

Uma brevíssima história do tempo

Carlos Fiolhais



O título de cima presta homenagem ao livro popularíssimo de Stephen Hawking [1] do qual há até uma recente versão abreviada [2]. Mas, ao contrário dessa obra, não se trata aqui de contar a história do Universo desde o seu início, há cerca de quinze mil milhões de anos, mas antes de contar muito abreviadamente a história da visão do tempo nas ciências físicas, desde que estas se iniciaram há cerca de quatrocentos anos.

E forçoso é começar essa história com o italiano Galileu Galilei [3]. Para Galileu o tempo era, como ainda hoje, uma grandeza que se podia medir com um relógio, tal como o espaço é uma grandeza que se pode medir com uma régua. Medir é, sempre foi, conhecer. Os relógios usados por Galileu eram muito rudimentares. Os primeiros relógios mecânicos, baseados no pêndulo, só puderam ser construídos na sequência dos desenvolvimentos da mecânica. Galileu foi o descobridor da lei do isocronismo das pequenas oscilações de um pêndulo (segundo a qual, o tempo de uma pequena oscilação não depende do ponto exacto de partida), mas só dezenas de anos mais tarde o holandês Christiaan Huyghens usou esse conhecimento para construir um primitivo relógio de pêndulo. Mas Galileu tinha à sua disposição ampuhleras e também um relógio que ainda hoje pode ser usado

por qualquer pessoa: o pulso. O sábio italiano não tinha um relógio de pulso, mas tinha um pulso de relógio e é, de facto, fantástico, que tenha descoberto a referida lei e outras, como a da queda dos graves, que relaciona a distância d percorrida por um grave com o tempo t decorrido,

$$d = \frac{1}{2}gt^2,$$

com g uma contante (chamada aceleração da gravidade, $g = 9,8m/s^2$) usando o seu próprio ritmo cardíaco (que não se alterou com a iminência do momento de *eureka*, pois isso teria impedido até a própria descoberta ...).

Isaac Newton [4], o inglês que nasce no ano em que Galileu morre, segue a tradição inaugurada por Galileu de descrever a Natureza com a ajuda da matemática (Galileu tinha dito que “o Livro da Natureza está escrito em caracteres matemáticos”). A segunda lei de Newton, que relaciona directamente força F com aceleração a

$$F = ma,$$

com m a massa, uma grandeza que mede a inércia do corpo ao movimento, é uma maneira geral de expressar leis particulares como a lei do isocronismo das pequenas oscilações



Figura 1. Galileo Galilei [1564-1642].

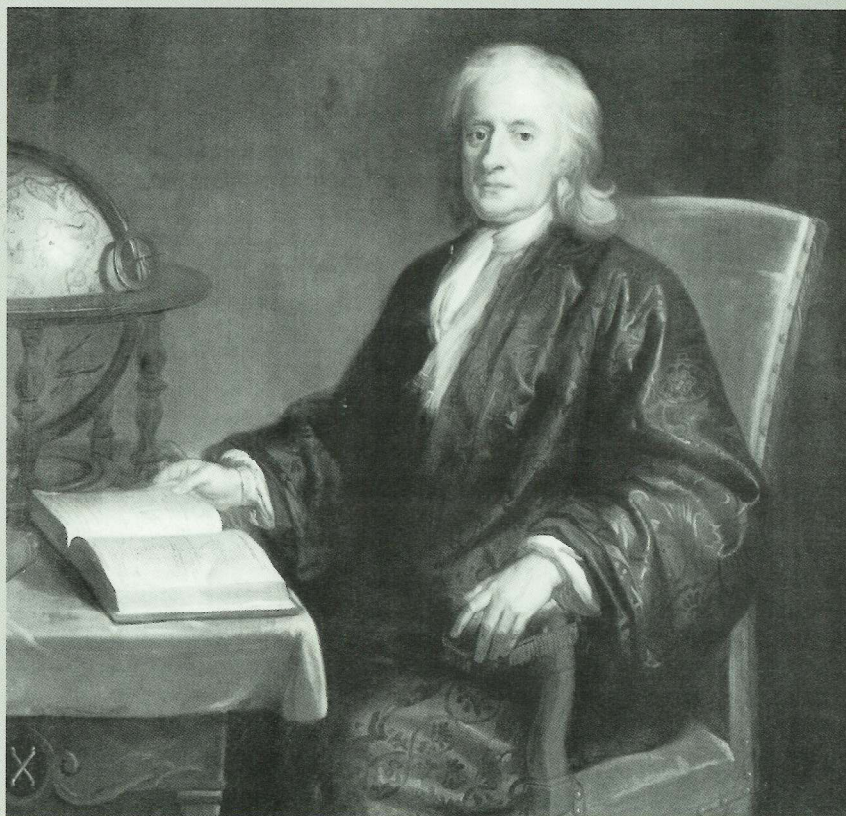


Figura 2. Isaac Newton [1642-1727].

ou a lei da queda dos graves. A aceleração traduz a mudança no tempo da velocidade, que por sua vez traduz a mudança no tempo da posição. A mecânica que Galileu e Newton inauguraram (o segundo criando para o efeito a ferramenta matemática necessária — o cálculo infinitesimal) trata afinal de mudanças no tempo. E o que é o tempo? Pois, como Santo Agostinho disse, todos sabemos se não formos obrigados a explicitar o que é, mas já não sabemos se o tivermos de fazer (um humorista, perante essa dificuldade, saiu dela definindo o tempo como “o que impedia que tudo acontecesse em simultâneo”). Newton procurou, nos seus *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, definir o tempo. E deixou claro que existia um tempo absoluto, igual para todos, isto é, que todos os relógios marcavam o tempo da mesma maneira [5]:

“O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e da sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa e é também chamado de duração”.

Por sua vez, o espaço era outro conceito absoluto, isto é, todas as réguas mediam as distâncias da mesma maneira. Seja de novo dada a palavra a Newton [5]:

“O espaço absoluto, na sua própria natureza, sem uma relação com o que quer que seja exterior, permanece sempre igual e imóvel ...”

O tempo e o espaço, conceitos dissociados, funcionavam como cenários iguais para todos, onde se passavam todos os acontecimentos. Os movimentos cujas leis Newton descreveu com a ajuda da matemática eram uma alteração das posições de um corpo no espaço ao longo do tempo.

A mecânica newtoniana triunfou. Ela, tem, porém, uma grande dificuldade ao lidar com o tempo: não consegue dis-

tinguir passado de futuro. As leis de Newton não fazem essa importante distinção: são invariantes relativamente a inversões do tempo. No entanto, todos sabemos que o futuro é diferente do passado, que muitos fenómenos indicam claramente uma “seta do tempo”. No século XIX desenvolveu-se um outro ramo da física, a termodinâmica. Ora, a segunda lei da termodinâmica, estabelecida pelo alemão Rudolph Clausius, ao contrário da segunda lei de Newton, fala da diferença entre futuro e passado: define uma grandeza para sistemas macroscópicos, chamada entropia, S , e afirma que a entropia de um sistema isolado tende para um máximo. Nos processos irreversíveis em sistemas isolados, a entropia cresce necessariamente. Essa lei exprime-se por uma inequação [6]:

$$\Delta S > 0$$

e não por uma equação.

Um problema que chegou até aos nossos dias é precisamente o de fundamentar a termodinâmica na mecânica newtoniana (ou, mais em geral, na mecânica quântica). A mecânica estatística procura, de facto, ligar o microscópico e o macroscópico, mas tem dificuldades em explicar como é que, no primeiro nível, não há diferença entre passado e futuro, ao passo que no segundo nível já há. Pois não é o macroscópico feito a partir do microscópico?

Uma grande evolução no conceito de tempo dá-se no início do século XX com o alemão, mais tarde suíço e norteamericano, Albert Einstein [7]. Além de se ocupar da mecânica estatística, Einstein preocupou-se com a ligação entre a mecânica clássica, de Galileu e Newton, e o electromagnetismo, de Faraday e Maxwell, este estabelecido tal como a termodinâmica ao longo do século XIX.



Figura 3. Albert Einstein [1879-1955].

Na mecânica havia um princípio da relatividade, já descoberto por Galileu, segundo o qual todos os observadores de sistemas de inércia viam da mesma maneira um dado fenómeno físico (há invariância ao passar de um referencial de inércia para outro, entendendo-se por referencial de inércia aquele onde são válidas as leis de Newton; encontrado um, qualquer outro com velocidade constante em relação ao primeiro será também de inércia). Mas no electromagnetismo já não era visível esse princípio, parecendo existir um sistema de referência privilegiado, o chamado éter. Einstein defendeu, numa tentativa de unir os dois ramos da física, a existência de um princípio da relatividade tanto para a mecânica como para o electromagnetismo. Mas, para isso, teve de modificar a mecânica, deixando intacto o electromagnetismo. Ou melhor, este não ficou intacto: o conceito de éter “evaporou-se”...

Einstein partiu, para estabelecer uma nova mecânica, a mecânica relativista, que engloba a mecânica de Galileu e Newton no limite das pequenas velocidades (assim como

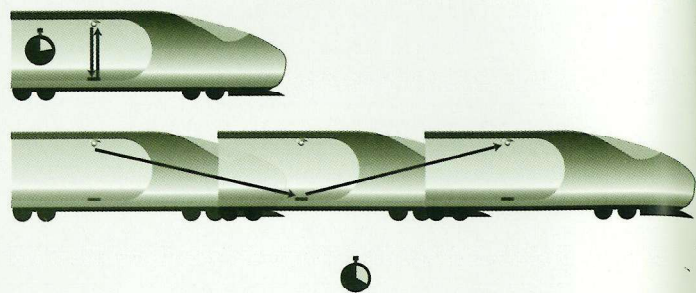


Figura 4. O tempo é relativo: Flui mais lentamente para um observador a bordo do comboio, porque a velocidade da luz tem o mesmo valor para os dois observadores.

Newton viu mais longe por ter subido aos ombros do gigante Galileu, também Einstein viu mais longe ainda porque conseguiu subir para os ombros de Newton). Partiu do princípio de que existia um princípio da relatividade para todas as leis da física e não apenas para as leis da mecânica. E — outro postulando essencial — partiu também do princípio de que a velocidade da luz é um invariante, isto é, tem o mesmo valor para todos os observadores.

Este último postulando parece, à primeira vista, estranho. É fácil, com efeito, supor que um raio de luz lançado de dentro de um comboio viaje não à velocidade da luz $c = 300\,000\text{ km/s}$, que aparecia nas equações do electromagnetismo escritas por Maxwell, mas a essa velocidade mais a velocidade do comboio. Mas Newton admitiu que não, que a velocidade do raio de luz lançado de dentro do comboio não depende, visto do cais, da velocidade do comboio! (Figura 4.)

As consequências são, de facto, extraordinárias. Uma das mais imediatas e também das maiores é que o tempo flui de maneira diferente para quem vai no comboio e para quem está no cais. Suponhamos uma experiência, que tem de ser mental, de um comboio a viajar com um velocidade comparável à da luz. (No tempo de Einstein já havia comboios, embora muito lentos ...) Uma lâmpada eléctrica acende-se no tecto do comboio, um feixe de luz parte para baixo, é reflectido por um espelho no chão do comboio e regressa à lâmpada. (A lâmpada eléctrica foi inventada por Edison no

Figura 5. Paradoxo dos gêmeos. A gêmea que viaja a uma estrela distante não



ano em que Einstein nasceu). Do ponto de vista de um observador dentro do comboio, o movimento da luz dá-se em linha recta e na vertical. Mas, do ponto de vista de um observador no cais (supomos o comboio transparente para facilitar a observação), o movimento é ainda em linha recta, mas não vertical, mas sim oblíquo. O feixe desce propagando-se para a frente, no sentido do comboio, bate no espelho e sobe, sempre propagando-se para a frente. A distância percorrida é obviamente maior pois a soma dos dois lados iguais de um triângulo isósceles é maior do que a altura do triângulo. Agora, como a velocidade da luz é a mesma para os dois observadores e a distância percorrida é maior para o observador externo, só há uma conclusão a tirar: o tempo marcado no interior do comboio é diferente do que o tempo marcado fora do comboio, ou, mais precisamente, o tempo decorrido dentro do comboio entre a emissão e a recepção da luz pela lâmpada é menor. Ou, dito ainda de outra forma, relógios em movimento atrasam-se! Este é o conhecido fenómeno da dilatação do tempo, que pode ser descrito matematicamente com a ajuda apenas do teorema de Pitágoras [8].

Este fenómeno já foi verificado experimentalmente com relógios atómicos, os relógios mais precisos que hoje existem (e que se baseiam no processo quântico de emissão e absorção de luz por átomos): um relógio ficou fixo em terra e outro deu a volta à Terra, a bordo de um avião. Comparados os dois relógios no fim da viagem, o relógio que tinha viajado marcou um tempo um bocadinho menor. Marcaria bastante menos se houvesse tecnologia para o colocar a grande velocidade, a uma velocidade comparável com a da luz. Quase à velocidade da luz, o tempo praticamente não passa ...

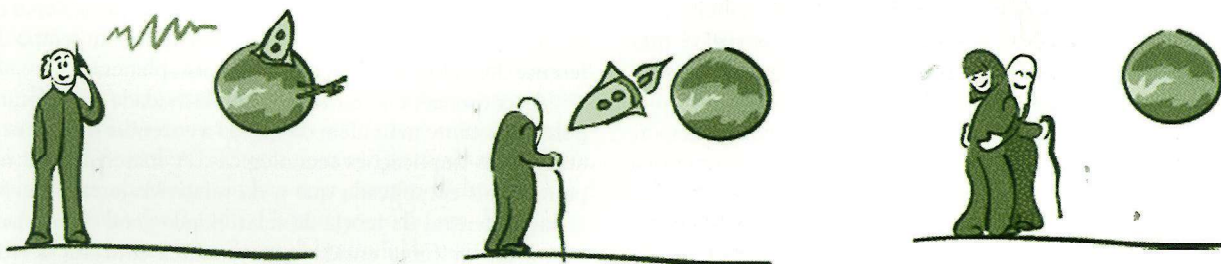
Com Einstein cada observador passou, portanto, a medir intervalos de tempo diferentes entre os mesmos acontecimentos, consoante a sua própria velocidade. Caiu o tempo absoluto de Newton, igual para todos, para passar a haver um tempo relativo. Cada um passou a ter o seu próprio tempo!

E o mesmo se passou relativamente ao espaço: para o espaço, em vez do fenómeno da contracção do tempo, previu-se e verificou-se o fenómeno da contracção do espaço: régua em movimento parecem encolhidas quando vistas de fora. Tal como o tempo, também o espaço, que se julgava absoluto, passou a ser relativo!

Ficou, porém, alguma coisa de absoluto, algo sobre o qual todos podem concordar (além da velocidade da luz). Foi possível construir matematicamente uma nova entidade à custa do espaço e do tempo: o espaço-tempo. Por outras palavras, juntando o espaço (com três dimensões) ao tempo (com uma dimensão) ficou uma entidade (com quatro dimensões) onde se podem definir intervalos invariantes. O espaço e o tempo são relativos mas no espaço-tempo, há absolutos! A geometria do espaço-tempo não é euclidiana, se o espaço e o tempo forem consideradas grandezas reais (no sentido matemático do termo: descritos por números reais). Mas, curiosamente, se o tempo for considerada um imaginário puro, um número real multiplicado pela constante imaginária i , que se define como a raiz quadrada de -1 , então o espaço-tempo tem uma geometria euclidiana. Este espaço a quatro dimensões foi chamado espaço de Minkowski do nome do matemático alemão (nascido na Rússia) Hermann Minkowski, que descreveu pela primeira vez o novo espaço. Minkowski tinha sido professor de Einstein na Escola Politécnica Federal de Zurique, mas se conseguiu encontrar uma expressão matemática conveniente para as ideias de Einstein, não conseguiu quando lhe dava aulas descortinar as qualidades intelectuais fora de comum do seu hoje famoso discípulo.

A revisão dos conceitos de espaço e tempo (que só assume verdadeira importância para velocidades próximas da da luz, sendo suficientes as ideias de Galileu e Newton para as velocidades baixas) não se fez sem dificuldades científicas e até filosóficas. Uma das mais famosas encontrou expressão no *paradoxo dos gémeos* (figura 5), do nome do físico francês Paul Langevin. Segundo Langevin (um físico que visitou Portugal nos anos 30 do século XX, ajudando na difusão entre nós das ideias relativistas), um par de gémeos que fosse colocado numa situação assimétrica de movimento, isto é, um enviado numa viagem de ida e volta a uma velocidade próxima da da luz a uma estrela distante enquanto o outro permanecia no nosso planeta, envelheceria de maneira assimétrica: o gémeo em Terra estaria muito velho, enquanto o gémeo que viajou pareceria ter tomado um elixir da juventude. Esse paradoxo — paradoxo porque do ponto de vista do gémeo em viagem é o seu irmão que viaja e, portanto, deveria ser ele a ficar mais jovem — encontra-se hoje resolvido. Mas ilustra bem as dificuldades que a teoria da relati-

envelhece tanto como o seu irmão.



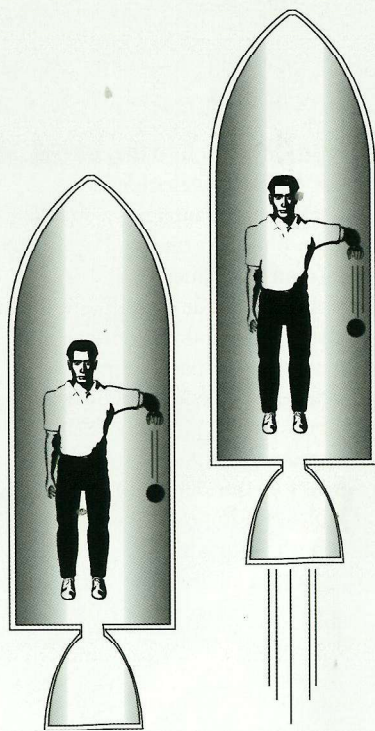


Figura 6. Uma força gravitacional a actuar na nave parada é equivalente a uma aceleração.

vidade restrita (assim se chama a mecânica de Einstein) representa para o senso comum.

Einstein conseguiria ainda uma generalização da sua teoria da relatividade restrita, que ficou conhecida como teoria da relatividade geral [9]. O grande físico considerou então sistemas não inerciais, isto é, acelerados. Partiu de uma ideia de Galileu: que um corpo grande e um corpo pequeno, na ausência de resistência do ar, caem ao mesmo tempo. O facto de o tempo de queda ser independente da massa do objecto atraído, mas tão só das propriedades do objecto attractor, explica-se porque a massa que descreve a resistência ao movimento — a massa inercial — é exactamente igual à massa que descreve a intensidade da atracção — a massa gravitacional. Na segunda lei de Newton, a força gravitacional, ou peso — a massa gravitacional m_{gr} multiplicada pela aceleração da gravidade g — tem de ser igual à massa inercial m_{in} (que antes designámos apenas por m) multiplicada pela aceleração.

$$m_{gr}g = m_{in}a.$$

Como as duas massas nos dois lados da equação são iguais, segue-se que a aceleração é uma constante,

$$a = g,$$

o que traduz o facto de todos os corpos caírem da mesma maneira. Se todos os corpos caem da mesma maneira num certo sítio, é intuitivo pensar que a queda de um grave num sítio tem a ver com as propriedades do espaço nesse sítio. Mas que propriedades?

Einstein descobriu que a força gravitacional, responsável pela queda dos graves, tem uma origem geométrica, como vamos ver. A segunda lei de Newton diz que a força gravitacional é equivalente a uma aceleração (figura 6), o que todos nós sabemos porque, quando um carro acele-

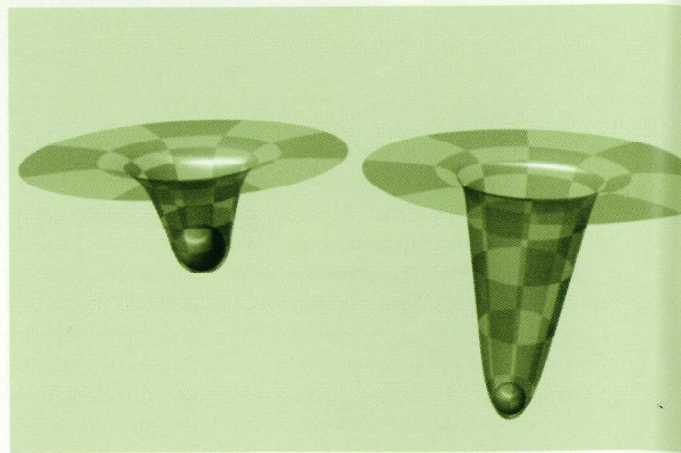


Figura 7. Deformação do espaço-tempo [aqui representado a duas dimensões] nas proximidades de corpos com massa. Uma estrela normal não atrai tanto como um buraco negro.

ra, sentimos uma força a puxar-nos para trás (e, quando o carro trava, sentimos uma força a puxar-nos para a frente). A atracção sentida numa nave fechada e parada devida à proximidade de um planeta é, portanto, equivalente a uma aceleração, devida eventualmente a um foguete em funcionamento, sem que exista um planeta próximo. Mas, numa nave acelerada tudo deve ficar para trás, incluindo um feixe de luz. E, se a nave acelerada é como uma nave puxada por um planeta, a luz deve “sentir” a força da gravidade. Einstein pensou que a luz devia ir pelo caminho mais curto e, se a luz se encurva perto de um corpo com grande massa, concluiu que o espaço (também o tempo, já que o espaço e o tempo estão inextricavelmente ligados) tem uma geometria curva, perto desse corpo. Concluiu que o espaço-tempo tem uma geometria curva perto de um corpo com uma grande massa. E que a força gravitacional resulta afinal dessa curvatura (figura 7).

Concluiu bem, porque no ano de 1919 num eclipse do Sol medido na ilha do Príncipe, que então era território português, e na ilha de Sobral, já então como hoje território brasileiro, que os raios luminosos provenientes de estrelas por detrás do Sol eram encurvados ao passar perto do Sol. “A luz pesa” foi o título de uma pequena notícia no jornal *O Século* quando, passados uns meses, a descoberta foi anunciada na Royal Society de Londres [10].

Tal significa que um relógio e uma régua marcam, respectivamente, tempos e distâncias diferentes perto e longe de um astro com uma grande massa. O efeito é mais visível para os objectos astronómicos com maior massa, como os buracos negros, esses sítios do cosmos onde o tempo e o espaço acabam, pois os tempos e as distâncias são radicalmente alterados. Este fenómeno está hoje confirmadíssimo, sendo de resto utilizado como tecnologia, pois os relógios atómicos situados a bordo dos satélites que asseguram o sistema de posicionamento global (GPS) marcam, a cerca de 20 000 km de distância da superfície da Terra, um tempo diferente dos relógios à superfície do nosso planeta.

As consequências da teoria da relatividade geral foram, porém, bastante mais além do que dá a entender a referência anterior às implicações tecnológicas. A matemática é um pouco mais complicada que a da relatividade restrita. Na equação central da teoria da relatividade geral de um lado está o tensor (uma entidade matemática com $4 \times 4 = 16$

números) que descreve a métrica do espaço-tempo e do outro o tensor que descreve a matéria e a energia (de acordo com a famosa fórmula $E = mc^2$, energia e massa são grandezas equivalentes). A geometria do espaço-tempo depende da presença da matéria-energia. Numa imagem útil, ainda que seja necessariamente grosseira, o espaço-tempo assemelha-se a um lençol estendido onde se coloca um objecto de grande massa: o lençol fica mais esticado perto desse objecto. A força gravitacional é afinal essa deformação geométrica do espaço-tempo.

A questão que se pode colocar à escala cosmológica é a seguinte: que tipo de geometria tem o Universo todo? Segue-se das equações de Einstein que o Universo pode estar em expansão, mas o sábio não foi na altura suficientemente sábio ... Decidiu acrescentar, à mão, um termo, chamado constante cosmológica, que permitia tornar o Universo estático. Depois das observações do astrónomo norte-americano Edward Hubble nos anos 30 do século passado sabe-se que o nosso Universo está em expansão, tornando dispensável a constante cosmológica de Einstein. De acordo com observações dos últimos anos, parece até que está em expansão acelerada [11], pelo que a questão da constante cosmológica permanece ainda em aberto. Einstein chamou a essa sua ideia o “maior disparate” da sua vida e a sequência veio mostrar que há, por vezes, dispartes geniais ...

Qualquer que seja o valor e a origem da constante cosmológica, o facto conhecido hoje é que o Universo teve um início há quase quinze mil milhões de anos. Nessa altura (o Big Bang, um “buraco branco”, uma espécie de buraco negro ao contrário) surgiu o espaço-tempo, isto é, surgiu o espaço e o tempo ligado a ele. Há só tempo depois do Big Bang. Quer dizer, não há um tempo anterior a esse evento (já Santo Agostinho sabia isso pois recusava a ideia de um tempo eterno antes da criação do mundo por Deus). De então para cá ocorreu toda uma sucessão de processos astrofísicos de auto-organização, para não falar já (o espaço e o tempo não o permitem...) dos processos físico-químicos, que estão na base da vida que apareceu pelo menos num planeta, o nosso ...

Esta auto-organização (aumento da ordem) parece estar em contradição com a segunda lei da termodinâmica (aumento da desordem). É uma contradição apenas aparente, pois a termodinâmica aplica-se a sistemas delimitados e é perigoso considerar todo o Universo como um desses sistemas (a pergunta é metafísica: delimitado de quê?). A origem

da seta do tempo, descrita pela segunda lei da termodinâmica, permanece hoje ainda por explicar ... Einstein explicitou de forma clara esse problema quando, poucos meses antes de ele próprio morrer, tomou conhecimento da morte do seu amigo Michele Besso. Escreveu então à viúva uma frase que ficou famosa [12]:

“... para nós, que acreditamos na física, a separação entre passado, presente e futuro é apenas uma ilusão, ainda que persistente.”

É essa ilusão que os físicos, e não só, persistem em conhecer melhor.

Bibliografia

- [1] S. Hawking, *Breve história do tempo. Do Big Bang aos Buracos Negros*, Gradiva, Lisboa, 1ª edição, 1988.
- [2] S. Hawking e L. Mlodinow, *Uma nova história do tempo*, Ediouro, Rio de Janeiro, 2005.
- [3] S. Drake, *Galileo, Dom Quixote*, Lisboa, 2ª edição, 1081.
- [4] J.-P. Maury, *Newton e a mecânica celeste*, Civilização e Círculo de Leitores, Lisboa, 1992.
- [5] S. Hawking (coord.), *On the shoulders of giants. The great works of Physics and Astronomy*, Runnig Press, Philadelphia e Londres, 2002. Está a ser preparada uma tradução portuguesa, a publicar pela Dom Quixote.
- [6] J. Güemez, C. Fiolhais e M. Fiolhais, *Fundamentos de termodinâmica do equilíbrio*. Fundação Gulbenkian, Lisboa, 1988.
- [7] A. Pais, *Subtil é o Senhor. Vida e Pensamento de Albert Einstein*, Gradiva, Lisboa, 2ª edição, 2004.
- [8] C. Fiolhais et al., *F12*, Texto Editores, Lisboa, 2005.
- [9] M. Kaku, *O Cosmos de Einstein*, Gradiva, Lisboa, 2005
- [10] C. Fiolhais (coord.), *Einstein entre nós*, Imprensa da Universidade, Coimbra, 2005.
- [11] O. Bertolami, *O livro das escolhas cósmicas*, Gradiva, Lisboa, 2006.
- [12] A. Calaprice (coord.), *The new quotable Einstein*, Princeton, University Press, Princeton, 2005.

Carlos Fiolhais

Centro de Física Computacional e Dep. de Física da Universidade de Coimbra