluindo o sol. É invisível. Gelo e vapor são comuns, mas água líquida, não. Nesse ponto, o casamento entre hidrogênio e oxigênio se mostra peculiar. A água se apresenta na forma líquida enquanto, nas mesmas condições, moléculas mais pesadas, tais como o dióxido de carbono (CO₂), são gases. A razão para que isso ocorra advém do fato de as moléculas de água se formarem de uma maneira estranha, fazendo com que seus átomos apresentem uma pequena polaridade elétrica, o que atrai seus vizinhos; eis porque a água se comporta como se fosse uma molécula muito mais pesada.

Como o H é o mais abundante e possui um elétron disponível, as combinações desses elementos nas formas de OH e H₂O são as substâncias mais comuns no universo. O C possui uma química particular que lhe permite combinar consigo e com os demais elementos, especialmente com o H, de forma a produzir grafites e

Hidrogênio e oxigênio adoram se combinar para formar um dos compostos mais comuns no cosmos – a água. Como gelo, compõe os anéis de Saturno, o corpo dos cometas, e luas inteiras. Na forma gasosa, paira como um manto em volta de toda estrela não azulada, incluindo o sol. É invisível. Gelo e vapor são comuns, mas água líquida, não

cadeias de diferentes formas (alifáticas, acíclicas, aromáticas, homogêneas, heterogêneas, saturadas ou não), algumas das quais são a base da vida, como os aminoácidos que constituem as proteínas. Uma molécula é chamada aminoácido se contém um grupo amina (quimicamente: NH_2), um grupo ácido orgânico (chamado grupo carboxil, da forma COOH) e um grupo radical junto com um átomo de carbono, que liga esses três grupos com um átomo de H. No aminoácido mais simples, a glicina, o radical é constituído simplesmente de um átomo de H. No aminoácido mais complexo, alanina, o radical é formado de um átomo de C e três de H. Dos 20 aminoácidos que constituem as proteínas, oito foram identificados em meteoritos; foram também identificados 11 outros aminoácidos (de cerca de 50) que entram em outros processos biológicos e 55 que não participam da biologia da Terra. Mais de 150 tipos de moléculas orgânicas já foram encontrados fora da Terra. Das cinco bases que constituem nossa massa genética, três já foram identificadas em meteoritos (duas que entram tanto na molécula do RNA como na do DNA e uma que é exclusiva do RNA). (MOUTINHO, 2011, p. 60).

As moléculas dos aminoácidos são estruturas espaciais e, com a mesma proporção entre seus constituintes (estequiometria), existem sempre em duas variantes de simetria espelhada; em analogia com nosso corpo, em especial as nossas mãos direita e esquerda, tais moléculas são dotadas de simetria dextrogira ou levogira. Sempre que se produzem aminoácidos, em laboratórios ou na natureza, as duas variantes são produzidas, aparentemente, nas mesmas proporções, o que se verifica, dentro das incertezas inerentes ao processo, também nos meteoritos onde se encontraram traços dessas substâncias. De algum modo, não se sabe porquê, todas as formas de vida da Terra se utilizam de aminoácidos de simetria levogira. Isso é extremamente conveniente, pois o funcionamento das enzimas, que são cadeias de proteínas que, por sua vez, são constituídas de aminoácidos, torna-se muito mais eficaz na “construção” dos corpos dos organismos, que podem se alimentar uns dos outros.

Pode-se dizer, com grande exatidão, que todos somos “cinzas de estrelas”, pois se estas não produzissem os elementos de que somos formados, não estaríamos aqui. Durante a vida de uma estrela como o Sol, a maior mudança que ela provoca no universo é transformar uma certa quantidade de H e He em C, N e O, fornecendo os elementos básicos para a vida, a qual, de certa forma, é uma consequência da existência das estrelas e das propriedades do universo. Os primeiros vestígios de vida em nosso planeta são muito antigos e, dependendo da interpretação dada a certas formações de C nas rochas mais antigas da Terra, a vida no nosso planeta existe

há 3,8 bilhões de anos, ou seja, após a Terra ter-se solidificado e os primeiros oceanos terem aparecido em sua superfície. Por outro lado, as evidências diretas mais antigas (restos fossilizados e colônias de bactérias) têm somente 3,5 bilhões de anos de idade. Se isso representa a mais antiga evidência de vida na Terra, então passou-se todo um bilhão de anos desde a formação da Terra até o surgimento da vida. Poderíamos, então, argumentar que tem de haver coincidências muito especiais e favoráveis ao aparecimento de vida; a Terra, de acordo com esta interpretação, alcançou as condições corretas para a vida em um bilhão de anos, período que se passou desde sua formação, antes que algo começasse a se mover por vontade própria.

Cometas: bolas de neve suja

Uma condição indispensável ao tipo de vida que conhecemos é a presença de água em forma líquida, por causa de suas propriedades únicas (JORGENSEN, B.; JORGENSEN, U., 2005). Se calcularmos a quantidade de água que existe em forma líquida na Terra, veremos que nosso planeta possui muito pouca água. Considerando que $2/3$ da superfície da Terra são cobertos por oceanos com aproximadamente 3 km de profundidade, e levando em conta a densidade média da Terra, a da água e o raio da Terra, podemos estimar que nosso planeta possui cerca

JACK COOK, WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION,
HOWARD PERLMAN, USGS.

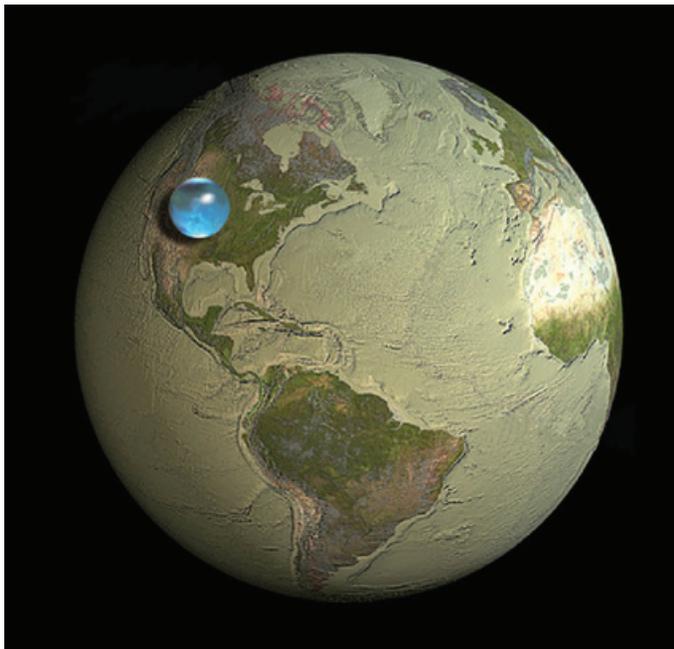


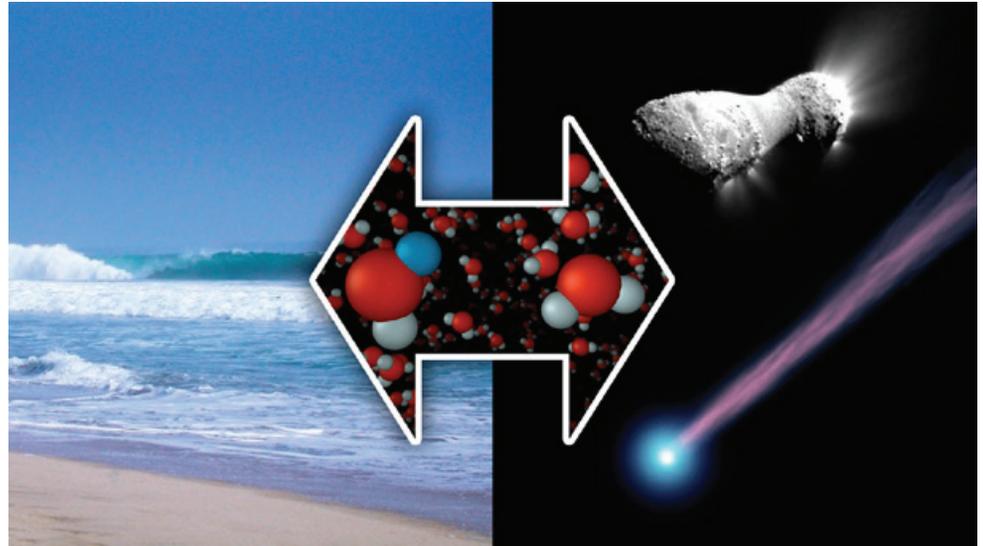
FIGURA 2: Apesar de a quantidade de água em nosso planeta parecer abundante, já que ocupa cerca de $2/3$ da superfície terrestre, na verdade ela representa apenas uma pequena fração da massa da Terra. Nessa ilustração, mostra-se o que aconteceria se toda a água na superfície da Terra fosse transformada em uma bola. O raio dessa bola teria apenas cerca de 700 quilômetros, menos da metade do raio da Lua, mas significativamente maior que Reia (uma das luas de Saturno), a qual, de maneira semelhante a muitas das luas em nosso Sistema Solar, é quase totalmente formada de gelo.

de 5.800 vezes mais pedra e ferro do que água, ao passo que, no universo, esta proporção deve ser o inverso em várias ordens de grandeza. Em um estudo recente (BRADFORD et. al., 2011), foi anunciada a descoberta de um grande reservatório de água, equivalente a 140 trilhões de vezes a água existente em nossos oceanos, em torno do buraco negro de um quasar conhecido como APM 08279+5255. Como este objeto está localizado a uma distância de cerca de 12 bilhões de anos-luz, isso indica que a água é uma substância que se formou no início do Universo, antes de este ter cerca de dois bilhões de anos, e que ela é muito comum. O motivo para isso é que a região onde a Terra foi formada está demasiado perto do Sol para que a água pudesse se condensar. Ao contrário, a região em que se encontram os planetas maiores é tão fria que essa condensação foi possível e muitas das luas de Júpiter e Saturno são constituídas essencialmente de água. O “pouquinho” de água que nosso planeta possui foi provavelmente trazido a ele de volta pela queda de cometas, durante as fases iniciais de formação do sistema. O Sol formou-se a partir de uma nuvem no espaço cósmico, com a queda de material dessa nuvem sobre ele. Vestígios disso estão claramente registrados nas inúmeras crateras que a queda desse material deixou na superfície de todos os corpos que orbitam o Sol, como Lua, Marte, Mercúrio e até mesmo a Terra (JORGENSEN, B.; JORGENSEN, U., op. cit.). Não percebemos esses vestígios tão claramente na Terra pelo fato de ela ter cosméticos muito poderosos, que se chamam *vida e erosão*. Dos astros mais próximos ao Sol, somente a Terra teve condições de segurar esse pouquinho de água até hoje, ao passo que Marte e a Lua deixaram escapar toda a água, que conseguiu evaporar novamente, e Vênus combinou essa água para fazer uma atmosfera ácida e hostil para nosso tipo de vida.

Os cometas são restos da nuvem primordial que formou nosso sistema planetário e são constituídos essencialmente de “neve suja”. Acreditamos que a nuvem que deu origem ao nosso sistema possuía muitos cometas e alguns ainda estão presentes nos seus limites exteriores. Quando um cometa, por um motivo ou outro, sai de sua posição nos confins do resto da nuvem que nos formou e começa a ser atraído pelas partes interiores do sistema, a tendência é ele ir diretamente para o Sol, continuando o processo iniciado há 4,5 bilhões de anos e hoje praticamente parado. Já registramos muitos desses cometas “suicidas” chocando-se com o Sol. Eventualmente, perto do caminho que o cometa segue para o Sol, está um dos planetas maiores e a queda é perturbada, fazendo o cometa “errar” o Sol e descrever uma órbita, em geral, muito elíptica em torno do Sol. Um dos exemplos é o famoso cometa Halley. A cada vez que um cometa passa perto do Sol, aproximadamente

um milésimo de sua massa evapora e forma a grande cauda que é característica dos cometas nesses momentos de aproximação. Portanto, um cometa não passa muito mais que 1000 vezes em torno do Sol. Todos os cometas que já descobrimos começaram a “cair” no Sol há relativamente muito pouco tempo, pois, de outro modo, estariam já evaporados. Portanto, os cometas são constituídos essencialmente do

FIGURA 3: Medidas realizadas com o observatório especial Herschel (ESA/NASA) mostram que o cometa Hartley 2, originário do distante “cinturão de Kuiper”, contém água com a mesma razão de moléculas normais com relação às “semipesadas” medida em nossos oceanos, sugerindo que a água hoje existente na Terra pode ter sido depositada pela queda de cometas sobre o nosso planeta. Em uma molécula de água semipesada, um átomo de hidrogênio (representado em branco) é substituído por um de deutério (representado em azul).



NASA/JPL – CALTECH/R. HURT.

mesmo material que nos formou... e já descobrimos dezenas de moléculas orgânicas ou fragmentos dessas através da espectroscopia de cometas. Possivelmente, além da água essencial, uma parte do material necessário à vida foi trazida para a Terra na queda de cometas. Vários esforços têm sido feitos para elucidar a questão. Em janeiro de 2006, a cápsula *Stardust* voltou à Terra depois de coletar para estudos partículas da cabeleira (*coma*) do cometa Wild 2. Em 2014, a nave Rosetta, lançada pela Europa no início de 2004, deverá encontrar-se com o cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko e depositar um pequeno laboratório em sua superfície para diversas pesquisas. Em um estudo recentemente publicado na *Nature* (HARTOGH et al., 2011), utilizando dados obtidos com o telescópio especial Herschel, encontrou-se, no cometa 103P/Hartley, água com uma razão deutério-hidrogênio semelhante à encontrada na Terra. Sabe-se que esse cometa é originário do cinturão de Kuiper (Plutão também é um corpo originado nesse cinturão), região do Sistema Solar localizada além dos planetas, estendendo-se da órbita de Netuno (30 Unidades Astronômicas, UA) até aproximadamente 50 UA do Sol. Os objetos no cinturão de Kuiper são compostos essencialmente de elementos voláteis congelados, tais como metano,

amônia e água. Esta descoberta sugere que grande parte da água de nossos oceanos pode ter vindo em objetos originários do cinturão de Kuiper.

É muito extenso o conhecimento que temos do universo, mas ainda insuficiente para explicarmos o nosso próprio corpo humano, ou seja, nossa existência neste planeta. Ao longo de sua história, a Terra passou por radicais transformações, sempre sob a influência de corpos celestes provenientes, por exemplo, de colisões com detritos da nuvem primordial, ínfimos em relação a Terra, mas portadores de significativa energia para os frágeis seres vivos.

A natureza termodinâmica do universo

Nas seções anteriores, apresentamos informações sobre o nascimento do universo, o papel da energia, em suas várias formas, na criação dos elementos químicos mais leves; a gravitação e a radiação, conflituosas, gerando as estrelas e os elementos mais pesados; e, finalmente, a água, seu aparecimento na terra e sua função na constituição da vida como a conhecemos. A conclusão é que, de fato, pode-se considerar o universo como uma entidade viva. Ou seja, uma entidade que nasceu, evolui e, eventualmente, morrerá. Em seguida, apresentaremos teorias e conceitos, baseados no estudo de sistemas ecológicos, que podem ser adaptados para explicar essas características do universo.

Baseados em observações da natureza, podemos concluir que os “sistemas vivos” evoluem pela alteração de sua complexidade. Alguns sistemas o fazem no sentido de aumentá-la; outros são inaptos e entram em rota de extinção. Os sistemas vivos que são bem-adaptados conseguem utilizar mecanismos próprios para se afastarem cada vez mais da condição de equilíbrio, que é outra forma de dizer que a sua complexidade está aumentando. Pretendemos apresentar as bases que apoiem ou sustentem esta afirmação quando aplicada ao universo, pois vamos considerá-lo como um sistema vivo, regulado por todas as regras usuais de evolução, mutação, adaptação, auto-organização, entre outras.

Desde sua criação, o universo tem-se mostrado um sistema de alta sustentabilidade, que utiliza eficientemente características próprias, as quais aumentam sua complexidade. A base científica que permite refletir sobre essa questão é a *termodinâmica dos processos irreversíveis*, cujos fundamentos foram expostos essencialmente no século XX, e que lida com sistemas fora do equilíbrio. Quais são as característi-

cas próprias que propiciaram uma rota evolutiva tão bem adaptada? Para responder a esta questão, iremos considerar o sistema universo como um sistema fora do equilíbrio e que tem conseguido se mover no sentido de se afastar cada vez mais do equilíbrio; ou seja, de aumentar a sua complexidade. Estaremos interessados em identificar as características do universo que o impediram – e ainda o impedem – de entrar em rota de extinção numa escala de tempo finita. Usamos, na frase anterior, a restrição “numa escala de tempo finita”, pois sabe-se que a expansão do universo vai levá-lo à desordem ou morte térmica. Os fundamentos dessas características encontram-se no ambiente de diversidade, que é uma propriedade fundamental da evolução de todo sistema, inclusive do universo.

A termodinâmica clássica, consolidada no século XIX, lida com os sistemas em equilíbrio e suas leis descrevem as modificações que o sistema apresenta ao atingir a condição de equilíbrio. Algumas propriedades discutidas aqui já foram apresentadas anteriormente (seção 1). Uma de suas leis básicas é a lei de conservação de energia, conhecida também como a primeira lei da termodinâmica. Outro comportamento regulado pela termodinâmica clássica, descrito pela segunda lei da termodinâmica, mostra que os processos naturais sempre ocorrem no sentido de aumentar a sua desordem. Esta é medida por um conceito denominado de entropia. A variação da entropia de um sistema isolado será nula ou positiva, ou seja, sua desordem é constante ou sempre aumenta. É esta lei que permitiu criar o conceito de *morte térmica* para prever que o futuro longínquo do universo será totalmente desordenado e em equilíbrio. Portanto, em condição de *morte térmica*, nada mais irá mudar no espaço e no tempo.

Entretanto, neste momento, em algumas regiões do universo, o que parece ocorrer é exatamente o oposto, ou seja, a ordem está aumentando. Em geral, um sistema vivo está em interação com um ambiente; é o que nos permite definir o sistema em observação e a sua vizinhança. O conceito de vizinhança denota o ambiente em que o sistema está inserido e, a partir daqui, não faremos distinção entre vizinhança,

‘Sistemas vivos’
evoluem pela
alteração de sua
complexidade.
Alguns sistemas o
fazem no sentido
de aumentá-la;
outros são inaptos
e entram em rota
de extinção

ambiente ou reservatório. No caso do universo, apesar de ser este um sistema único, nós o dividiremos, a seguir, em subsistemas. Consideraremos alguns desses subsistemas, onde a ordem é observada, como sendo o Sistema, enquanto os demais subsistemas se juntam para constituir a Vizinhança ou Reservatório. Dessa forma, o sistema pode aumentar sua ordem – ou seja, diminuir a sua entropia – às custas do reservatório que, por sua vez, aumenta a sua entropia. O importante é que a entropia do conjunto sistema-vizinhança, considerado isolado, permaneça constante ou aumente. Portanto, existe uma rota evolutiva que torna alguns sistemas, em contato com um reservatório, cada vez mais complexos, no sentido de reduzir suas desordens ou sua entropia.

A ciência do século XX cuidou dessa questão do aumento da ordem nos sistemas naturais imersos em uma vizinhança e criou a *termodinâmica dos processos irreversíveis*. Estudar um sistema imerso numa vizinhança equivale a dizer que se trata de um sistema aberto e que este pode trocar permanentemente energia, massa e informação com sua vizinhança.

Essas estruturas, que são sistemas abertos, operam longe do equilíbrio e adquirem, em algum estágio de sua história evolutiva, um tal grau de complexidade que conseguem aumentar sua ordem, com conseqüente redução da sua entropia, a partir de fluxos (trocas) de massa, energia e informação com a vizinhança. Embora o sistema seja aberto e, portanto, em condições de sofrer a influência dos fluxos, é importante perceber que o aumento da ordem é uma propriedade do sistema. Estaremos interessados nos sistemas cujos mecanismos internos promovem o aumento da ordem. Esta é a razão pela qual esses processos evolutivos são denominados auto-organizados, ou seja, a escolha do padrão que irá determinar o comportamento futuro do sistema é uma escolha do próprio sistema. A escolha do padrão é uma propriedade interna do sistema e não uma ordem induzida ou imposta externamente. É assim que surge uma ordem espontânea nas estruturas dissipativas.

Uma formulação alternativa da segunda lei da termodinâmica, numa versão estendida aos processos irreversíveis, foi proposta por Nicolis e Prigogine (1989). Eles introduziram um princípio de dissipação mínima como a força propulsora para promover a organização espontânea. Desde então, vários trabalhos científicos foram realizados para estabelecer as bases do comportamento desses sistemas e uma das extensões é a da *Termodinâmica Estendida dos Processos Irreversíveis* (JOU et al., 1996), que procura ampliar os conceitos propostos por Nicolis, Prigogine e outros. Alguns desses conceitos foram utilizados, por exemplo, para estudar sistemas eco-

lógicos (JORGENSEN, S., op. cit.; JORGENSEN, S.; SVIREZHEV, op. cit.). Uma das proposições desses trabalhos é que as propriedades termodinâmicas dos ecossistemas – estes últimos considerados como sistemas dissipativos – podem, em geral, ser extrapoladas aos sistemas vivos.

De fato, seguindo os passos de Hartmut Bossel (op. cit.) em sua *teoria da orientação*, entende-se que a flexibilidade e a diversidade são características determinantes para apontar tendências em sistemas ecológicos e em estruturas vivas como, por exemplo, as estruturas humanas. Quanto maiores forem a diversidade e a flexibilidade desses sistemas, maiores serão suas possibilidades de utilizar os recursos cedidos pela vizinhança e de ocupar os nichos disponíveis em seu ambiente, o que aumenta sua complexidade. Correspondentemente, maiores serão as possibilidades de adaptação futura ao novo padrão.

Para avançar na discussão sobre o corpo universo, visto como uma estrutura dissipativa em evolução auto-organizada, apresentaremos a proposta da *quarta lei da termodinâmica* formulada por Jorgensen. Entretanto, deve ser salientado que embora essa proposta de lei seja muito promissora e tenha sido fundamentada em observações experimentais nos sistemas ecológicos, ela *ainda* não faz parte do arcabouço teórico da ciência Física.

Se um sistema recebe um fluxo de exergia, esse sistema irá utilizá-lo para se afastar do equilíbrio termodinâmico; múltiplas trajetórias estarão disponíveis para realizar esse afastamento; nas condições que prevalecem, a trajetória que leva à maior acumulação da exergia, isto é, que possuam a estrutura mais ordenada e mais distante do equilíbrio termodinâmico, terá uma maior propensão a ser a selecionada. (JORGENSEN, S., op. cit., p. 303, tradução nossa).

Na formulação dessa lei, dois aspectos merecem comentários: propensão e exergia. Primeiro, existem alguns princípios da Física relacionados com o conceito de trajetória, a qual pode ser seguida por um sistema para sair de uma configuração inicial de equilíbrio para uma configuração final. Tais princípios *afirmam* que a trajetória escolhida minimiza ou maximiza alguma grandeza física; por exemplo, a lei de Fermat ou o princípio da ação mínima (sobre a propagação da luz).

A pretensa quarta lei também trabalha com o conceito de trajetória, mas introduz um ingrediente probabilístico, o de *propensão*. Isto é totalmente inovador, pois introduz a incerteza na escolha da trajetória, na forma de uma lei. Além disso, na formulação dessa lei aparece o termo exergia, o qual não é muito disseminado nem mesmo na comunidade científica. A vizinhança fornece ao sistema energia que

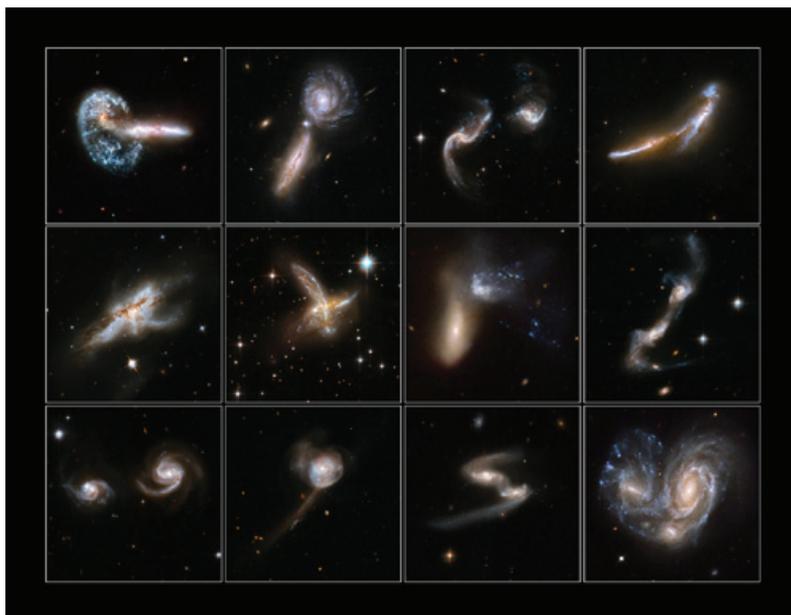
pode ser utilizada de três formas diferentes. Uma parte da energia que o sistema recebe da vizinhança é usada para manter a complexidade da estrutura, uma parte é dissipada, e a outra, que estará disponível para realizar trabalho – ou seja, para *au-mentar* a organização da estrutura – é a denominada *exergia* (diz-se, tecnicamente, que ela realiza um trabalho). Dessa forma, embora a energia sempre se conserve (primeira lei da termodinâmica), a *exergia*, que é a grandeza física utilizada para parametrizar a propensão à ordem, não se conserva.

Baseados nos trabalhos com ecossistemas, pode-se afirmar que:

A evolução favorece aqueles sistemas que “aprendem” a utilizar os recursos disponíveis de forma mais eficiente e eficaz do que seus competidores. Essa aprendizagem está incorporada nos seus “códigos genéticos” e se manifestam nas estruturas dissipativas que os sistemas constroem. Todos os sistemas irão aumentar sua complexidade quando as espécies co-evoluem, aumentando o conteúdo específico de *exergia* do material genético e da estrutura dissipativa. Ao nível do ecossistema, a evolução das espécies irá causar, de forma crescente, um melhor uso das fontes disponíveis. Portanto, espécies e ecossistemas como um todo tendem a progredir no sentido de estruturas dissipativas mais complexas, produzindo um comportamento cada vez mais complexo. (BOSSSEL, op. cit., p. 194).

Para realizar a transposição desses conceitos e teorias ao universo, podemos considerá-lo (ou parte dele, como mencionado anteriormente) como um sistema vivo e, assim, conseguir estudar e analisar as regras propostas para explicar a sua

FIGURA 4: Galáxias em interação no universo



NASA, ESA, THE HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI/AURA) - ESA/HUBBLE COLLABORATION E A. EVANS (UNIVERSITY OF VIRGINIA, CHARLOTTESVILLE/NRAO/STONY BROOK UNIVERSITY), K. NOLL (STSCI), AND J. WESTPHAL (CALTECH).

evolução. Em particular, podemos considerar algumas das regiões como subsistemas que têm a propriedade de aprender. A “aprendizagem”, internalizada nesses subsistemas como “códigos genéticos”, gera uma ruptura com o determinismo laplaciano e impõe o indeterminismo como o procedimento eficaz para aumentar a complexidade das estruturas dissipativas.

Tal proposição considera que o subsistema universo é levado a se afastar cada vez mais da condição de equilíbrio e que seu comportamento passa a ser regulado pelo indeterminismo e por não linearidades. Isto é válido para todos os subsistemas, inclusive para o conjunto dos subsistemas que se mostrou historicamente robusto. Nessa dinâmica, não atender à condição de sistema vivo levará a estrutura a apresentar comportamentos patológicos que ocasionarão falhas e eventuais extinções. Ou seja, cada subsistema pode seguir a trajetória de aumentar continuamente a sua complexidade ou, ao contrário, entrar em rota de extinção.

A título de exemplo: mesmo que algumas galáxias e estrelas tenham desaparecido e venham desaparecendo, o conjunto tem-se mostrado de elevada eficácia. O desaparecimento de uma estrela pode induzir a formação de outras estrelas, mas, independentemente disso, ele certamente enriquece o meio interestelar com o material processado, construído a partir do H, fundamental para o nosso tipo de vida e que as estrelas devolvem ao espaço ao morrer. Galáxias estão frequentemente assimilando e distorcendo outras galáxias, em uma interação constante. A Via Láctea, nossa galáxia lar, está interagindo, neste “momento”, com as várias galáxias do chamado “Grupo Local”, especialmente com suas 12 galáxias satélites. Destas, as maiores são as galáxias irregulares chamadas “Nuvens de Magalhães” (a “Grande” e a “Pequena”). Existe uma ponte de H molecular entre elas, indicando que, em um passado “não muito distante” (da ordem de uns 200 milhões de anos) (MATHÉWSON, 1984, p. 125), elas estiveram em forte interação. Hoje, partes de uma pertencem provavelmente à outra... No universo, temos vários exemplos de galáxias que só podem ser explicadas por uma “colisão” entre galáxias, numa espécie de canibalismo.

Numa abordagem simples para ilustrar a metodologia, vamos considerar o

Galáxias estão frequentemente assimilando e distorcendo outras galáxias, em uma interação constante. A Via Láctea, nossa galáxia lar, está interagindo, neste “momento”, com as várias galáxias do chamado ‘Grupo Local’

universo caracterizado por dois tipos de subsistemas: um subsistema maduro ou consolidado; e subsistema novo ou emergente. Ou seja, vamos considerar somente uma distinção binária, embora o sistema represente um contínuo entre os consolidados e os emergentes.

As estruturas dissipativas consolidadas ou maduras, tendo já atingido picos de otimização na complexidade, gastam enorme esforço (energia) para manter a sua custosa estrutura dissipativa. Nesta condição, novas ampliações na complexidade do sistema se dão essencialmente de forma qualificada, ou seja, pelo aperfeiçoamento do teor da informação que flui para a estrutura. A consequência é que tal processo resulta somente em pequenos incrementos na sua dinâmica evolutiva, no sentido de atingir estruturas cada vez mais complexas. Contrariamente a essas estruturas maduras, as estruturas novas têm um baixo nível de complexidade e uma baixa potencialidade para aumentar a sua complexidade, por não contemplarem a diversidade de forma robusta. As estruturas novas são caracterizadas por serem simples, de forma que pouco esforço (energia) é necessário para mantê-las, ou seja, elas dissipam pouco esforço na sua manutenção. A desvantagem é que, mesmo dispondo de muitas potencialidades para aumentar a sua complexidade, elas têm baixa taxa de aproveitamento das “riquezas” que potencialmente podem fluir para elas. Muitas oportunidades são perdidas e, tecnicamente, dizemos que muitas dessas riquezas são “refletidas”. Portanto, estruturas novas têm um elevado grau de “reflexão física dos fluxos”, enquanto as maduras têm baixo grau de “reflexão”. Assim, as estruturas novas têm, se comparadas com as maduras, vantagens competitivas no sentido de que elas podem trabalhar para reduzir, eficientemente, a enorme “riqueza” que está sendo perdida por “reflexão”. Dessa forma, as estruturas novas, utilizando a condição de serem de baixa dissipação e de elevada “reflexão”, têm a oportunidade de, por meio de tentativas e erros, encontrar trajetórias que as façam avançar rapidamente, queimando etapas. Ou seja, elas podem eliminar muitas daquelas etapas que as estruturas maduras tiveram que percorrer na sua dinâmica evolutiva.

Na tentativa de parametrizar o sistema, a questão de mensuração da complexidade passa a ser de grande relevância no estudo das estruturas dissipativas.

Rompendo a simplicidade da abordagem dicotômica das categorias “madura” e “nova” e considerando que as estruturas reagem de forma bastante diferenciada em função do seu grau de maturidade, podemos tornar a análise mais refinada pela introdução de parâmetros que possam ser associados à diversidade do sistema e do ambiente. É nesta condição que podemos utilizar a “teoria da orientação” de Bossel.

A diversidade funciona como um parâmetro de controle para determinar a evolução do sistema. A partir dessa análise, podemos obter conclusões qualitativas que se ancoram fortemente no estudo das estruturas dissipativas. Nosso trabalho não irá além da indicação das conclusões qualitativas, pois não procederemos a estudos de dados para obter conclusões.

Bossel, em seu trabalho *Exergy and the Emergence of Multidimensional Systems* (op. cit.), considera que a evolução de ecossistemas (sistemas estudados por ele) ocorre no sentido da *especialização, da formação de espécies, da sinergia, da complexificação (aumento da complexidade), da diferenciação e da utilização mais eficiente da exergia e das fontes materiais*. O desenvolvimento dos subsistemas em um sistema ocorre como propriedades emergentes em um espaço multidimensional e envolve *degradação de exergia, reciclagem, minimização de descarte, fluxos internos eficientes, homeostase e adaptação, diversidade, heterogeneidade, hierarquia e seletividade, organização, minimização de custos e de manutenção, estocagem de fontes disponíveis*. É neste cenário que Bossel cria a sua *teoria da orientação* para explicar a evolução dos ecossistemas.

A teoria de Bossel lida, de forma geral, com a emergência de objetivos comportamentais (orientadores) do sistema, em que a sua propriedade de auto-organização surge de seu contato (via fluxos) com um ambiente genérico. Ele distingue claramente o sistema de seu ambiente e introduz as propriedades afins ao sistema e ao ambiente. De acordo com esta teoria, para um sistema sobreviver em um ambiente “normal”, caracterizado por um dado estado do ambiente, com fontes escassas, variedade, insegurança, mutação e coexistindo com outros sistemas, ele precisa ser capaz de existir fisicamente neste ambiente e ser compatível com ele. Para isso, ele deve obter efetivamente alimento das fontes, agir livremente perante a variedade do ambiente, proteger a si próprio das ameaças imprevisíveis, adaptar-se às mudanças no ambiente e interagir produtivamente com outros sistemas. Essas orientações essenciais do sistema emergiram ao longo do curso de sua evolução no ambiente em que está inserido e estão codificadas permanentemente. O autor argumenta que sua teoria permite uma análise quantitativa e comparativa do desempenho de um sistema em função das diferenças ambientais nas quais esteja inserido e coexistindo com outros sistemas. Para isso, ele propõe que o desenvolvimento do sistema seja determinado por seis *propriedades gerais do ambiente*, a saber:

- a. *Estado normal do ambiente*: o estado real do ambiente pode variar, em certa extensão, ao redor desse estado normal;

- b. *Fontes escassas*: as fontes de exergia, matéria e informação que são demandadas para assegurar a sobrevivência do sistema, não estão acessíveis imediatamente quando e onde necessárias;
- c. *Variedade*: muitos processos e padrões qualitativamente diferentes ocorrem constante ou intermitentemente no ambiente;
- d. *Confiança*: o estado normal do ambiente flutua aleatoriamente e a flutuação pode, às vezes, levá-lo para longe do estado normal;
- e. *Mudança*: no decorrer do tempo, o estado normal do ambiente pode, gradual ou abruptamente, mudar em definitivo para outro estado normal;
- f. *Outros sistemas*: o comportamento de outros sistemas muda o ambiente de um dado sistema.

Considerando que a evolução reforça a aptidão para a sobrevivência – que representa a pretensa quarta lei da termodinâmica – das espécies (os subsistemas), elas devem internalizar propriedades gerais do ambiente em suas estruturas, de forma que tais propriedades imponham a existência de correspondentes características básicas em cada subsistema.

As propriedades gerais do ambiente são independentes, devendo existir um conjunto similar de propriedades, também independentes, em cada subsistema. Uma regra de necessidade é que as propriedades gerais do ambiente consigam se expressar nas características concretas da estrutura do subsistema. Todo subsistema deve dar uma “atenção” individual a cada uma e a todas as propriedades gerais do ambiente, pois essas propriedades são independentes entre si. Nenhuma propriedade pode ser negligenciada, sob pena de o subsistema apresentar um comportamento patológico. Em conjunto, os critérios que regulam essa “atenção” são denominados *orientadores básicos*, já que eles produzem, consciente ou inconscientemente, orientações comportamentais do subsistema inserido no seu ambiente. Assim, um sistema viável deve assegurar uma atenção mínima e balanceada para cada um dos orientadores básicos. O autor propôs a existência de uma correlação *biunívoca* (tecnicamente podemos tentar criar uma associação de biunivocidade como variáveis conjugadas – extensivas e intensivas) entre as seis *propriedades gerais do ambiente* (que são variáveis extensivas, pois dependem do tamanho do ambiente) e os *orientadores básicos* do sistema (que são variáveis intensivas, pois não dependem do tamanho). Essa correlação pode ser representada da seguinte forma:

- i. Estado normal do ambiente → Existência

2. Fontes escassas → Eficiência
3. Variedade → Liberdade de ação
4. Confiança → Segurança
5. Mutabilidade → Adaptabilidade
6. Outros sistemas → Coexistência

Na relação biunívoca mostrada acima, cada um dos *seis orientadores básicos* apresenta propriedades intrínsecas que identificam esses parâmetros e que se expressam da seguinte forma:

- a. *Existência*: a atenção às condições existenciais é necessária para assegurar a compatibilidade básica e a sobrevivência imediata de cada subsistema no estado normal do ambiente;
- b. *Eficiência*: em seu esforço para obter exergia, matéria e informação de fontes escassas do ambiente e para exercer influência nele (feedback), o subsistema deve ser eficaz de forma equilibrada;
- c. *Liberdade de ação*: cada subsistema deve ter a habilidade de lidar, de várias formas, com os desafios postos pela variedade ambiental;
- d. *Segurança*: cada subsistema deve ter a habilidade de proteger a si próprio dos efeitos deletérios das condições ambientais, as quais são variáveis, flutuantes, imprevisíveis e não confiáveis;
- e. *Adaptabilidade*: cada subsistema deve ter habilidade para mudar seus parâmetros e/ou estrutura, com vistas a gerar respostas mais apropriadas aos desafios originados por condições ambientais mutantes;
- f. *Coexistência*: cada subsistema deve modificar seu comportamento para levar em consideração o comportamento e os interesses (orientadores) dos outros subsistemas.

Em sua teoria, o autor sustenta que os valores fundamentais representados pelos seis orientadores básicos se manifestam como valores objetivos, decorrentes da condição imposta ao subsistema de ter habilidade para formar padrões espontaneamente (auto-organização), em resposta às propriedades ambientais normais. Em outras palavras, se surgem padrões auto-organizados no subsistema devido à interação deste com o ambiente, os valores objetivos para descrever a dinâmica evolutiva são os seis orientadores básicos. Nestes termos, o sistema em condições de assegurar um melhor grau de satisfação geral desses seis orientadores será o mais

ajustado e terá mais oportunidades de sobrevivência e de sustentabilidade em longo prazo. Em espécies robustas ou sistemas persistentes, os orientadores irão operar como funções, metas que emergem para benefício próprio do subsistema. Cada um dos orientadores básicos representa uma única exigência a ser satisfeita, mas a “atenção” deve ser dada a *todos* os seis. Uma das exigências é que a carência em um orientador não tenha como ser compensada pelo excesso em outros orientadores. A aptidão de um sistema exige que a resposta seja dada aos seis critérios e, por decorrência, o comportamento e o desenvolvimento do sistema devem também ser avaliados segundo os seis critérios.

De acordo com a teoria, portanto, para avaliar e orientar o comportamento de um subsistema, deve-se operar em duas etapas. Na *primeira etapa*, um grau mínimo de satisfação para cada um dos orientadores básicos deve ser garantido separadamente. Os sistemas que não atingirem esse mínimo, mesmo que em somente um dos seis orientadores básicos, sofrem uma real ameaça de sobrevivência em longo prazo. Na *segunda etapa*, somente quando a satisfação mínima requerida para todos os orientadores básicos estiver assegurada é que será permitido ao sistema tentar aumentar o grau de satisfação de cada um dos orientadores básicos.

Uma conclusão importante é que as diferenças características dos sistemas, analisadas a partir da importância relativa de cada um dos orientadores, podem ser explicadas por meio de diferenciações construídas na segunda etapa. Como consequência da aplicação dessas etapas, tem-se que os múltiplos futuros possíveis de um sistema são desenvolvimentos contínuos, construídos no passado. As condições dos orientadores básicos construídos na segunda etapa, em um determinado momento, é que caracterizarão as diferenças dos subsistemas no futuro. Além disso, as trajetórias com melhor grau de satisfação dos orientadores básicos são as que estarão associadas aos subsistemas que tenham maior probabilidade de sucesso em longo prazo, desde que, obviamente, as opções de mudanças de trajetória não sejam proibidas.

Sob o argumento de que sua *teoria de orientação* pode ser quantificada para análises comparativas, Bossel desenvolveu simulações computacionais de entidades virtuais que podem ter suas condições evolucionárias parametrizadas em função das *propriedades gerais do ambiente* e dos *orientadores básicos*. Para se ter uma visão mais abrangente das simulações, recomendamos uma consulta direta aos trabalhos do autor (JORGENSEN, S.; SVIREZHEV, op. cit.). Seus estudos mostram que a habilidade do sistema para lidar com a variedade ambiental determina a sua liberdade

de ação, isto é, na variedade comportamental incorporada na sua estrutura cognitiva. As experiências de simulação executadas por Bossel confirmam as proposições básicas de sua teoria de orientação. Para um sistema cuja evolução seja regulada pela auto-organização, emerge um padrão de orientações equilibradas de valores multidimensionais como resultado de uma seleção de aptidões. A emergência de orientadores básicos, vistos como dimensões de valores básicos ou de interesse de sistema, são reflexos das propriedades do ambiente. Em ambientes *normais*, a mesma dimensão de valor emerge em todos os sistemas em auto-organização, a despeito de sua composição específica ou de seu ambiente específico. A *atenção equilibrada* deixa espaço para diferenças individuais graças à ênfase relativa dada a diferentes orientadores.

A abordagem de sistemas complexos como, por exemplo, os sistemas ecológicos, através do estudo das estruturas dissipativas, tem-se mostrado de grande utilidade para os estudos das trajetórias potenciais na determinação da evolução desses sistemas.

O objetivo desta seção foi apresentar conceitos e metodologias, desenvolvidos para sistemas ecológicos, que podem ser aplicados ao universo, no atual momento, para explicar o grau de complexidade encontrado em algumas regiões, como, por exemplo, a vida na Terra, em um processo evolutivo que combina desordem, extinção e morte do conjunto; e ordem, nascimento e vida em partes do conjunto.