



G.J. Whitrow

O que é tempo?

Uma visão clássica sobre
a natureza do tempo

Jorge ZAHAR Editor

G.J. WHITROW

O que é tempo?

Uma visão clássica sobre
a natureza do tempo

Com introdução de J.T. Fraser
e ensaio bibliográfico de J.T. Fraser e M.P. Soulsby

Tradução:
Maria Ignez Duque Estrada



Para Magda

Sumário

Introdução: “Sobre os ombros de gigantes”, por J.T. Fraser
Advertência

1 A ORIGEM DA NOSSA IDÉIA DE TEMPO

2 O TEMPO E NÓS

3 RELÓGIOS BIOLÓGICOS

Navegação animal

O estímulo da luz do dia

O ciclo do ano

Relógios-mestres

4 A MEDIDA DO TEMPO

Tempo preciso

Perda de calor e radioatividade

Escala de tempo

5 TEMPO E RELATIVIDADE

Relógios parados e relógios em movimento

Tempo relativista e tempo relativo

6 TEMPO, GRAVITAÇÃO E O UNIVERSO

Espaço-tempo

Einstein e a gravitação

Um tempo universal cósmico?
Horizontes de tempo
Cosmologia e escalas de tempo

7 A ORIGEM E A FLECHA DO TEMPO

A flecha termodinâmica
As três flechas do tempo

8 O SIGNIFICADO DE TEMPO

Átomos do tempo
Pré-cognição e a natureza do tempo
A natureza transitória do tempo

Apêndice: Ordem temporal na relatividade especial

A literatura do tempo, J.T. Fraser e M.P. Soulsby

Índice remissivo

Introdução

“Sobre os ombros de gigantes”

J.T. FRASER

Em 5 de fevereiro de 1676, no curso de sua correspondência com Robert Hooke a respeito da natureza da luz, Newton redigiu uma carta para seu colega físico.

Você valoriza excessivamente minha capacidade de pesquisa sobre esse assunto. Descartes deu um grande passo. E você acrescentou muito, de diversas formas, especialmente quando considerou as cores das placas finas em termos filosóficos. Se consigo ver mais longe é por estar sobre os ombros de gigantes.¹

Na época de Newton esse aforismo tinha mais de cinco séculos. Ao que parece, originou-se dos escritos de Bernardo de Chartres, filósofo humanista do início do século XII. Ao longo da história do Ocidente, era após era, ele permaneceu se refletindo e refratando no discurso intelectual, tomando formas ligeiramente diferentes. Representava o reconhecimento da natureza cumulativa do saber humano. Um estudante aplicado poderia retrazar a história do início da humanidade a partir da primeira criança que quis ser erguida nos ombros do pai porque dali, e somente dali, podia ver o belo passarinho no arbusto distante.²

A dimensão temporal do mundo, conforme percebida por nossos ancestrais mais remotos, deve ter-se assemelhado à percepção do tempo de seus antepassados imediatos, os primatas. Imagino que esses seres humanos peludos fossem capazes de se preparar para os aspectos cíclicos e portanto previsíveis do seu futuro próximo; mas, para conhecer todas as

contingências, dispunham apenas das capacidades que a seleção natural imprimira em sua condição biológica. Imagino também que, à medida que suas respostas às contingências aumentaram, que os horizontes temporais de sua realidade se expandiram, eles adquiriram uma certeza sobre o fim inevitável de si mesmos. Passaram a preocupar-se com a sobrevivência após a morte e, com essa inquietação, tornaram-se completamente humanos.

Então seguiu-se uma imensa viagem, uma abertura aos horizontes espaciais e temporais de seu cosmo. Junto com essa viagem, 24 séculos atrás nasceu uma forma de especulação disciplinada chamada filosofia. Milênios depois, muitos dos primeiros filósofos foram considerados praticantes da filosofia natural, pois seus conhecimentos baseavam-se na observação e no exame da natureza.

“A história da filosofia natural”, escreveu G.J. Whitrow em seu magistral livro *The Natural Philosophy of Time*, “caracteriza-se pela interação de dois pontos de vista opostos que podem ser convenientemente associados aos nomes de Arquimedes e Aristóteles, os gigantes intelectuais da Antigüidade cujos escritos tiveram importância decisiva para os criadores da ciência moderna no final da Idade Média e na Renascença.” Arquimedes, continuava Whitrow, é o protótipo dos pensadores que acreditavam não ser a passagem do tempo uma base intrínseca e suprema das coisas, enquanto Aristóteles é o precursor daqueles que consideram o tempo fundamental para o Universo.³

De acordo com o aforismo de Bernardo de Chartres sobre o conhecimento, as idéias acerca da natureza do tempo também se refletiram e refrataram ao longo da história. Nasceram e morreram, foram formuladas, reformuladas e moldadas segundo cada cultura, religião, filosofia, ciência, arte e pessoa. Em suas várias formas, elas serviram de modelos da experiência humana na presença e em contraste com a fantasia da vida eterna.

A experiência humana do tempo é penetrante, íntima e imediata. A vida, a morte e o tempo combinam-se de uma forma intrincada e intrigante, difícil de ser esclarecida, porém reconhecida em todas as grandes filosofias e religiões. O tempo é um componente de todas as formas de conhecimento humano, de todos os modos de expressão, e está associado às funções da mente. É também um aspecto fundamental do Universo. Ocorre que

nenhuma faculdade de conhecimento isolada, por si só, é capaz de explicar a natureza do tempo. A conseqüente intensidade de interesse e argumentação em torno desse aspecto é compreensível.

Ao longo de sua estranha e memorável história, usando a inteligência, a perseverança e a crueldade, e empregando seus conhecimentos do tempo como uma arma, as criaturas que enterraram seus mortos e se preocuparam com a vida após a morte fizeram da terra inteira a sua casa. No século XXI tornaram essa casa um laboratório global onde fazem experiências com a compactação do tempo na vida de pessoas, nações e culturas. A compactação do tempo comunica-se a cada uma e a todas as facetas da vida pessoal e coletiva. Faz parte da formulação de princípios de conduta e juízos de valor, e estabelece o tom com que dizemos e fazemos as coisas. Insinua-se em todas as indagações, seculares e espirituais, e amplia as crises culturais, socioeconômicas, ecológicas e ideológicas.

Diante dessas crises, todos os ensinamentos anteriores sobre a posição do homem no Universo e todas as idéias anteriores sobre a natureza do tempo passaram a ser questionadas. As várias formas de relação entre tempo, homem, animal e matéria também foram reexaminadas. Realizaram-se inúmeras conferências, publicaram-se diversos livros e trabalhos cobrindo todo o espectro do conhecimento abstrato e aplicado. A fértil heterogeneidade das idéias e a intensidade dos debates sugerem que a filosofia natural do tempo é uma estrutura adequada à observação da imensidão do conhecimento contemporâneo.

Na sua forma madura, a filosofia natural do tempo deve oferecer uma estrutura intelectual coerente que respeite e acomode as muitas e diferentes formas de pensar, de comprovar a verdade e de formular leis — formas julgadas necessárias pelas disciplinas que contribuem para a elaboração dessa estrutura. A filosofia natural do tempo está exatamente nesse processo: ela desenvolve um vocabulário de conceitos e um corpo de princípios que lhe permite lidar com o tempo sentido e com o tempo compreendido, e também com os vários elementos de passagem e permanência dos seres humanos, dos animais e da matéria.

A grande realização de Whitrow foi combinar conhecimento e coragem intelectual para tratar, em uma obra — *A filosofia natural do tempo* —, de todos os detalhes dos vários domínios das humanidades e das ciências, a seu ver necessários a um estudo inter-disciplinar do tempo.

Da mesma forma que *A filosofia natural do tempo*, este livro segue a máxima de Heráclito de que “os homens que amam a sabedoria devem ter conhecimento de muitas coisas diferentes”.⁴ Ela reconhece que nossa compreensão sobre a natureza do tempo permanece parcialmente obscura até que aprendamos a nos beneficiar da contribuição de todas as formas de conhecimento, seja ele racional, introspectivo ou experimental.

Esse tipo de investigação não é uma tarefa pequena, uma vez que atualmente os especialistas de diferentes áreas de conhecimento ocupam ilhas separadas e que os habitantes dessas ilhas não vivem, por assim dizer, em bons termos. Além dos problemas causados por seus diferentes jargões e critérios de valor, a separação e a alienação são agravadas pelo fato de que as indagações sobre a natureza do tempo nunca são emocionalmente neutras. Os debates em torno do tempo tendem a se tornar paroquiais e estreitamente dogmáticos. A razão disso é que o pensamento a respeito do tempo mobiliza os conflitos entre nossa certeza de sua passagem e a fantasia sobre a vida eterna. Nesse tumulto, além das equações de campo e de onda, além da evolução por seleção natural, além da psicologia e da sociologia, artes, letras e religiões, a passagem do tempo permanece sempre um mistério racional enraizado na incompletude da natureza.

Em comparação aos outros escritos de Whitrow sobre o tempo e ao extenso corpo de obras de outros autores — cuja bibliografia o apêndice deste livro é só uma breve amostra —, quais são os méritos de *O que é tempo?*.

Este modesto livro possui uma extraordinária clareza em sua exposição. Ele é entusiasmante quanto à meticulosa confiabilidade de seu material. Além disso, ao contrário de muitas obras populares sobre o tempo, não é promocional: não nos propõe acreditar nem desacreditar no Todo-Poderoso. Poucos são os autores que, como Whitrow, souberam combinar a erudição humanística substancial com o sólido domínio do pensamento científico claro e, apelando para isso, puderam lidar com as várias formas que os seres humanos empregam nas negociações entre si e com o meio ambiente.

O modo de realizar a ambiciosa tarefa concebida por G.J. Whitrow é entrar em um clima intelectual no qual a criatividade comum a todo conhecimento possa florescer, e os aspectos da realidade, compreendidos separadamente, permitam que se produza um corpo integrado de

compreensão — interagindo por meio da idéia de tempo. É uma tarefa difícil. Mas as dificuldades nunca impediram que os sábios e os cientistas perseguissem seus objetivos de visões unificadas e estruturadas. Eles descobriram isso nos campos do intelecto e da cultura, assim como — nas palavras do poeta Robert Frost —, no campo de New Hampshire: “boas cercas, façam bons vizinhos”.⁵

Existe ali alguma coisa que não aceita paredes
Que faz o chão congelado sob elas inchar,
E espalhar os pedregulhos ao sol.

¹ Turnbull, H.W. (org.). *The Correspondance of Isaac Newton*, vol.1, Cambridge University Press, 1959, p.416. Cortesia da Biblioteca Burndy, Instituto Dibner para a História da Ciência e Tecnologia, Cambridge, MA.

² Para a divertida e espantosa história desse aforisma — sem incluir a criança nos ombros do pai —, ver *On the Shoulders of Giants*, de Robert K. Merton, San Diego, Harcourt Brace Jovanovich, 1965.

³ Whitrow, G.J., *The Natural Philosophy of Time*, 2ª ed., Oxford, Clarendon Press, 1980, p.1.

⁴ “On the Universe” de Heráclito, fragmento XLIX, in *Hippocrates-Heracleitus on the Universe*, vol.4, trad. W.H. Jones, Loeb Classical Library, Harvard University Press Cambridge, MA, 1992, p. 487.

⁵ “Mending Wall”, *The Poetry of Robert Frost*, Nova York, Holt, Rinehart & Winston, 1969, p.33.

Advertência

No final de 1969 fiz quatro palestras no *Third Programme* da BBC sobre a natureza do tempo. Elas foram publicadas na *Listener* em janeiro de 1970. Este livro é uma versão consideravelmente ampliada dessas palestras.

Aproveito a oportunidade para agradecer a Christopher Sykes, que organizou as palestras e fez a edição do primeiro rascunho dos roteiros; a meu produtor Daniel Snowman e também a Thomas Neurath, que me estimulou a escrever este livro. Como sempre, tenho uma grande dívida com minha esposa Magda Whitrow por seus comentários críticos e pela compilação do índice. Gostaria também de agradecer a Jane Galletti pela primorosa e cuidadosa datilografia do manuscrito.

G.J.W.

Setembro de 1971

A Origem da Nossa Idéia de Tempo

Conta-se que o poeta russo Samuel Marshak, quando esteve em Londres pela primeira vez, antes de 1914, e não conhecia bem o idioma inglês, perguntou a um homem na rua: “Por favor, o que é o tempo?” O homem olhou-o muito surpreso e respondeu: “Mas essa é uma questão filosófica. Por que está perguntando para mim?” Muitos séculos atrás, um famoso padre preocupou-se com a mesma indagação e confessou que, se ninguém perguntasse, ele sabia o que era tempo, mas se tentasse explicar teria de admitir que não sabia. Embora haja muitas idéias importantes com as quais a maior parte das pessoas concorda sem entender, só o tempo tem essa qualidade peculiar de nos fazer sentir por intuição que o compreendemos perfeitamente, desde que ninguém nos peça para explicá-lo.

O objetivo deste livro é discutir a natureza do tempo sob vários pontos de vista. A primeira questão é a origem da idéia de que o tempo é uma espécie de progressão linear medida pelo relógio e pelo calendário. Na civilização moderna, esse conceito de tempo domina de tal forma a nossa vida que parece ser uma necessidade inevitável de pensamento. Mas isso está longe de ser verdade. Não só as culturas primitivas têm uma idéia muito vaga sobre relógios e calendários como a maioria das civilizações anteriores à nossa, nos últimos 200 a 300 anos, tendia a considerar o tempo essencialmente cíclico na natureza. À luz da história, nossa concepção de tempo é tão excepcional quanto nossa rejeição ao mágico.

Embora nossa idéia de tempo seja uma das características peculiares do mundo moderno, a importância que damos a ele não é inteiramente desprovida de precedente cultural. Nem tampouco o presente calendário gregoriano — assim chamado em homenagem ao papa Gregório XIII, que o introduziu em março de 1582 — é o mais preciso de todas as civilizações. Nosso calendário muito sofisticado não é tão exato quanto

aquele criado, há mais de mil anos, pelos sacerdotes maias da América Central. O ano gregoriano é um tanto longo demais, e o erro chega a três dias em dez mil anos. A duração do ano dos astrônomos maias era pequena demais, mas o erro era de apenas *dois* dias em dez mil anos.

De todos os povos que conhecemos, os maias eram os mais obcecados pela idéia de tempo. Enquanto na Antigüidade européia considerava-se que os dias da semana eram influenciados pelos principais corpos celestes — *Saturn-day, Sun-day, Moon-day* (dia de Saturno, dia do Sol, dia da Lua e assim por diante) —, para os maias cada dia era por si só divino. Todos os monumentos e altares eram erigidos para marcar a passagem do tempo, nenhum glorificava governantes ou conquistadores. Os maias viam as divisões do tempo como cargas transportadas por uma hierarquia de portadores divinos que personificavam os números pelos quais os vários períodos — dias, meses, anos, décadas e séculos — se distinguiam.

Apesar dessa constante preocupação com os fenômenos temporais e da incrível exatidão de seu calendário, os maias nunca chegaram à idéia de tempo como a jornada de um portador com a sua carga. Seu conceito de tempo era mágico e politeísta. Embora a estrada na qual os portadores divinos caminhassem em revezamento não tivesse começo nem fim, os eventos ocorriam em um círculo representado por períodos recorrentes de serviço a cada deus na sucessão dos portadores. Dias, meses, anos, e assim por diante, eram membros dos grupos que caminhavam em revezamento pela eternidade. A carga de cada deus era o presságio para o intervalo de tempo em questão. Num ano a carga podia ser a seca, no outro, uma boa colheita. Pelo cálculo dos deuses que estariam caminhando juntos em um determinado dia, os sacerdotes podiam determinar a influência combinada de todos os caminhantes, e assim prever o destino da humanidade.

A hierarquia dos ciclos de cada divisão de tempo levou os maias a dedicar mais atenção ao passado que ao futuro. Esperava-se que a história se repetisse em ciclos de 260 anos, e que os eventos significativos tendessem a seguir um padrão geral pré-ordenado. Por exemplo, a religião cristã introduzida pelos espanhóis era identificada com a adoração de um culto alienígena imposto aos maias vários séculos antes. Os eventos passados, presentes e futuros mesclavam-se, na visão global dos maias, porque resultavam da mesma carga divina do ciclo de 260 anos.

Para nós, essa confusão de passado, presente e futuro entre um povo altamente inteligente, que criou um sofisticado estudo matemático do tempo astronômico, parece muito estranha, especialmente porque hoje temos grandes evidências de que a percepção dessas distinções temporais é uma das faculdades mentais mais importantes a distinguir o homem das outras criaturas vivas. Ao que parece, todos os animais, exceto o homem, vivem em um presente contínuo. Os exemplos em contrário que se podem citar não sobrevivem à investigação crítica. Os cachorros muitas vezes manifestam poder de memória quando, ao verem seus donos após uma longa separação, dão vazão a uma grande alegria, mas isso não indica necessariamente que eles tenham alguma imagem do passado. Da mesma forma, não há qualquer evidência sólida de que o animal tenha um sentido de futuro. Experiências analisadas com cuidado mostraram que, mesmo no caso dos animais mais inteligentes, como os chimpanzés, ações que se poderiam considerar resultantes da idéia de tempo são na verdade puramente instintivas.

No caso do homem, a idéia da distinção entre passado, presente e futuro deve ter sido o resultado de uma reflexão consciente sobre a situação humana. A tensão mental e emocional resultante da descoberta do homem de que toda criatura viva nasce e morre, incluindo ele próprio, deve tê-lo levado a buscar intuitivamente alguma forma de escape do inexorável fluxo do tempo. Há evidência de que mesmo o homem de Neanderthal, precursor do *Homo sapiens*, enterrava seus mortos e talvez até enterrasse junto aos corpos aquilo de que eles possivelmente precisariam no futuro. Quanto à nossa própria espécie, a evidência mais antiga, de aproximadamente 35 mil a.C., revela que o ritual de sepultamento já era um costume estabelecido. Os mortos não só eram enterrados com armas, ferramentas e ornamentos, mas também com comida, que muitas vezes fazia falta aos vivos. Em alguns túmulos encontrados, o corpo estava coberto com um pigmento vermelho, sem dúvida uma tentativa mágica de dotar o morto com a cor sanguínea da vida, na esperança de evitar sua extinção física. Em geral enterrava-se o corpo agachado, talvez inspirando-se na idéia de que o morto estava sendo colocado no ventre da Mãe Terra para um renascimento futuro. Essa explicação do sepultamento de nossos ancestrais remotos é questionável, mas pode ser uma indicação das origens da concepção cíclica da vida.

O homem deve ter feito um esforço enorme para superar sua tendência natural a viver como os animais em um presente contínuo. Pelo que sabemos sobre as raças primitivas sobreviventes, há grande evidência disso. Por exemplo, embora os filhos dos aborígenes australianos tenham capacidade mental semelhante à das crianças brancas, eles têm grande dificuldade de ver a hora no relógio. Podem aprender a posição dos ponteiros como um exercício de memória, mas não conseguem relacioná-los à hora do dia. Há uma lacuna que eles têm dificuldade de preencher entre sua concepção de tempo e a da civilização industrial moderna. É significativo o fato de Rousseau, que exaltava o bom selvagem, ter detestado o tempo e jogado fora o relógio. Um fator vital da intuição do homem primitivo era seu sentido de ritmo. Esse sentido altamente desenvolvido permitia que a tribo funcionasse com precisão como uma unidade na guerra e na caça. Assim como a periodicidade do mundo natural, o homem também sente o tempo na periodicidade da própria vida. As principais transições de uma fase para outra eram consideradas crises, e em consequência disso a comunidade à qual ele pertencia ajudava-o com os rituais apropriados. Da mesma forma, as principais transições da natureza eram vistas também como acontecimentos repentinos e dramáticos. Com a mudança de uma vida pastoral e nômade para uma forma de existência agrícola e mais organizada, a importância dos fenômenos cíclicos da natureza deve ter sido enormemente realçada. A natureza foi vista como um processo de luta entre os poderes cósmicos divinos e os poderes caóticos demoníacos no qual o homem não era mais um mero espectador, mas estava obrigado a tomar parte ativa para ajudar a realizar os fenômenos necessários, atuando em completo uníssono com a natureza.

Isso significou a criação de um conjunto de rituais. Por mais de dois mil anos, até os tempos helênicos, os babilônios faziam uma festa de vários dias para celebrar o Ano-Novo, que ocorria por volta do equinócio da primavera. A história da criação era encenada e até mesmo se travava uma falsa batalha, com o rei personificando o deus vitorioso. No Egito, onde tudo dependia do Nilo, a coroação de um novo faraó era programada para coincidir com a subida do rio, no início do verão, ou com o recuo das águas, no outono, quando os campos fertilizados estavam prontos para serem semeados.

O épico da criação recitado liturgicamente pelo chefe dos sacerdotes da antiga Babilônia não era considerado um registro *do passado*. Servia a um

propósito teológico-político de assegurar a supremacia do deus Marduk *no presente*. Pois Marduk, embora não fosse o mais antigo dos reis, era a divindade específica associada à Babilônia, e seu domínio sobre os outros deuses tinha a intenção de justificar a supremacia política adquirida por essa cidade.

A preocupação histórica dos egípcios não era maior que a dos antigos mesopotâmicos. Mas, sob um aspecto, eles deram uma notável contribuição à ciência do tempo: arquitetaram o que Otto Neugebauer descreveu como “o único calendário inteligente da história da humanidade”. O ano deles era constituído de 12 meses, com 30 dias cada, e cinco dias adicionais no final do ano. Acredita-se que ele tenha se originado de bases puramente práticas, pela observação contínua, para determinar a média dos intervalos entre as sucessivas enchentes do Nilo no Cairo.

Apesar do exemplo egípcio, os primeiros calendários tendiam a associar-se basicamente à religião, pois era importante que festividades e sacrifícios fossem celebrados em datas fixas. Por que Deus se preocuparia exatamente com a data da celebração da Páscoa? Como ocorria na Babilônia, o rei-sacerdote era a encarnação do deus celeste invisível, e os rituais realizados por ele eram a repetição das ações divinas e tinham de corresponder exatamente em tempo e caráter aos rituais celestes. A partir dessa idéia primitiva, podemos ver a importância da celebração da Páscoa na data correta, pois era o tempo crucial do combate entre Deus (ou Cristo) e o demônio, e Deus solicitava o apoio de seus adoradores para derrotar o demônio.

A importância das influências celestes sobre as concepções de tempo e a invenção do calendário têm origem nos caldeus, ou babilônios tardios. Sua astrologia baseava-se na proposição fundamental de que todos os eventos da Terra eram influenciados pelas estrelas. Em particular, podemos atribuir a eles, através dos hebreus, a origem de nossa atual semana de sete dias associada ao Sol, à Lua e aos cinco planetas que descobriram. (A separação entre esses planetas e as chamadas “estrelas fixas” foi uma de suas grandes realizações.)

A semana planetária apresenta uma estranha combinação de idéias de diferentes culturas. Da Babilônia veio a doutrina da influência das estrelas sobre o destino dos homens; dos gregos alexandrinos veio a astronomia matemática, que colocava os planetas em uma certa ordem de distância da

Terra; e sobre esses fundamentos os últimos astrólogos helênicos, conhecedores do antigo culto ao mágico número sete, construíram uma semana puramente pagã. No final do século III d.C., os cristãos, anteriormente ligados à semana judaica de sete dias, na qual os dias não tinham nomes, mas apenas números, começaram a ser influenciados pelas crenças astrológicas dos pagãos convertidos e mudaram para a semana planetária. As estrelas não eram mais vistas como divindades, mas como demônios capazes de afetar o destino humano. Ao mesmo tempo, a adoração oriental ao deus-sol Mithra foi extremamente influente no mundo romano. Isso levou os pagãos a substituir o *dies Solis* (*Sun-day*, em português, “dia do Sol”) pelo *dies Saturnis* (*Saturn-day*, em português, “dia de Saturno”) como o primeiro dia da semana. Essa mudança agradou aos cristãos, que há muito tempo consideravam o domingo — o dia do Senhor (*dies Dominica*), quando Cristo ressuscitou dos mortos — o primeiro dia da semana, em lugar do Sabá judaico. Aliás, a primeira norma a respeito do domingo parece ter sido criada por um decreto do imperador Constantino, em 321 d.C., segundo o qual magistrados, cidadãos e artesãos deviam descansar do trabalho “no venerável dia do Sol”. Nesse mesmo século IV o Natal foi indicado para o dia 25 de dezembro porque todo ano, nessa data, era celebrado o nascimento do Sol para uma nova vida após o solstício de inverno. A Páscoa, por ser originariamente uma festividade lunar (ocorrendo no dia da lua cheia ou logo depois), manteve data variável.

A influência do cristianismo sobre nosso conceito moderno de tempo não se restringe aos detalhes do calendário. Ela foi bem mais fundamental que isso. Considerou-se a doutrina central da Crucificação um evento único no tempo, não sujeito a repetição, implicando assim que o tempo deve ser linear, e não cíclico. A crença no modelo cíclico de tempo era um aspecto comum a várias culturas antigas, e caracterizava em particular as idéias cosmológicas gregas, sobretudo na época helênica. Encontrou sua apoteose na idéia do “Grande Ano”, vividamente descrita por Nemésio, bispo de Emesa, no século IV:

Os estóicos dizem que quando os planetas voltam, em determinados períodos fixos de tempo, às mesmas posições relativas que tinham no início da formação do cosmo, há conflagração e destruição de tudo o que existe. Então o cosmo é restaurado de novo em um arranjo precisamente similar ao anterior. As estrelas movimentam-se de novo em suas órbitas, cada uma com a mesma revolução do período anterior, sem variação.

Segundo Nemésio, os estóicos acreditavam até mesmo que

... Sócrates, Platão e todos os homens viverão de novo, com os mesmos amigos e compatriotas. Terão as mesmas experiências e as mesmas atividades. Todas as cidades, vilas e campos serão restaurados, exatamente como eram. E essa restauração do Universo ocorrerá não uma vez, mas várias — na verdade por toda a eternidade, sem cessar. Os deuses que não são sujeitos à destruição, ao observarem o curso de um período, sabem de tudo o que irá acontecer nos períodos subsequentes. Pois nunca haverá coisa alguma nova a não ser aquela que existiu antes, nos mínimos detalhes.

Antes da ascensão do cristianismo, com exceção de alguns escritores isolados, como Sêneca, só os hebreus e os iranianos zoroástricos parecem ter considerado a história progressiva, e não cíclica. A escatologia dos primeiros profetas hebreus era sem dúvida altamente influenciada pelo destino de Israel como Estado depois de ter sido conquistado pelos babilônicos; só o futuro prometia o bem-estar da comunidade dos fiéis israelitas. Em suma, o objetivo essencial do Deus judaico na história era a salvação de Israel. O livro-chave do Antigo Testamento em termos do nosso propósito presente, porém, foi escrito depois, sob a tensão do medo dos selêucidas, pouco antes da ascensão dos macabeus: o *Livro de Daniel*, em que a história foi apresentada, à guisa de profecia, como um processo unificado, conformado a um plano divino de significação teológica.

A religião que mais competiu com o cristianismo nos primeiros séculos da era cristã preocupava-se também com o significado do tempo. O mitraísmo — que teve muitos dos seus aspectos absorvidos pelo cristianismo — derivava da forma herética do zoroastrismo conhecido como Zurvan. Para os membros dessa seita, o tempo (Zurvan) era a fonte de todas as coisas e pai dos espíritos gêmeos do bem e do mal, Ohrmazd e Ahriman, básicos no dualismo original do início do zoroastrismo. Havia uma distinção entre *Zurvan akarana* (tempo infinito) e o “Tempo do Longo Domínio” (tempo finito). O último, com duração de 12 mil anos (o número 12 associado aos 12 signos do Zodíaco), era o período de luta entre os espíritos do bem e do mal. Na verdade, toda a *raison d’être* do tempo finito parece ter sido criar esse conflito do bem e do mal que leva ao triunfo supremo do bem. Embora se concebesse o tempo finito movendo-se dentro de um círculo, esse movimento circular não era considerado eterno. A teoria iraniana de tempo, portanto, tinha pouca ou nenhuma afinidade com as especulações *Aion* (a eternidade repetindo-se perpetuamente, ver p.26) do mundo helênico ou as recorrentes *Kalpas* (ciclos sucessivos) dos hindus. Em um dado momento finito, o tempo começa a existir a partir de um tempo infinito, move-se em círculo até voltar ao seu início e depois funde-

se no tempo infinito — isto é, ausência de tempo. Esse processo nunca é renovado.

A visão cristã de tempo é mais linear e mais livre das concepções cíclicas até mesmo que o zoroastrismo e o hebraísmo. Pois a ênfase na não-repetição dos eventos era a própria essência do cristianismo. O contraste com a visão hebraica é visto claramente na *Epístola aos hebreus*, capítulo 9, versículos 25 e 26: “E não entrou para oferecer muitas vezes a si mesmo, como o pontífice entra todos os anos no Santo dos Santos com sangue alheio; de outra maneira ser-lhe-ia necessário padecer muitas vezes desde o princípio do mundo; mas apareceu uma só vez no fim dos séculos para destruir o pecado com o sacrifício de si mesmo.” É bem verdade que a idéia de denominar os anos por uma única contagem de eras fora adotada pelos gregos no século III a.C., quando o historiador Timeu introduziu o esquema de datação pelas Olimpíadas a partir de 776 a.C. Mas, na era cristã, a seqüência d.C só foi adotada no ano 525. E a seqüência a.C., estendendo-se pelo período anterior ao nascimento de Cristo, só foi introduzida no século VII. Isso porque, na Europa medieval, e também na Antigüidade, o tempo não era concebido como uma variável contínua, mas dividido em várias estações, divisões do Zodíaco e assim por diante, cada uma exercendo sua influência específica. Em outras palavras, o tempo mágico ainda não tinha sido sucedido pelo tempo científico.

Ao longo de todo o período medieval, os conceitos de tempo cíclico e linear existiram em conflito. Os cientistas e eruditos, influenciados pela astronomia e pela astrologia, tendiam a enfatizar o conceito cíclico. A concepção linear era promovida pela classe mercantil e pela ascensão de uma economia monetária. Pois enquanto o poder se concentrava na propriedade da terra, o tempo era considerado abundante e associado ao ciclo imutável do solo. Mas com a circulação da moeda deu-se ênfase à mobilidade. O ritmo de vida aumentou, e o tempo passou a ser considerado algo valioso que parecia escapar continuamente; depois do século XIV, os relógios públicos das cidades italianas batiam as 24 horas do dia. Os homens começavam a acreditar que “tempo é dinheiro” e que deviam tentar usá-lo de forma econômica.

Uma das conseqüências culturais mais importantes da nova atitude do homem com relação ao tempo no final da Idade Média e na Renascença foi seu efeito sobre as artes plásticas, quando a pintura *a secco* substituiu a

pintura *a fresco*. O longo aprendizado dos alunos antes de se tornarem hábeis na pintura *a fresco* não podia ser mantido quando as mudanças e pressões sociais estimulavam o desejo de velocidade. Enquanto, anteriormente, um artesão podia demorar a executar sua obra, o pintor que tinha subido na escala social e adquirido novo prestígio devia trabalhar depressa para se desincumbir de todas as encomendas recebidas. Mesmo o exemplo de Michelangelo foi em vão. De início se planejava que *O juízo final* na Capela Sistina seria pintado *a secco* a óleo, mas Michelangelo objetou que a pintura a óleo “só servia para mulheres e gente relaxada”, e executou o trabalho *a fresco*. Mas isso contrariava a corrente da época, e a arte gloriosa do verdadeiro afresco morreu, sua prática mostrou-se incompatível com a nova atitude social com relação ao tempo.

Em um ensaio fascinante¹ sobre a iconologia de “O Pai Tempo”, o celebrado historiador da arte Erwin Panofsky chamou a atenção para o contraste entre as representações simbólicas do tempo na arte clássica — como uma oportunidade fugaz (*Kairos*) ou uma eternidade criativa (*Aion*) — e a típica imagem renascentista do tempo como destruidor, equipado com uma ampulheta, alfanje ou foice. Nenhuma época, argumenta ele, foi tão obcecada com o horror e a sublimidade do tempo quanto o Barroco, “período em que o homem se confrontou com o infinito como uma qualidade do Universo, e não como uma prerrogativa de Deus”. Essa obsessão com o aspecto destrutivo do tempo pode ser vista em Shakespeare, especialmente nos sonetos e no *Rapto de Lucrecia*, como lemos na estrofe 133:

Agourento Tempo, companheiro da Noite tenebrosa,
Velo e ardiloso mensageiro, portador de terrível inquietude,
Devorador da juventude, falso escravo de falsos deleites,
Sentinela vil do infortúnio, montaria do pecado, armadilha da virtude,
Tu embalas a todos e a todos assassinas,
Ó, ouve-me então, Tempo infamante e volúvel!
Culpado és da minha morte, depois do meu crime.

A obsessão intelectual com o tempo dominou o pensamento de Edmund Spenser, contemporâneo de Shakespeare. Um exemplo fantástico dessa influência é sua ode ao casamento, *Epithalamion*. Há algumas décadas, em uma obra-prima de descoberta literária,² um professor norte-americano, Kent Hiatt, mostrou que esse poema famoso é um tecido de simbolismo sobre o tempo no qual o movimento do Sol durante o dia e o ano está

detalhadamente indicado. Não só as 24 estrofes representam o número de horas do dia como as linhas longas são equivalentes simbólicas da duração do tempo, e as linhas curtas, da divisão do tempo. Ele assinalou que o número total de linhas longas é de 365, o número de dias do ano. Outros totais de linhas imitam o aparente movimento do Sol ao longo do ano com relação a estrelas “fixas”. O poema foi escrito para celebrar o aniversário de casamento do próprio Spenser, ocorrido no sul da Irlanda no meio do verão. Na época, naquela latitude, o número de horas de luz do dia era de cerca de 16 e três quartos. Isso é indicado no poema por uma mudança do refrão, na estrofe 17, quando cai a noite.

Em Spenser encontramos os conceitos de ciclo linear e tempo cíclico a disputar entre si. Por um lado, a idéia de tempo era dominada pela figura da eterna roda da mudança — uma harmonia cíclica universal pela qual todas as coisas voltam para si mesmas e os seres temporais tornam-se permanentes pela constante regeneração. Mas, ao lado dessa idéia antiga, a convicção religiosa de Spenser levou-o a concluir que a mutabilidade não durará para sempre, dará lugar a uma perfeição verdadeiramente eterna quando o próprio tempo cessar:

Mas virá o tempo em que tudo será mudado
E daí em diante nada mais verá mudanças.

Com todo esse conhecimento, Spenser era uma figura essencialmente retrógrada e devia ser visto como um dos maiores expoentes das tradicionais idéias cíclicas com relação ao tempo. Os grandes líderes da revolução científica do século XVII também se preocupavam com as metáforas temporais e horológicas, mas com eles começou a prevalecer uma visão diferente. No início daquele século, Kepler rejeitou especificamente o antigo conceito mágico, quase animista, do Universo e declarou que este se assemelhava a um relógio; mais tarde a mesma analogia foi usada por Robert Boyle e outros. Na verdade, a invenção do relógio mecânico teve um papel central na formulação de um conceito mecanicista da natureza que dominou a filosofia natural de Descartes a Kelvin. Influência ainda maior foi atribuída ao relógio mecânico por Lewis Mumford, ao dizer que ele “dissociava o tempo dos acontecimentos humanos e ajudava a desenvolver a crença de um mundo independente da ciência”.

Quanto à influência do relógio mecânico sobre o conceito do tempo em si, um aspecto importante distingue esse tipo de marcador de tempo dos seus antecessores. Os modos mais antigos de reconhecimento do tempo eram em essência descontínuos. Pois em vez de depender de uma sucessão contínua de unidades temporais, envolviam apenas a repetição de um fenômeno concreto acontecendo dentro de uma unidade. Por exemplo, quando Homero, no livro 21 da *Ilíada*, faz um dos filhos de Príamo dizer para Aquiles: “Esta é a décima segunda madrugada desde que cheguei em Ílion.” Mesmo os relógios de sol, os relógios de areia e os relógios de água da Antigüidade eram mais ou menos irregulares em termos de funcionamento; só depois que o relógio de pêndulo foi inventado com sucesso por um cientista holandês, Christian Huygens, em meados do século XVII, o homem finalmente contou com um marcador de horas exato, mostrando a passagem contínua de anos a fio. Isso influenciou muito o conceito moderno de homogeneidade e continuidade do tempo.

Enquanto isso, ao longo daquele mesmo século, a ideologia cíclica começou a dar lugar ao novo conceito de progresso linear adotado em 1602 por Francis Bacon em um trabalho cujo título significativo, em latim, era *O nascimento masculino do tempo*. No entanto, até mesmo Newton havia aderido à visão cíclica e convenceu-se de que o mundo estava chegando ao fim. Acreditava que o cometa de 1680 quase tinha atingido a Terra, e nos seus comentários sobre *O livro das revelações* e o *Livro de Daniel*, não publicados durante sua vida, declarou que o fim do mundo não tardaria. Um exemplo particularmente incrível da sua filosofia cíclica é encontrado em uma carta sua para Henry Oldenburg, secretário da Sociedade Real, em dezembro de 1675:

Pois a natureza vive em perpétuo trabalho circulatório, extraindo fluidos de sólidos, coisas fixas de voláteis e voláteis de fixas, coisas tênues de grosseiras e grosseiras de tênues, coisas que sobem e se tornam as seivas terrestres superiores, os Rios e a Atmosfera; e em conseqüência outras que descem para compensar as anteriores. Quanto à Terra, talvez o Sol possa beber copiosamente esse Espírito para se manter brilhando, e não deixar os Planetas se afastarem dele.

O conceito de avanço linear, porém, foi defendido por Leibniz, Barrow e Locke, entre outros. No século XVIII, a nova visão avançada do tempo inspirou os filósofos do Iluminismo, que abandonaram a cronologia bíblica, a qual excluía automaticamente a possibilidade de lentos processos de transformação em imensos períodos de tempo.

A idéia da evolução cósmica que dominou o pensamento moderno pode ser atribuída a Descartes. Ao contrário de Newton, que usou sua teoria da gravitação para explicar como os movimentos orbitais dos planetas e satélites podem se manter, mas não como foram originados, Descartes defendeu a idéia de que originalmente o mundo era cheio de matéria distribuída da maneira mais uniforme possível, e esboçou qualitativamente uma teoria de formação sucessiva do Sol e dos planetas.

A idéia de Descartes do Universo evoluindo por processos naturais de separação e combinação foi a fonte de uma sucessão de teorias de evolução cósmica por parte de Swedenborg, Buffon e outros; mas o primeiro a aplicar as idéias de Newton aos problemas de cosmogonia foi Immanuel Kant, em sua *História universal e teoria dos céus*, publicada em 1755. Kant partiu da idéia de que no início toda matéria existia em estado gasoso e foi espalhada de forma mais ou menos uniforme pelo Universo. Consequentemente, admitiu, como vários outros a partir de então, que nós vivemos em um universo evolucionário ou em desenvolvimento, no sentido de que o passado é essencialmente mais simples que o presente.

Embora a idéia de evolução estivesse no ar, um dos obstáculos a se enfrentar era a convicção herdada de que o alcance do tempo passado era altamente limitado. O arcebispo Ussher, por volta de 1650, calculou que Deus tinha criado o mundo em um domingo, 23 de outubro de 4004 a.C. Este cálculo era de certa forma menos preciso do que parecia. O ano de 4004 a.C. foi encontrado pela estimativa de Lutero do ano 4000 a.C., obtido com o arredondamento de vários cálculos aritméticos da cronologia bíblica e corrigindo-a em quatro anos para permitir a datação de Kepler do nascimento de Cristo em 4 a.C., em razão de um erro de quatro anos que ele detectou na data da Crucificação, ao comparar a datação do Novo Testamento com a dos eclipses solares.

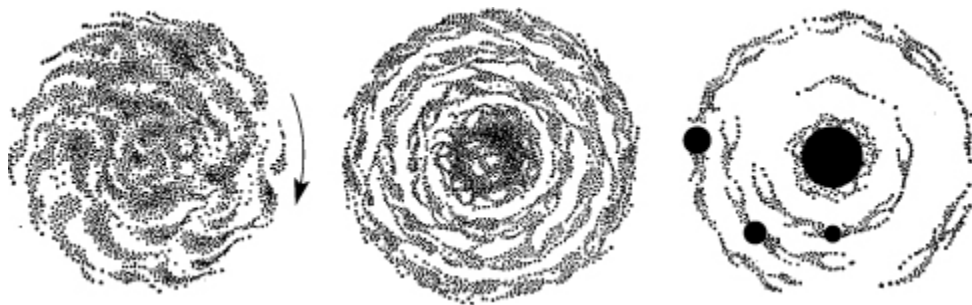


Figura 1: Teoria de Kant sobre a origem do sistema solar. Uma nuvem gigantesca de gás, contraindo-se sob sua própria gravitação, começa a girar e a acumular matéria no centro para formar os planetas, por contração gravitacional. A seu ver, o universo torna-se menos homogêneo com a passagem do tempo.

Ao longo do século XVIII os cientistas começaram a descartar a cronologia da natureza baseada na Bíblia. Em 1721 Montesquieu escreveu em *Cartas persas*: “Será possível que aqueles que compreendem a natureza e têm uma idéia razoável de Deus acreditem que a matéria e as coisas criadas têm apenas seis mil anos?” No meio do século, Diderot pensou em “milhões de anos”, e Kant sugeriu que o Universo devia ter centenas de milhões de anos.

Em 1788 o geólogo James Hutton, em *Theory of the Earth*, rejeitou os súbitos agentes catastróficos invocados previamente para explicar a estratificação das rochas, o depósito dos oceanos etc. Ele percebeu que a verdadeira abordagem científica não consistia em invocar essa hipótese *ad hoc*, mas testar se os mesmos agentes, tal como operam agora, poderiam ter atuado durante todo o passado. Na sua opinião, o mundo tinha evoluído e continua a evoluir (em certo ponto realmente comparou-o a um organismo). Concluiu que imensos períodos de tempo foram necessários para a Terra chegar a seu presente estado, e com seu estudo sobre rochas sedimentares e ígneas concluiu: “Não encontramos vestígio algum de começo — nenhuma previsão de fim.”

Embora durante o século XVIII tenha aumentado a importância da idéia de progresso histórico, os conceitos cíclicos de história tendiam a persistir. Na famosa *Scienza Nuova*, Vico baseou sua teoria de história na “lei de ciclos”. A visão linear do tempo como um progresso contínuo sem repetição cíclica finalmente prevaleceu por meio da influência dos evolucionistas do século XIX. Hoje, em um mundo dominado pela ciência ocidental — no qual até mesmo a vida diária é regulada

cronometricamente, não para comermos e dormirmos quando sentimos fome ou estamos cansados, mas quando somos avisados pelo relógio —, nosso conceito de tempo é um aspecto dominante de nossa visão de mundo. É compreensível que se suponha, de um modo geral, que ele seja intuitivamente óbvio. Mas, como vimos na história, isso está longe de ser verdade.

¹ E. Panofsky, *Studies in Iconology, Humanistic Themes in the Art of the Renaissance* (palestras de Mary Flexner, 1937), Oxford, 1939.

² A. Kent Hieatt, *Short Time's Endless Monument: the Symbolism of the Numbers in Edmund Spenser's "Ephthalamion"*, Nova York, 1960.

A importância cada vez maior da idéia de tempo que surgiu com a revolução científica do século XVII levou os filósofos a investigarem a natureza desse conceito e seu papel na nossa consciência pessoal dos fenômenos. A figura central no estudo dessas questões foi o filósofo Immanuel Kant, que chegou à conclusão de que o tempo é uma das formas da nossa “intuição”. Ou seja, o tempo não é uma característica dos objetos externos, e sim da mente subjetiva que deles tem consciência. Assim, Kant acreditava que a idéia do tempo linear científico era uma consequência automática do fato de sermos criaturas racionais. Mas já vimos que essa idéia só foi formulada explicitamente no século XVII, e que as civilizações anteriores tinham conceitos diferentes do tempo. A conclusão de Kant, portanto, não pode ser historicamente correta.

No final do século passado, mostrou-se que a teoria de Kant sobre o tempo era igualmente insatisfatória do ponto de vista psicológico. Em um ensaio famoso¹ sobre o desenvolvimento do nosso conceito de tempo, o psicólogo francês Guyau argumentou que o tempo não devia ser visto como condição anterior, e sim como consequência da nossa experiência do mundo, resultado de uma longa evolução. Segundo ele, no período da confusão mental primitiva, a sucessão de idéias na mente não fez surgir automaticamente a noção de sucessão. Guyau rejeitou a suposição ingênua de Herbert Spencer de que a idéia de tempo derivava de uma consciência primitiva da seqüência temporal, e que no estado primitivo o homem não tinha uma concepção clara da simultaneidade nem da sucessão. Ele sugeriu que a idéia de tempo surgiu quando o homem teve consciência de suas reações ao prazer e à dor, e da sucessão das sensações musculares associadas a essas reações. Argumentou que, enquanto as concepções espaciais do homem podiam ter-se originado no momento em que ele se

tornou plenamente consciente de seus movimentos e refletiu sobre eles, os conceitos temporais deviam remontar aos sentimentos de esforço e fadiga associados a esses movimentos.

Guyau propôs que a mente humana, mas aparentemente não a dos animais, tem o poder de construir a idéia de tempo a partir do reconhecimento, ou conscientização, de certos aspectos que caracterizam os dados da nossa experiência. Embora Kant não esclarecesse a origem desse poder, admitiu que era uma peculiaridade da mente humana. Nos últimos anos tornou-se claro que todas as capacidades mentais do homem são potenciais, e ele só pode desenvolvê-las na prática, aprendendo a usá-las. Enquanto os animais herdaram vários padrões particulares de consciência sensorial — conhecidos como “liberadores” porque iniciam automaticamente tipos específicos de ação —, o homem tem de aprender a construir todos esses padrões de consciência a partir de sua própria experiência. Segundo Kant, as idéias de espaço e de tempo funcionam como se fossem liberadores. Em vez disso, devem ser consideradas um aparato mental que temos de aprender a construir por nós mesmos.

Ao longo de vários anos muito esforço foi despendido para elucidar as bases fisiológicas e psicológicas da nossa consciência de tempo. Tradicionalmente, consideramos nosso corpo dotado de três sentidos físicos — visão, audição e tato — e dois sentidos químicos — paladar e olfato. Mas não possuímos também algum sentido de consciência temporal direta? Sobre essa questão, as opiniões mais diversas foram emitidas. Por exemplo, Ernst Mach, físico e filósofo da ciência austríaco, argumentou em 1865 que temos uma sensação específica de tempo associada ao que ele chamou de “trabalho de atenção” — isto é, o esforço para concentrar a atenção sobre uma coisa após a outra. Um quarto de século depois, Guyau declarou que essa sensação, se é que existe, é vaga, irregular e está muito sujeita a erro; em 1928, um psicólogo francês, Pierre Janet, rejeitou a idéia de que nós temos um sentido específico de tempo. Mais recentemente, outro eminente psicólogo de Paris, Paul Fraisse, criticou Janet por ter ido longe demais. Na sua opinião, embora o colega estivesse correto ao dizer que as sensações de duração são reações à natureza de nossas ações, ele não percebeu que algumas dessas ações — como a sincronia dos movimentos a estímulos periódicos quando dançamos — são adaptações diretas ao tempo.

Esse problema intrigou Robert Hooke no século XVII. Ele escreveu:

Eu gostaria de saber qual o sentido que nos dá informação sobre o Tempo; pois todas as informações que recebemos dos sentidos são momentâneas, mantêm-se apenas durante as impressões causadas pelo objeto. Portanto, falta ainda um sentido para apreender o Tempo; nós temos uma Noção, mas nenhum de nossos sentidos, nem todos juntos, nos dão a idéia do Tempo, porém nós o concebemos como uma Quantidade... Considerando isso, teremos a Necessidade de imaginar algum outro Órgão para apreender a Impressão feita do Tempo. E isso, creio que não passa do que geralmente chamamos de Memória; e imagino que essa Memória seja um Órgão como o Ouvido, o Olho ou o Nariz, e que tenha sua Situação em algum ponto próximo ao Lugar onde os Nervos de outros Sentidos coincidem e se encontram.

Hooke argumentava que aquilo que chamávamos de “Alma”, e hoje chamaríamos de mente, não pode se lembrar sem o órgão da memória, como não pode ver sem o órgão da visão. Pois a alma pode apenas executar sua vontade por meio de órgãos corpóreos. Ele considerava a memória um depósito de idéias formadas em parte pelos sentidos, mas sujeitas ao que chamou de “poder diretivo da alma”. Essa ação da alma, dizia, é “comumente chamada de Atenção”. Segundo ele, no ato da atenção, a alma manipula diretamente algumas partes materiais do órgão da memória. “A Alma, portanto, só compreende o Tempo ou sente o Tempo por intermédio do Órgão da Memória.”

O mecanismo da memória é ainda um dos grandes problemas não solucionados na ciência do tempo. Duas célebres hipóteses — os protótipos de dois tipos diferentes de explicação da memória que persistem até hoje — são encontradas no diálogo de Platão, *Teeteto*, no qual ele examinava o problema de se o homem é ou não capaz de extrair conhecimento de seus sentidos-experiências. Sua solução foi a teoria da *Anamnesis*: o conhecimento é adquirido pela alma, ao coletar realidades e verdades eternas nesta vida, antes da sua experiência no mundo material externo. Ao longo dessa argumentação, Platão foi naturalmente levado a considerar a natureza da memória.

Primeiro ele compara a mente a um bloco de cera e sugere que as lembranças são impressões gravadas nesse bloco. Porém, logo depois mostra a impropriedade dessa analogia e sua falha ao explicar erros de julgamento, como quando vemos um estranho mas imaginamos ser alguém que conhecemos, isto é, alguém de quem somos capazes de recordar. Então adota uma idéia mais sutil e compara a memória a um viveiro de aves. Essa linda comparação permite que Platão explique como a imagem de alguma coisa pode ser registrada na memória sem dela estarmos conscientes.

Colocando as palavras na boca de Sócrates, personagem do diálogo, Platão diz:

Mais uma vez, então, assim como há um instante imaginamos uma espécie de bloco de cera na nossa mente, imaginemos agora que toda mente contenha uma espécie de viveiro com pássaros de todo tipo, alguns em bandos distantes dos outros, alguns em pequenos grupos, e alguns solitários, voando em qualquer direção. Devemos supor que, quando somos bebês, esse depósito estará vazio, e que os pássaros representam os vários conhecimentos. Sempre que alguém adquire um conhecimento e o guarda em sua mente, devemos dizer que aprendeu ou descobriu a coisa que representa o conhecimento; é isso que significa “conhecer”.

Sócrates continua:

Agora, pense nele buscando mais uma vez um conhecimento que deseja, pegando-o, guardando-o e soltando-o de novo. Se você possui há muito tempo conhecimentos sobre coisas que aprendeu e conhece, ainda assim é possível conhecer as mesmas coisas de novo, pelo processo de recuperação do conhecimento sobre uma coisa específica, e utilizá-lo de novo. É o conhecimento que você possuiu durante algum tempo, mas que não estava acessível na sua mente.

As duas analogias sugeridas a Teeteto por Sócrates nesse diálogo são comparáveis à distinção moderna entre a idéia de um mecanismo de memória passiva e explicações mais dinâmicas de como as memórias são restauradas e rememoradas. Sir Frederic Bartlett, no livro *Remembering*, publicado há cerca de 40 anos, foi o primeiro a mostrar conclusivamente, por meio de exemplos concretos, que tanto a retenção das memórias do subconsciente quanto sua recordação consciente dependem de fatores dinâmicos. Ou seja, voltando às analogias socráticas, nosso mecanismo de memória é mais semelhante a um viveiro que a um bloco de cera. Bartlett mostrou que a lembrança “a longa distância” não é uma simples reanimação de inúmeros sinais fixos, é essencialmente uma reconstrução imaginativa que depende da estrutura da mente no momento da recordação; apenas alguns detalhes importantes são realmente lembrados, como muitas vezes ocorre quando repetimos uma história que ouvimos ou lemos. Costuma-se observar que, em geral, lembramos melhor dos pensamentos ligados aos nossos interesses especiais. Assim, o homem que não tem outras realizações intelectuais pode ter um conhecimento fenomenal de estatísticas relacionadas a certos jogos e esportes. Isso porque ele está sempre examinando essas coisas em sua mente, de modo que não são para ele fatos isolados, mas constituem um sistema conceitual cheio de inter-

relações, e todos os fatos são retidos pelo poder sugestivo combinado de toda a massa.

Nunca é demais falar da importância das associações e da arrumação dos elementos individuais de nossas memórias. Em geral, quando nos recordamos de um acontecimento passado sem associações ou contextos, é muito difícil saber se foi um ato da memória ou da imaginação. Por outro lado, quando alimentamos uma idéia imaginária durante longo tempo e nos referimos constantemente a ela, podemos acabar nos convencendo de que é uma memória real; como Jorge IV fez quando, no final da vida, acreditava realmente que havia estado na batalha de Waterloo e comandado um ataque de cavalaria.

Na idade avançada, as memórias claras da infância em geral contrastam com a incapacidade de lembrarmos o que ocorreu cinco minutos antes. Mas mesmo uma coisa que achávamos que não conseguiríamos esquecer às vezes nos escapa com o passar dos anos. Pouco tempo antes de sua morte, o famoso botânico sueco Lineu tinha grande prazer em ler seus próprios livros, e exclamava: “Que beleza! Eu daria tudo para ter escrito isso!”

A utilidade da memória é tão óbvia que tendemos a considerar o esquecimento um defeito. No entanto, embora muitas vezes nos aborreça, a capacidade de esquecer não é menos valiosa que a de lembrar. Nossa mente certamente retém abaixo do nível da consciência uma grande massa de memórias que normalmente jamais recordamos e de que nunca precisamos recordar; é até mesmo possível — embora a evidência não seja conclusiva — que realmente retenhamos um registro de tudo aquilo que em certa época nos prendeu a atenção. Suspeitava-se disso muito antes de se chegar à evidência científica, como vemos pelo que Diderot escreveu:

Sou levado a acreditar que tudo o que vimos, conhecemos, percebemos, ouvimos — até as árvores de uma densa floresta —, e também a disposição dos galhos, a forma das folhas e a variedade das cores, os tons de verde e a luz; o aspecto dos grãos de areia na beira do mar, a irregularidade das cristas das ondas agitadas por uma brisa leve ou espumosas pela tempestade; a profusão de vozes humanas, de gritos de animais e dos sons físicos, a melodia e harmonia de todas as canções, de todas as peças musicais, de todos os concertos que ouvimos, *tudo isso, sem sabermos, existe dentro de nós*. Eu realmente vejo mais uma vez, bem acordado, todas as florestas da Westfália, Prússia, Saxônia e Polônia. Vejo-as de novo em sonho, com as mesmas cores brilhantes de uma pintura de Vernet. O sono me fez voltar aos concertos com tanta clareza como quando eu ia assisti-los. Produções dramáticas, cômicas e trágicas voltam a mim depois de 30 anos; os mesmos atores, a mesma platéia...

Mais de um século depois de Diderot, Bergson e Freud desenvolveram teorias da memória. Apesar das diferenças, ambos concordavam que *todo* esquecimento se deve a falhas da nossa capacidade de recordar, e não de reter. Em outras palavras, esquecer aplica-se apenas à mente consciente. Abaixo do nível da consciência todas as memórias persistem.

Essa conclusão é confirmada pela hipnose e por experimentos em cirurgia cerebral. A evidência mais surpreendente foi obtida pelo neurocirurgião canadense Wilder Penfield por meio de estímulos elétricos do córtex. Nas operações em pacientes que sofriam de epilepsia focal, ele descobriu que a aplicação de um eletrodo estimulante no córtex do lobo dominante induzia-os a lembrar de experiências antigas. Esses *flash-backs*, como são chamados, referem-se em geral a incidentes sem qualquer importância que o paciente nunca recordaria voluntariamente. As experiências particulares possivelmente trazidas à tona dependem do acaso, mas a mesma “faixa de tempo” tende a ser reativada por estímulos subsequentes. Penfield argumentava que esses *flash-backs* involuntários não são exemplos da memória tal como em geral entendemos o termo, embora estejam intimamente ligados a ela. Ninguém consegue se lembrar, pelo esforço voluntário, da riqueza de detalhes revelados nos *flash-backs*. O homem pode aprender uma música com perfeição, mas raramente lembra-se com detalhe das várias vezes em que a ouviu. A maioria das coisas que lembramos são generalizações e resumos. Os pacientes dizem que a experiência recordada com o eletrodo é muito mais real que a lembrança, é mais como viver de novo o passado. O eletrodo ativa todas as coisas que lhe haviam prendido a atenção no intervalo de tempo em questão. Mas apesar dessa duplicação de consciência, o paciente permanece plenamente a par da situação presente. Aliás, ele fala com espanto que está ouvindo e vendo amigos que sabe na verdade estarem longe ou que já morreram.

De início, a descoberta de Penfield levou-o a declarar que os *flash-backs* implicavam uma localização mais ou menos precisa do sinal da memória, mas logo surgiu a crítica de que as memórias não são necessariamente armazenadas nas partes do cérebro de onde podem ser extraídas. Por outro lado, K.S. Lashley descobriu que as grandes extirpações corticais em animais como macacos e ratos em geral faziam pouca diferença nas memórias adquiridas pelo aprendizado. Lashley concluiu que as memórias

não dependem de engramas *localizados*, nem de sinais de memória, mas de fatores que afetam o córtex, ou uma região particular, como um todo.

Embora possamos aceitar a conclusão geral de Lashley de que os sinais de memória de longo prazo não se localizam precisamente no córtex, é difícil aceitar a hipótese específica de que esses engramas são padrões de ressonância mais ou menos estáveis de vibração eletroquímica das células nervosas sobre áreas comparativamente extensas. É difícil conciliar essa idéia com o conhecido fato de que, embora depois de um forte choque não haja lembrança dos acontecimentos imediatamente anteriores, as memórias de longo prazo são excepcionalmente duradouras e podem ser mantidas até mesmo depois de crises epiléticas que convulsionam o cérebro com atividade elétrica. Além disso, nos animais, os padrões de comportamento condicionado sobrevivem à hibernação, quando não há praticamente nenhuma atividade elétrica no cérebro.

Há alguma evidência fisiológica de que as memórias de longo e curto prazo são armazenadas de formas distintas; as memórias de curto prazo provavelmente localizam-se no hipocampo, duas protuberâncias alongadas logo abaixo do córtex cerebral, e as de longo prazo são armazenadas no próprio córtex, segundo vários neurofisiologistas. Além disso, as memórias de curto prazo, ou imediatas, com duração de poucos segundos, podem ser associadas aos pulsos elétricos de grupos fechados das células nervosas. A ausência desse tipo de explicação em termos de conexões elétricas *entre* células para justificar as memórias de longo prazo levou a concentrar a busca nos processos químicos *dentro* das células ou nas conexões com outras células.

As experiências mais entusiasmantes planejadas para testar a teoria química da memória foram as de “transferência” com planárias, ou vermes chatos. Essas criaturas primitivas, de pouco mais de um centímetro de comprimento, são capazes de ter uma reação condicionada como a estudada nos cachorros por Pavlov. Mas, ao contrário dos cachorros, se forem cortadas ao meio elas se regeneram — a cabeça cria um novo rabo e o rabo cria uma nova cabeça. Normalmente a planária reage a uma fonte de luz dirigindo-se para ela, mas, ao receber o choque elétrico, enrosca-se. Recebendo a luz e o choque ao mesmo tempo, ela reage ao choque, e pode ser treinada a enroscar-se mesmo quando a luz for ligada. Quando o verme assim condicionado é cortado ao meio, não só o verme novo gerado a partir

da cabeça antiga “lembra” que aprendeu a se enroscar na presença da luz, como, ao que parece, a nova cabeça gerada do rabo do verme original também. Sugeriu-se então que algum sinal da memória química migra pelo sistema nervoso primitivo dessas criaturas.

Em uma experiência mais surpreendente ainda, realizada há poucos anos nos Estados Unidos, viu-se que se os vermes originais treinados forem cortados e servirem de alimento a vermes não treinados, estes últimos absorverão o comportamento condicionado juntamente com o alimento. Ainda bem que o ser humano não pode aprender dessa forma canibalesca! Ao contrário dos vermes, os seres humanos não podem absorver os tipos de moléculas gigantescas que agiriam como mensageiras químicas sem fragmentá-las nos seus componentes.

Em nenhuma dessas experiências há uma firme evidência de que a *memória* realmente tenha se transferido de um animal para outro, e não de que apenas alguma substância tenha apressado o processo de aprendizado. De qualquer forma, o tipo simples de reação condicionada dos vermes é completamente diferente da retenção por longo prazo de acontecimentos específicos que caracteriza a memória humana. A mente humana não só armazena uma fantástica massa de detalhes como pode reproduzir uma seqüência de acontecimentos passados em ordem cronológica, como se descobriu com o *flash-back*. Embora os reflexos automáticos e condicionados possam ser mantidos de forma química ou mecânica, e as memórias imediatas possam ser conservadas por processo similar a esse em grandes computadores eletrônicos, o problema do mecanismo da memória de longo prazo do homem é ainda um mistério total.

Como vimos no capítulo 1, temos boas razões para crer que todos os animais, exceto o homem, vivem em um presente contínuo. A memória é considerada há muito tempo concomitante ao nosso sentido de identidade pessoal. É o meio pelo qual o registro do nosso passado desaparecido sobrevive dentro de nós e é a base da conscientização do ego. Porém, se a consciência de todo o passado ou de grande parte dele sobrevive dentro de nós de forma inconsciente, por que não conseguimos nos lembrar de nada que aconteceu na primeira infância? A resposta mais convincente a essa pergunta é que a amnésia da infância deve-se à demora no desenvolvimento do mecanismo mental conceitual e convencional que aprendemos a construir como forma de recordar o passado.

Ao contrário dos animais, o homem tem um sentido não só do passado, mas também do futuro. Guyau argumentou, no seu ensaio sobre a origem da idéia de tempo, que a fonte original dessa idéia era uma acumulação de sensações que produziam uma perspectiva mental dirigida para o futuro. Essa hipótese é apoiada pela opinião corrente dos antropólogos de que o desenvolvimento original dos lobos pré-frontais do cérebro pode estar intimamente associado ao crescimento do nosso poder de adaptação aos acontecimentos futuros. Embora o homem de Neanderthal possa ter mostrado alguma preocupação rudimentar com o futuro, pois parece ter enterrado seus mortos, tem-se relacionado a emergência do *Homo sapiens* a uma tendência muito maior de olhar para a frente; a principal evidência disso foi o súbito desenvolvimento de ferramentas que, ao contrário dos primitivos machados de mão do homem de Neanderthal, foram usadas para fazer uma variedade de outras ferramentas para utilização futura, como arpões armados de farpas, anzóis para peixes e agulhas com furo. Aliás, os pacientes que tiveram os lobos pré-frontais retirados cirurgicamente tendem a restringir-se ao presente.

Não há provas de que os animais tenham mais senso de futuro que de passado. O candidato mais forte à exceção a essa regra é o chimpanzé. O problema de os chimpanzés terem ou não consciência do futuro foi muito bem estudado por Wolfgang Köhler. No seu livro *The Mentality of Apes*, ele explica que chegou à conclusão de que o comportamento dos macacos, mesmo quando pareciam dar sinais de pensar sobre o futuro, podia ser mais bem explicado de outras formas. Por exemplo, Köhler deduziu — por meio de experimentos em que os chimpanzés respondiam prontamente à oportunidade de adiar a hora de se alimentar até terem juntado uma boa provisão para comer em um canto sossegado, longe dos seus companheiros glutões — que esse comportamento era causado por medo de competição com os outros, e não por alguma consideração sobre o futuro.

Parece então que o homem se distingue dos outros animais por seu sentido de passado e futuro — ou seja, por sua consciência de tempo. Devemos ver a consciência de tempo, do mesmo modo que as nossas outras capacidades mentais, não simplesmente como uma questão de reação sensorial, similar ao paladar ou ao olfato, mas como uma capacidade potencial que só podemos aplicar na prática aprendendo a desenvolvê-la por nossa própria experiência. A percepção de mudança, e daí a de sucessão temporal, envolve ações de organização mental. Nós

podemos perceber a mudança com todos os sentidos, mas estes não são homogêneos quanto a isso; o órgão mais sensível à discriminação temporal é o ouvido. A duração mais curta de percepção da visão é de cerca de dois centésimos de segundo — o princípio do cinematógrafo depende de uma sucessão de imagens que se fundem se forem projetadas mais depressa que isso. Mas o limite inferior da experiência auditiva *consciente* é de cerca de dois milésimos de segundo. Quanto à discriminação auditiva subconsciente, nosso poder é espantoso. Descobriu-se, pelas experiências, que a capacidade de localizar as fontes da emissão sonora origina-se da diferença de tempo em que os sons chegam aos nossos dois ouvidos. Quando o som se origina a poucos graus do plano que divide a cabeça nas metades direita e esquerda, essa diferença de tempo pode ser de cerca de 40 milésimos de um milissegundo (um milésimo de segundo). Mesmo assim produz um resultado efetivo.

A consciência da seqüência dos acontecimentos depende do sentido com o qual eles são percebidos. É difícil colocar uma sensação de um tipo (digamos, visual) entre duas de outro tipo (digamos, auditiva) se as últimas vierem em uma sucessão muito próxima. Mas se tivéssemos uma percepção direta do tempo em si, a natureza das sensações particulares que determinam os intervalos em questão não teriam qualquer significado particular. Portanto, não é o tempo em si que produz os efeitos, mas o que ocorre no tempo. O tempo não é uma simples sensação, pois depende dos processos de organização mental que unem o pensamento à ação.

Aspectos da natureza da atividade mental envolvida na construção de um “sentido” de tempo foram esclarecidos pelo estudo de uma forma bizarra de amnésia, conhecida como síndrome de Korsakoff, em homenagem ao primeiro psiquiatra a fazer seu relato clínico detalhado, em 1890. Nessa doença, o paciente parece perfeitamente normal, com os poderes de percepção de sempre, só que raramente ou nunca fala do presente e do passado imediato. Ele tem uma boa memória dos acontecimentos remotos, mas não se lembra de quase nada ocorrido recentemente. O dr. George Talland, do Hospital Geral de Massachusetts, no seu livro *Deranged Memory*, descreveu uma certa paciente com síndrome de Korsakoff, a quem ele chama de Helen. Depois de muitos anos no hospital, Helen declarava com firmeza que tinha sido internada no dia anterior. Apresentava-se como uma mulher rica que vivia em um dos melhores hotéis residenciais da cidade, ao qual sempre esperava voltar

naquele mesmo dia. Embora houvesse vivido assim em outros tempos, ela não parecia ter consciência de que aquela vida agradável acabara. “Dava a impressão”, escreve o dr. Talland, “de que aquela fachada elaborada devia ser mantida com um imenso esforço e um rigoroso exercício mental, pois ela não se deixava trair nas suas inverdades. Helen foi uma das pacientes com essa síndrome que respondeu à hipnose, mas as várias tentativas com essa técnica não produziu qualquer nova recordação, nem a admissão de que a paciente tinha consciência do seu problema.”

Como é possível explicar pacientes como Helen? Várias interpretações da síndrome foram apresentadas, tais como distúrbio do registro temporal de memória e incapacidade de compreender o fluxo do tempo. Pacientes que têm síndrome de Korsakoff registram os acontecimentos mas não conseguem relacioná-los com informações posteriores relevantes. Tendem a passar muito tempo sem fazer nada, e sabe-se que a distância temporal de um acontecimento passado é facilmente subestimada se o espaço intermediário estiver vazio. A estrutura temporal de referência torna-se distorcida, e com ela a idéia do indivíduo sobre si mesmo. O conceito de ego baseia-se na recordação de experiências no tempo objetivo, organizadas pela mente em algum tipo de estrutura conceitual. Os pacientes com síndrome de Korsakoff não conseguem relacionar suas experiências correntes com essa estrutura.

Falha similar ocorre no fenômeno do *déjà vu*. Esta é a idéia de falsa familiaridade que ocasionalmente caracteriza nossa conscientização do presente, de modo que vivemos a sensação estranha de termos sentido há muito tempo o que está acontecendo agora. Uma boa descrição do *déjà vu* é dada por Dickens em *David Copperfield*. No capítulo 39 ele escreve:

Nós todos já tivemos uma sensação ocasional de que o que estamos dizendo e fazendo já foi dito e feito antes, em um tempo remoto — de termos sido rodeados há muito tempo pelos mesmos rostos, objetos e circunstâncias —, a sensação de sabermos perfeitamente o que será dito em seguida, como se de repente nos lembrássemos!

Esse tipo de experiência pode ter sido uma das fontes psicológicas que deram origem, na Antigüidade, à doutrina da metempsicose, ou migração de almas, defendida por Pitágoras e outros. Segundo alguns neurologistas, a parte do cérebro envolvida no *déjà vu* é provavelmente o hipocampo. Seja verdadeiro ou não, descobriu-se que os pacientes que têm essa região retirada cirurgicamente tendem a esquecer os incidentes da vida diária

rapidamente, embora lembrem com clareza de incidentes da infância. Talvez a lesão nessa parte do cérebro dê origem à síndrome de Korsakoff.

Já vimos que hoje em dia se acredita que o senso de tempo é produto da evolução humana, e que a percepção dos fenômenos temporais não é considerada um processo puramente automático, como pensava Kant, mas uma atividade complexa que desenvolvemos pelo aprendizado. Nossa percepção consciente do tempo depende do fato de nossa mente operar por atos de atenção *sucessivos*. Ao que parece, não podemos atender a dois acontecimentos simultâneos e perceber os dois claramente, a não ser que eles estejam combinados de alguma forma. O problema da ordem do tempo ser construída por nós com base em nossos movimentos de atenção não é, portanto, nada simples. Nossas lembranças podem ser guias pouco confiáveis para a ordem dos acontecimentos no tempo real. A constatação de que pacientes em transe hipnótico possuem um sentido mais exato de tempo do que em seu estado normal não só confirma a existência de ritmos orgânicos permanentes como indica que no funcionamento normal da consciência esses ritmos são obscurecidos pela efemeridade dos acontecimentos externos.

A despeito dos ritmos orgânicos permanentes no cérebro e no corpo, nosso sentido de duração temporal é em geral muito pouco exato. Depende de estarmos realmente sentindo o tempo em questão ou olhando o tempo passado. Como disse Thomas Mann no romance *A montanha mágica*, quanto maior o interesse que temos no que estamos fazendo mais depressa o tempo parece passar; mas, ao olharmos esse tempo passado, quanto mais cheio é seu conteúdo, mais longo parece ter sido. Uma hora tediosa dá a impressão de ser eterna enquanto dura, mas longos intervalos de tédio tendem a encurtar-se na memória da pessoa. Uma uniformidade completa faria a mais longa das vidas parecer curta, enquanto os anos cheios de acontecimentos “fluem mais lentamente que os pobres, inúteis e vazios, sobre os quais o vento passa, e que ele leva.”

O senso de duração temporal também depende da idade, pois os processos orgânicos tendem a tornar-se mais vagarosos quando envelhecemos, de modo que, comparado com eles, o tempo físico parece passar mais depressa. Essa aceleração do tempo físico com a idade é o tema dos versos de Guy Pentreath:

Pois quando eu era um bebê e chorava e dormia,

O tempo se arrastava;
Quando eu era menino e ria e falava,
O tempo andava;
Quando os anos fizeram de mim um homem,
O tempo correu,
Mas quando fiquei velho, o tempo voou.

A vida emocional também influencia nossa experiência de tempo. As diferenças temperamentais entre aqueles que se comunicam rápido ou agem conforme seus pensamentos e aqueles que só agem, quando agem, depois de muito atraso e instigação, podem ser vistas como variações da experiência de tempo. Isso torna-se claro ao compararmos o conceito de tempo de adultos normais, criados nas tradições da civilização ocidental, com as diferentes idéias de tempo de pessoas de outras culturas. Hoje tendemos a considerar instintivo e inevitável o reconhecimento da natureza linear progressiva do tempo. Não há dúvida de que essa idéia é influenciada pelo fato de o processo de pensamento ter a forma de uma seqüência linear. No entanto, a capacidade de sintetizar, em uma ordem de tempo única, unidimensional, as experiências associadas aos diferentes sentidos é um produto tardio e sofisticado da nossa evolução não só biológica como também social.

Relógios Biológicos

Apesar da falta de solução para vários problemas ligados à percepção consciente do tempo, há evidências cada vez maiores de que o corpo contém diversos relógios biológicos. Por exemplo, algumas doenças revelam ritmos diários, ou de 24 horas, que normalmente não conseguem ser detectados. O dr. C.P. Richter, de Baltimore, citou o caso de uma paciente que vivia presa à cama e não falava com clareza, mas que diariamente, durante nove anos, mudava subitamente de personalidade entre nove horas e meia-noite, andando pela casa sozinha e falando muito bem. Ele sugeriu que há vários relógios no corpo, em geral não correlacionados, mas que em certas condições anormais são sincronizados para produzir ciclos físicos ou mentais bem definidos.

Embora se saiba há muito tempo que os animais e as plantas têm ritmos diários e sazonais, e que certos padrões de comportamento ocorrem periodicamente, só nos últimos anos se tornou evidente que esses fenômenos dependem de uma capacidade interna dos organismos vivos de medir o tempo.

No caso do homem, a faculdade de medida do tempo fisiológico em geral permite avaliar com alto grau de exatidão períodos de várias horas, na ausência de indicadores externos. É o caso daqueles que são capazes de acordar a uma certa hora sem a ajuda do despertador. Esse “relógio da cabeça”, como é chamado algumas vezes, funciona com mais precisão sob hipnose: uma ordem para realizar determinada ação depois de um determinado tempo é em geral obedecida com grande exatidão. Mesmo sob hipnose, o “relógio da cabeça” pode muitas vezes funcionar com considerável precisão em períodos bastante longos. Em uma famosa experiência, em 1936, dois voluntários fechados em um quarto à prova de som durante, respectivamente, 48 horas e 86 horas, estimaram a hora com

tal exatidão que seus erros não chegaram a 1%. Por outro lado, dois homens que em 1968-9 passaram quase cinco meses debaixo da terra em cavernas separadas, sem meios de saber as horas, depois de duas semanas ali subavaliaram a passagem do tempo, estimando a duração do dia em 48 horas. A necessidade de algumas indicações para se estimar a extensão do dia, segundo essa experiência, mostra simplesmente que, nessas condições anormais, as influências psicológicas predominam sobre os fatores fisiológicos. Isso não invalida a hipótese do relógio biológico.

Navegação animal

A certeza manifesta da existência de mecanismos internos de tempo nos animais e nas plantas originou-se basicamente em três campos distintos de pesquisa: o estudo da navegação animal, o estudo do fotoperiodismo (nome genérico dado às reações dos organismos vivos às mudanças sazonais na duração do dia e da noite) e o estudo de ritmos periódicos ou diários no comportamento e atividade dos organismos vivos.

Há muito tempo sabe-se que os pássaros migrantes podem voar longas distâncias para destinos específicos, e que mesmo os filhotes bem novinhos seguem seu caminho independentemente dos adultos da mesma espécie. Mas foi só em 1949 que Gustav Kramer descobriu a explicação. Ele observou que o comportamento dos estorninhos presos em uma gaiola ao ar livre indicavam, na época da migração, a direção que gostariam de tomar. Eles tendiam a seguir numa direção específica, estivessem pulando de um lado para o outro ou sentados no poleiro, agitando as asas. Mas Kramer notou que, quando o céu estava completamente coberto, eles não faziam isso. Protegendo os passarinhos dos raios diretos do Sol e usando espelhos apropriados, descobriu que o sentido deles dependia da posição aparente do Sol. Descobriu também que os passarinhos, se fossem mantidos em um lugar fechado, iluminado por um Sol artificial em uma posição fixa, mudavam sistematicamente sua orientação durante o dia em correspondência à rotação da Terra. Kramer treinou os estorninhos a se alimentarem segundo uma certa direção dada pela bússola, em uma hora específica do dia, depois testou-os em outra hora e constatou que eles continuavam na posição de treinamento. Os passarinhos encontravam essa direção olhando o Sol e levando em conta seu movimento diário regular.

Kramer constatou que, se um passarinho treinado dessa forma fosse confinado em uma gaiola com dia e noite artificiais defasados em seis horas do dia e noite naturais, e depois fosse colocado à luz do Sol natural, ele procuraria comida a 90° graus com referência à direção verdadeira. Isso sugeria que o relógio interno usado por esses passarinhos para obter a direção do Sol era mantido pelo ciclo diário de claro-escuro do local, neste caso, com seis horas de defasagem da hora natural.

Experiências similares foram realizadas por E.F.G. Sauer com pássaros que migram principalmente à noite. Ele prendeu alguns pássaros canoros migrantes em uma gaiola à prova de som, dentro de um planetário. Embora não tivessem qualquer indicação externa sobre a época do ano, quando o outono chegou, os pássaros começaram a esvoaçar irrequietos, noite após noite, como se informados por um relógio interno que era hora de sair voando. Quando o padrão apropriado de estrelas foi projetado no teto, eles indicaram sua direção de migração. Nenhuma estrela ou constelação em especial parecia ser responsável por essa capacidade de encontrar a direção, e sim o conjunto do céu noturno como um todo. Como esses pássaros levaram em conta a aparente rotação do céu ao longo da noite, Sauer concluiu que eles navegam com a ajuda de um relógio interno que faz com que relacionem a aparência do céu em cada estação à geografia terrestre. Hoje acredita-se que, embora as estrelas não sejam usadas para a navegação, a direção é obtida ao pôr-do-sol e mantida à noite, com a ajuda delas.

Um relógio biológico parece também estar envolvido no instinto de volta à casa dos pombos. Embora os pombos fossem usados pelos antigos egípcios, gregos e romanos para enviar mensagens, nunca se empregou sua capacidade de voltar para casa até a corrida dos pombos ser introduzida, pelos belgas, em 1825. Esse esporte baseia-se no fato de que nem todos os pombos sabem voltar para casa; só uma certa percentagem deles é capaz de voltar de longas distâncias em alta velocidade. Experiências mostraram que pombos expostos a dia e noite artificiais, defasados da hora local, e soltos longe de casa, habitualmente seguem na direção errada, mas em geral chegam em casa depois de algum tempo. Embora seja provável que eles tenham alguma consciência dos aspectos topográficos, devem também ter um relógio biológico acurado.

Aves migratórias e pombos não são os únicos animais a usar o relógio interno para encontrar sua direção. A baratinha-de-areia (*Talitrus saltator*) também o emprega. Esse animal habita as areias úmidas das praias, e, se for levado para a areia seca, tenta fugir para o mar seguindo em ângulo reto com relação ao litoral. Ele determina a direção necessária por meio da posição do sol, e para isso conta com um relógio interno. A existência desse relógio foi estabelecida por experiências similares às aquelas realizadas com os estorninhos, mostrando que o relógio pode ser alterado mudando-se o ciclo de claro-escuro.

Ao que parece, a aplicação mais sofisticada de um senso nato de hora para se guiar é a das abelhas. É bem conhecida a agilidade delas ao voar de volta para a colmeia carregadas de comida. Essa agilidade deu origem ao termo “linha de abelha” para designar uma linha reta juntando dois lugares. Porém, sua capacidade de saber a hora só foi notada neste século. A abelha foi estudada pela primeira vez por um médico suíço, Auguste Forel, que tinha o hábito de tomar o café da manhã à mesma hora quase todos os dias, na varanda de sua casa, e as abelhas pegavam pequenas porções de geléia deixadas no final da refeição. Forel observou que elas chegavam à mesma hora toda manhã, mesmo nos dias em que ele não comia na varanda. Embora se soubesse que as abelhas voam junto a certas flores só nas horas do dia em que chupam o néctar, ninguém tinha estudado isso. Só depois da Segunda Guerra Mundial o senso de hora foi investigado de forma sistemática, notadamente por Karl von Frisch e seus colegas da Universidade de Munique. Eles constataram que, embora as abelhas pudessem ser treinadas para comer em um ponto específico à mesma hora, não podiam ser treinadas a comer nesse mesmo lugar em horas diferentes. Por outro lado, podiam ser treinadas a comer em dois lugares diferentes em duas horas diferentes do dia, ou até mesmo em vários lugares diferentes em várias horas diferentes. Frisch concluiu que o senso de hora das abelhas não se baseia no aprendizado de intervalos, mas depende de um relógio interno com um período de 24 horas. Isso foi confirmado com abelhas treinadas a comer em certa hora do dia, num fuso horário europeu, e depois transportas de avião para um fuso horário americano, onde seu comportamento continuou em sincronia com o fuso horário europeu.

A fantástica capacidade desses insetos de se comunicarem uns com os outros também depende do uso de um relógio biológico. Quando a abelha escoteira encontra um canteiro de flores cheias de néctar, apressa-se em

informar às outras abelhas da colônia. Ao voltar para a colmeia, ela executa uma dança que indica a distância e a direção das flores. Se a fonte estiver por perto — a não mais de 50 a 100 metros de distância —, a abelha escoteira executa o que Frisch chamou de dança circular, virando-se uma vez para a direita e outra para a esquerda e repetindo esses círculos com grande vigor durante mais de meio minuto. Mas se as flores estiverem longe, a dança é bem diferente. A abelha voa a uma curta distância, sacudindo o abdômen rapidamente de um lado para o outro. Depois faz uma volta completa para a esquerda, vai em frente de novo na mesma direção e vira para a direita. Essa dança é repetida diversas vezes, e não só anuncia que a fonte está longe como informa a distância e a direção do lugar.

A distância é indicada pelo número de voltas dadas em um certo tempo: quanto menor o número, maior a distância. Embora a forma de mostrar a relação da distância com o ritmo da virada varie de uma colônia para outra, há pouca variação dentro da mesma colônia entre uma abelha e outra. A rigor, o ritmo da virada nem sempre é uma indicação real de distância, pois depende também da direção do vento. O vento contrário ao caminho do local da comida tem o mesmo efeito que a distância aumentada: as danças tornam-se mais lentas. Por outro lado, o vento a favor tem o efeito oposto. A base da estimativa de distância da abelha parece ser o tempo ou o esforço para chegar às flores.

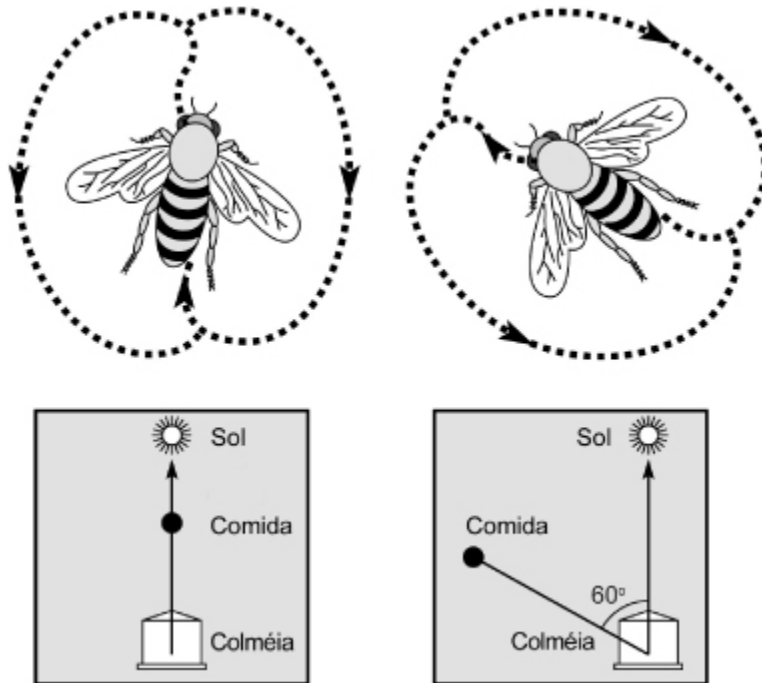


Figura 2: Dança das abelhas. No exemplo à esquerda, a abelha está indicando as flores um pouco distantes, na mesma direção do Sol; verticalmente para cima da face da colmeia significa “na direção do Sol”; a mudança do ângulo da corrida para a esquerda ou a direita da vertical significa uma alteração semelhante da informação direcional. A abelha dá uma idéia da distância pela velocidade da dança: quanto mais depressa, mais perto estão as flores.

A direção das flores é indicada pela parte da dança em linha reta, onde o Sol é usado pela abelha como uma espécie de compasso de navegação. Descobriu-se que a direção das danças com relação às mesmas flores muda ao longo do dia aproximadamente no mesmo ângulo do Sol. Frisch e seus colegas ficaram surpresos ao ver que as abelhas continuam a indicar a direção correta da comida com relação à posição do Sol até mesmo quando ele está coberto e parte do céu se encontra nublada. Constatou-se que elas fazem isso utilizando a relação entre a posição do Sol e a polarização do céu azul. O mais notável é que, se forem induzidas a dançar durante a noite, as abelhas indicam a direção do local onde a hora da alimentação diária está mais próxima da hora da dança. Em outra experiência, uma abelha escoteira anunciou às 21:31h um local a leste de onde ela comia todo dia às 18h, mas às 3:54h indicou um local ao sul de onde comia todo dia às 8h. Outras experiências revelaram que as abelhas podem armazenar na memória não só as horas e os locais de comida, como também o azi-

mute do Sol em qualquer hora do dia, até mesmo quando não o vêem há várias semanas.

Há fortes indicações de que o conhecimento da orientação do Sol e da movimentação não é inato nas abelhas, mas deve ser adquirido. Chegou-se a uma conclusão semelhante no caso dos pássaros. K. Hoffmann tirou seis filhotes de estorninhos do ninho e criou-os sem nenhuma visão direta do Sol. Eles foram treinados a se direcionar em uma hora específica do dia com a ajuda de um Sol artificial; testados em outras horas, só dois conseguiram levar em conta a direção do movimento do Sol, e não exatamente sua velocidade. Os outros mantiveram o ângulo original do treinamento.

Em suma: os vários fenômenos revelados pelas conquistas de navegação dos animais só podem ser entendidos se partirmos do princípio de que eles têm alguma forma de mecanismo interno de manutenção da hora que aprenderam a usar. Deve haver neles alguns processos rítmicos que lhes servem de relógios confiáveis. Embora esses ritmos possam continuar na ausência de mudanças externas, seu passo é mantido por eventos rítmicos externos dos quais a sucessão de claro-escuro do dia e da noite é um dos mais importantes.

O estímulo da luz do dia

No caso das plantas, a influência da extensão relativa do dia e da noite na reação da florescência foi estudada pela primeira vez por W.W. Garner e H.A. Allard, que, em 1920, introduziram o termo *fotoperiodismo*. O conceito foi logo ampliado para explicar outros fenômenos do comportamento das plantas e dos animais. É claro que há tempos já se sabia que a brotação das plantas, o despertar da hibernação dos animais, suas estações de procriação e de formação do pêlo no inverno, assim como o tempo de migração dos pássaros, tudo isso dependia das mudanças ambientais. Mas ainda não se considerava que a extensão da luz do dia era o fator ambiental determinante. Porém o uso desse fator pelos organismos vivos é natural, pelo menos em latitudes médias e altas, pois essa é a mudança sazonal mais regular que ocorre nessas regiões da superfície da Terra. Seu uso tornou-se sem dúvida importante durante a conquista evolucionária da terra seca, onde a temperatura é um indicador menos confiável de mudança sazonal que no mar.

Embora sua investigação científica seja moderna, o fotoperiodismo nos pássaros é explorado há muito tempo pelo homem com fins puramente práticos. Os japoneses fizeram aves canoras machos cantar fora da estação mantendo-as com iluminação artificial no inverno. Na Idade Média, os caçadores de pássaros holandeses tinham luz artificial à noite para induzir características reprodutivas de canto e exibição em certos pássaros no outono, a fim de usá-los como chamariz para as aves migrantes que passavam. Pelo procedimento oposto de diminuir artificialmente o período da luz do dia, os pássaros eram induzidos a acelerar as reservas de gordura que os preparavam para o inverno, ficando assim prontos para a mesa.

A primeira prova conclusiva de que a duração da luz do dia pode influenciar o comportamento reprodutivo dos animais foi apresentada pelo zoólogo canadense William Rowan, no final da década de 1920. Ele estudou um pássaro considerado o maior maçarico de pernas amarelas, que migra para a Patagônia no outono e volta para procriar no Canadá toda primavera. Embora a viagem de ida e volta seja de cerca de 25.000km, o *timing* das aves é tão preciso que elas desovam sempre entre 26 e 29 de maio. Rowan estudou esse pássaro durante 14 anos, considerou todos os fatores pertinentes e concluiu que o único aspecto suficientemente regular e

preciso para agir como sincronizador necessário era a variação da duração da luz do dia. A fim de testar essa conclusão, pegou aves de outras espécies que normalmente passam o inverno no Canadá e submeteu-as ao processo artificial de alongamento dos dias. Constatou que depois de algumas semanas, quando elas sentiam as condições da luz do dia que normalmente não existiam até o final da primavera, ficavam prontas para procriar, enquanto os espécimes de controle, mantidos na luz natural de inverno, não. Rowan estudou o efeito da liberação de aves em vários estágios do seu desenvolvimento de procriação e descobriu que elas migram quando passam do estado inativo ao estado completo de reprodução. A partir dessas e de outras pesquisas, fica claro que o fotoperiodismo é um fator crucial para os ciclos de reprodução de várias espécies animais.

Nas plantas, os órgãos que recebem o estímulo fotoperiódico são as folhas. Ao serem expostas a uma duração crítica da luz do dia, elas transmitem uma mensagem aos brotos, fazendo com que eles formem flores em vez de projetos de folhas. Porém nem toda florescência depende da duração do dia, pois o controle fotoperiódico dos processos de desenvolvimento tende a ocorrer nas partes do mundo onde provavelmente ele é mais efetivo.

Como foi mencionado antes, o controle fotoperiódico é encontrado com mais frequência nos organismos vivos existentes em latitudes médias temperadas, onde a temperatura não é um critério confiável de mudança sazonal. É portanto significativo que os *timings* envolvidos nas reações fotoperiódicas tendam a independem da temperatura, dentro de limites razoavelmente amplos. Um bom exemplo é o ritmo de expansão e contração das células pigmentadas do caranguejo pequeno comum. Esse animal mostra um ciclo de 24 horas de variação de cor. Durante o dia o pigmento preto das células da sua casca espalha-se e torna o caranguejo escuro, para protegê-lo do Sol e dos predadores. Ao cair da noite ele se torna mais claro, e de madrugada o ciclo recomeça. Quando alguns desses caranguejos foram colocados em um quarto escuro, a uma temperatura uniforme, constatou-se que as diferentes temperaturas entre 26° e 6° não tinham grande efeito sobre seu ciclo. Embora em temperatura mais baixa a expansão real das células pigmentadas se reduzisse, o *timing* do ciclo foi mantido com diferença de poucos minutos por um período de dois meses. Quando a temperatura baixou para 0° o ritmo desapareceu, mas foi restaurado mais tarde, quando a temperatura subiu, embora defasado em

termos da quantidade apropriada. Por exemplo, se a temperatura fosse mantida durante seis horas, o ritmo restaurado era defasado de um quarto de ciclo; se a temperatura baixa continuasse durante 24 horas, o ritmo restaurado voltava à sincronia. Semelhante independência da temperatura é encontrada no fotoperiodismo das plantas.

Até aqui falamos da influência da duração da luz do dia, mas, para sermos exatos, a duração da noite é a mais decisiva, e não a do dia. Isso foi constatado pela observação de que os efeitos de um longo período de dia podiam ser obtidos depois de um dia curto, se o período escuro fosse interrompido por um espaço de tempo comparativamente curto de luz. A maior sensibilidade a essa interrupção não se dá necessariamente no meio do período escuro; em geral ocorre um certo número de horas depois do início da noite. Por exemplo, embora a reprodução possa ser iniciada entre os furões em dois meses, quando eles são submetidos a 18 horas contínuas de luz do dia, um total de seis horas diárias é igualmente efetivo se duas horas de luz lhes forem proporcionadas como interrupção ao período escuro de 12 horas. Em alguns casos, porém, o início do período claro tem mais influência sobre o *timing* do ponto crítico de alta sensibilidade no escuro que o início do próprio período escuro. A maior ou menor sensibilidade às interrupções durante o período escuro sugere que o processo fisiológico em questão é controlado por algum relógio interno.

É óbvio que existem muitas evidências de que os organismos vivos possuem relógios biológicos internos que lhes permitem obter medidas de tempo surpreendentemente exatas. Essa conclusão foi confirmada com a descoberta de que muitos organismos mostram comportamento cíclico mesmo quando não ocorre mudança alguma no ambiente físico. Isso parece ter sido observado pela primeira vez pelo astrônomo francês Jean-Baptiste de Mairan, em 1729. Ele estava interessado nos movimentos das folhas das plantas. Muitas plantas abrem as folhas nas horas de luz e fecham-nas à noite. Mairan descobriu que esses movimentos prosseguem mesmo que as plantas sejam mantidas em total escuridão. Mais tarde outros cientistas estudaram fenômenos similares, e Darwin discutiu-os em *The Power of Movement in Plants*. Esses movimentos são considerados resultantes de um efeito posterior à exposição ao ciclo do dia e da noite ou de uma tendência herdada para o movimento. Foi só na década de 1930, basicamente por meio de pesquisas do alemão Erwin Bünning, de Tübingen, que se percebeu que esses ritmos diários comprovam que existem relógios

biológicos intrínsecos, e que as plantas podem medir com precisão a passagem do tempo, mesmo quando colocadas em completa escuridão.

Bünning também descobriu que o ciclo do movimento da folha tinha um período de *aproximadamente* 24 horas. Foi uma descoberta crucial, pois fortaleceu o argumento de que os movimentos rítmicos não são controlados por um fator externo, mas intrínsecos à própria planta, e devem portanto depender de um relógio interno. Nos últimos anos o termo “circadiano” — do latim *circa diem*, que significa “sobre o dia” — foi introduzido para indicar todos os ritmos biológicos que divergem um pouco da periodicidade precisa de 24 horas. O ritmo que não fosse circadiano, mas igual à duração do dia, teria de ser atribuído a algum agente geofísico. Já o ritmo circadiano, embora presumivelmente tenha a sua origem evolucionária em condições que dependem da duração do dia, mantém uma periodicidade diferente. Isso é uma forte indicação de que o ritmo é uma característica intrínseca do organismo em si, particularmente porque não tem sincronia com nenhuma mudança ambiental diária conhecida.

Nós já sabemos que os ritmos circadianos ocorrem em quase todas as plantas e animais, da alga unicelular ao homem. Para investigar a existência desses ritmos no homem, um pequeno grupo de cientistas foi a Spitsbergen, onde o Sol brilha continuamente durante vários meses no verão e há pouca variação diária de luz ou temperatura. Durante a experiência, eles acertaram seus relógios para completar um ciclo completo de 24 horas, primeiro em 21 horas, e depois em 27 horas. Continuaram suas atividades de acordo com esses relógios, coletaram amostras de urina em intervalos regulares e as analisaram. No final, constatou-se que seus ritmos circadianos tinham se mantido.

Nem todos os ritmos biológicos com correlações externas são circadianos. Alguns organismos marinhos mostram ritmos de comportamento claramente associados às marés alta e baixa. Por exemplo, os vermes chatos verdes (*Convoluta*) vêm à superfície da areia na maré alta e enfiam-se dentro da areia quando ela baixa. Constatou-se que esse ritmo continua quando são colocados em um aquário onde não há marés. Os ciclos lunares também ocorrem em alguns organismos marinhos. O verme palolo, encontrado nos oceanos Pacífico e Atlântico, reproduz-se só durante as marés mortas do último quarto de Lua, em outubro ou novembro. A alga marrom (*Dictyota dichotoma*) também libera gametas

masculinos e femininos em certas localidades duas vezes em um ciclo lunar, aumentando assim as chances de fertilização. Como inúmeras espécies continuam com seu comportamento periódico em circunstâncias laboratoriais, sem serem expostas à ação da maré ou da Lua, é claro que devem ter ritmos intrínsecos com os períodos correspondentes. Os ciclos lunar e semilunar podem ser explicados em termos de interação dos ritmos circadianos com os ritmos da maré; certas fases dos dois coincidem, produzindo pulsações regulares em intervalos de cerca de 15 a 29 dias.

O ciclo do ano

A existência dos ritmos circadianos em todo o reino animal e vegetal levou os biólogos a questionar se há muitos ritmos intrínsecos num período de cerca de um ano. Isso é mais difícil de determinar porque exige uma investigação com duração de ano a ano. A primeira evidência positiva de um ritmo biológico anual foi descoberta por K.C. Fischer e E.T. Pongelley da Universidade de Toronto, com relação à hibernação animal. Um certo tipo de esquilo terrestre que habita as Montanhas Rochosas foi mantido em um quarto sem janelas em temperatura de congelamento (0°C), com amplo suprimento de comida e água. De agosto a outubro o esquilo comeu e bebeu normalmente e manteve uma temperatura corporal de 37° apesar do frio ambiente. Em outubro, como aconteceria se ele estivesse no seu ambiente natural, parou de comer e beber, entrou em hibernação e sua temperatura caiu para pouco mais de 0°. Em abril entrou em atividade novamente e voltou ao comportamento e a temperatura normais. Experiências similares com outras temperaturas ambientes chegaram ao mesmo resultado, e o período de cada ciclo completo era de menos de um ano. Os critérios usuais para a existência de um relógio biológico intrínseco foram satisfeitos: o período do ritmo não era de precisamente um ano, não sincronizava com nenhum sinal externo periódico e independia da temperatura.

O ritmo “circanual”, como é hoje chamado, manifestou-se até mesmo quando esses animais foram mantidos em uma temperatura ambiente constante, tão próxima à sua temperatura corporal normal que eles não puderam hibernar. Embora houvesse comida e água, eles reduziram o consumo e perderam peso durante o inverno, revertendo ao normal na

primavera. Segundo E.T. Pengelley e S.J. Asmundson, que realizaram a experiência, “não poderia haver demonstração mais convincente da existência de um relógio interno operando independentemente das condições ambientais”.

A descoberta de um relógio circanual nos hibernadores levou à pesquisa de ritmos similares em outros animais, particularmente os pássaros. Já vimos que, alterando o ritmo diário de claro e escuro, William Rowan influenciou o *timing* da inquietude característica que dava início à migração dos pássaros. Entretanto, Rowan suspeitou que a duração do dia provavelmente não era o único fator que influenciava a necessidade de migração. Essa idéia foi recentemente confirmada com a descoberta de um relógio circanual em alguns pássaros migratórios. As experiências com os pássaros canoros, alguns mantidos em condições naturais e outros em temperatura ambiente constante e um ciclo de 12 horas de luz e 12 de escuridão, mostraram que as diferenças das condições ambientais têm pouco efeito sobre a necessidade migratória dos pássaros — fossem eles mantidos na Europa, onde passavam em geral o verão, ou na África, onde passavam o inverno. Eberhard Gwinner, de Munique, que conduziu essas experiências, concluiu que o ritmo dos pássaros canoros baseia-se em algum mecanismo de *timing* circanual intrínseco.

Outro ciclo igualmente estudado foi o crescimento e revestimento anual dos chifres dos veados. É sabido que os veados tropicais, quando confinados em zoológicos em latitudes temperadas, mantêm o mesmo ciclo anual apesar da diferença da duração do dia. Uma evidência impressionante de que o crescimento do chifre é controlado por um relógio interno foi proporcionada por um alce cego observado durante seis anos na Universidade Estadual do Colorado. Apesar da ausência de qualquer luz, seus chifres se revestiram e se regeneraram na época devida, ao longo de todo esse período.

Um relógio intrínseco com um período não exatamente de um ano de calendário foi também encontrado em uma espécie de pitu que vive em cavernas escuras, onde não há praticamente mudanças sazonais. Na verdade, hoje parece provável que os relógios circanuais sejam quase tão universais quando os relógios circadianos. A vantagem desse relógio é que ele dá ao animal um aviso de antemão, que talvez nem sempre seja recebido do meio ambiente. Os pássaros que passam o inverno em regiões

tropicais próximas ao equador raramente recebem um sinal do meio ambiente informando-os de que está na hora de migrar para os locais de procriação em latitudes mais temperadas.

Há alguma evidência de que existem relógios circanuais no homem. Estudos de longo prazo com indivíduos psicóticos indicaram um ritmo anual em suas crises maníaco-depressivas, e outros indicaram um ciclo semelhante no peso do seu corpo.

O estresse é responsável pelos desvios dos ritmos circadianos e circanuais com relação a dia e ano, respectivamente. Porém, quando o ambiente externo não tem um papel na regulação desses ritmos, eles se tornam cada vez mais defasados do ciclo do dia e da noite e das estações. Conseqüentemente, o animal ou a planta em questão depende de algumas pistas ou sinais do meio ambiente para corrigir seu relógio e mantê-lo funcionando mais ou menos em sincronia, da mesma forma que usamos sinais de tempo dos nossos observatórios nacionais para acertar os relógios. No caso dos ritmos circadianos, parece que as pistas necessárias são oferecidas pelas variações diárias da luz e da temperatura. Provavelmente essas variações estão também envolvidas nos ritmos circanuais reguladores, mas pode haver outras influências também.

Relógios-mestres

É claro que os relógios biológicos do tipo discutido não podem depender de processos metabólicos, senão seus ritmos dependeriam da temperatura. Naturalmente os processos metabólicos podem influenciar o *timing* das atividades de um organismo. As abelhas alimentadas com produtos químicos que aceleram seu metabolismo tendem a chegar cedo demais nas flores em que normalmente obtêm o néctar. Um aumento ou queda da temperatura interna de um organismo pode produzir aceleração ou desaceleração dos seus processos psicológicos, tornando o relógio metabólico mais rápido ou mais lento. Constatou-se assim que moscas mantidas em uma temperatura anormalmente alta envelhecem mais depressa e morrem mais cedo.

Embora independam da temperatura em termos de ritmo, os relógios biológicos não-metabólicos podem fazer uso dela como um estímulo de

sincronia para ajustar seu funcionamento e deixá-lo em fase com alguma condição externa significativa. Conseqüentemente, um dos maiores problemas dos biólogos hoje é descobrir um mecanismo fisiológico que possa responder à temperatura por um lado e independê-la por outro. Esse problema foi estudado bioquimicamente, mas não há sinal de nenhuma variação de enzimas no mecanismo dos relógios. As plantas, ao contrário dos animais, não mostram evidência de nenhum regulador central de periodicidade. Bünning argumentou que elas devem ter um relógio em cada célula, mas embora essa conclusão seja hoje amplamente aceita, nenhum relógio celular foi até hoje identificado.¹

A sincronização de inúmeros relógios celulares pode ser regulada por algum centro de controle rítmico. Descobriram-se mecanismos particulares que podem desempenhar essa função, chamados “relógios-mestres”. O primeiro relógio-mestre foi descoberto por G.P. Wells no esôfago do verme de areia (*Arenicola marina*). Ele controla a atividade extraordinariamente regular desse animal, que mostra movimentos súbitos de três minutos para comer, mesmo não estando na presença de comida, seguidos de um minuto de descanso e movimentos de locomoção a cada 40 minutos.

Outro relógio-mestre foi descoberto por Janet Harker, de Cambridge, na barata (*Periplaneta americana*). Se mantido em um ciclo padrão de claro-escuro, esse inseto mostra um ritmo circa-diano distinto na busca de comida, pois sua atividade aumenta quando começa a escurecer. Mas se a barata for mantida em um ambiente de luz contínua durante longo tempo, esse ritmo não pode mais ser medido durante suas atividades. Uma barata com um bom ritmo foi imobilizada pela remoção de suas pernas e depois enxertada sobre outra sem ritmo, mas com os movimentos livres. Os sistemas sangüíneos dos dois insetos foram ligados por um tubo capilar para formar uma única circulação. Harker constatou que o inseto de baixo, embora ainda em luz contínua, tinha desenvolvido o mesmo ritmo circadiano apresentado previamente pelo inseto de cima. Além do mais, e essa foi a constatação crucial, a barata rítmica transmitiu a *fase* da sua atividade para a outra — uma forte indicação de que o ritmo é causado pela liberação periódica de algum hormônio para o sistema sangüíneo.

Por meio de experimentos com transplantes, Harker descobriu que essa secreção origina-se de um gânglio subesofágico que forma a parte ventral do cérebro. Esse órgão contém células nervosas especializadas que

secretam hormônios quando a luz entra nos olhos do inseto. Quando essas células são retiradas e implantadas na cavidade do corpo de outra barata cuja cabeça foi retirada, continuam a funcionar como antes. O inseto sem cabeça permanece durante vários dias a correr na parte do dia em que a fase de secreção das células implantadas foi regulada pelo experimento de claro-escuro da barata doadora.

Porém, outros experimentos indicam que existe um segundo processo circadiano no ritmo das atividades de busca por alimentos da barata. Esse segundo relógio influencia a regulação do relógio-mestre (evitando que seja regulado novamente por raios de luz eventuais, como transições da sombra para a luz do Sol), mas situa-se fora do gânglio subesofágico. Isso torna improvável uma solução simples para o problema da natureza e da localização precisas do mecanismo completo que controlaria os ritmos circadianos e outros nos animais.

Nos animais superiores, inclusive no homem, o relógio-mestre possivelmente encontra-se no sistema nervoso central. Há aproximadamente 40 anos constatou-se que o cérebro humano está sujeito a uma atividade rítmica incessante causada por correntes elétricas. A análise harmônica dos eletroencefalogramas é complicada, mas foram reconhecidos quatro tipos básicos de ritmo, cada qual com uma frequência específica. O mais fácil de detectar, especialmente quando os olhos estão fechados e o paciente está relaxado, é o “ritmo alfa”, de cerca de dez ciclos por segundo. É provável que esse ritmo tenha a ver com uma diminuição de processamento de informações, pois é mais marcante durante exercícios de meditação (zen e ioga), e o objetivo desses exercícios é isolar a pessoa de todas as formas de estímulo externo.

Há evidência de que a predominância do ritmo alfa quando o cérebro está em descanso deve-se às flutuações sincronizadas de grandes grupos de células, enquanto a atividade elétrica do cérebro alerta é de uma voltagem mais baixa e corresponde às atividades altamente diversificadas de várias de suas partes. Além disso, como podemos gerar o ritmo alfa artificialmente submetendo o olho a uma tremulação visual com cerca de dez variações por segundo, é possível que o ritmo natural seja uma resposta do cérebro à tremulação ocasionada pelas suas próprias oscilações internas. Mary Brazier e seus colegas de Boston constataram que certas oscilações locais do cérebro tendem a entrar em fase umas com as outras.

Quaisquer que sejam os osciladores do cérebro, e ainda que sejam discordantes, eles tendem a produzir um sistema complexo comparativamente bem ajustado.

Só recentemente começamos a compreender a verdadeira natureza e o significado dos ritmos biológicos. Para funcionar de forma adequada, um organismo deve controlar o *timing* de seus processos fisiológicos e, se necessário, preparar-se para certas mudanças previsíveis do meio ambiente, como as diferentes estações do ano. Portanto, o organismo precisa ter um sentido de tempo, que hoje sabemos ser oferecido pelos relógios biológicos, alguns dos quais têm correlatos externos, especialmente os relógios circadianos. O organismo vivo não pode ser inteiramente explicado em termos desses conceitos físicos e químicos sugeridos apenas pela sua dissecação, pois os relógios biológicos não podem ser estudados dessa forma se a duração do tempo estiver intimamente associada a órgãos específicos que podem ser isolados. Na biologia moderna, os aspectos de *tempo* da vida estão se tornando cada vez mais importantes. Seu estudo nos ajudará a compreender, em particular, como nós mesmos funcionamos. Pois embora nosso sentido cognitivo de tempo pareça ser consideravelmente controlado por fatores sociais, psicológicos e metabólicos, esses fatores se sobrepõem ao ritmo de inúmeros relógios biológicos que batem dentro de nós, muito abaixo do nível da consciência.

¹ C.F. Ehret, do Laboratório Nacional de Argonne, Estados Unidos, argumentou que, associado ao sistema de controle do metabolismo do ácido nucléico, há um mecanismo de relógio celular.

A Medida do Tempo

Já vimos que a função dos relógios biológicos é capacitar os organismos vivos a produzirem as reações necessárias nas horas apropriadas. Da mesma forma, os calendários usados pelas civilizações anteriores e o calendário gregoriano que ainda empregamos foram originalmente criados para que as cerimônias religiosas pudessem se realizar nas datas corretas. Para funcionar com eficácia, os relógios biológicos (com correlatos externos) e os calendários criados pelo homem usam pistas fornecidas pelos movimentos da Terra, do Sol e da Lua. Embora, no que diz respeito ao homem, já se saiba há muito que a correlação de qualquer sistema de tempo com um determinado padrão é facilitada pela medida, só com o advento da ciência moderna o significado crucial disso tornou-se claro. As idéias de tempo que prevaleciam na Antigüidade e na Idade Média diferiam das nossas, não só em razão da crença generalizada de que o tempo é essencialmente cíclico, como também porque até cerca de 300 anos atrás a falta de relógios mecânicos confiáveis impedia sua medição exata.

A alternância do dia e da noite, responsável pela evolução dos relógios circadianos na maioria dos organismos, desde a alga unicelular às plantas e aos animais superiores, também exerceu uma influência generalizada na forma como o tempo era medido pelo homem. Em razão disso, o desenvolvimento do conceito moderno de homogeneidade do tempo foi dificultado, porque a escala de horas em geral adotada não era uniforme. Antes do século XIV, o sistema corrente de dividir o dia e a noite em 24 horas com duração igual era usado apenas por alguns astrônomos teóricos. Os períodos de claro e escuro eram divididos em número igual de “horas temporais”— *horae temporales*, como diziam os romanos. O número era em geral 12. Conseqüentemente, a duração de uma hora variava conforme o tempo do ano e, a não ser nos equinócios, uma hora do dia não era igual a

uma hora da noite. Por mais estranho que hoje pareça esse cálculo do tempo, vale lembrar que a maioria das atividades humanas ocorria durante o dia, e que as primeiras civilizações vinham de latitudes em que o período entre o nascer e o pôr-do-sol variava muito menos que nas regiões mais ao norte. Por outro lado, os astrônomos usavam horas padronizadas, conhecidas como “horas equinociais”— *horae equinoctiales*, que, no equinócio da primavera, coincidiam com as horas temporais.

Os únicos registradores mecânicos de tempo da Antigüidade eram os relógios de água, mas até o século XIV o instrumento mais confiável para marcar as horas era o relógio de sol. Esses dois tipos de relógio eram usados pelos egípcios. Mais tarde foram introduzidos na Grécia e, com o tempo, se espalharam por todo o Império Romano. Vitruvius, em registros de cerca de 30 a.C., descreveu mais de 12 tipos diferentes de relógios de sol. Descreveu também inúmeras clepsidras, ou relógios de água. Para obter um fluxo uniforme de água era preciso manter uma pressão constante. Para indicar as horas “temporais”, o ritmo do fluxo ou a escala de horas tinha de variar conforme a época do ano. Portanto, muitos relógios de água antigos eram instrumentos de complexidade considerável.

A primeira tentativa conhecida de produzir mecanicamente um padrão periódico do tempo foi um dispositivo ilustrado em um texto escrito em chinês por Su Sung, em 1092. O aparelho era movido por uma roda d’água que avançava passo a passo; a água era jogada em uma série de recipientes que se esvaziavam (ou deixavam a água escapar) a cada quarto de hora, quando o peso da água no recipiente era suficiente para inclinar uma balança romana. O mecanismo era destravado até a chegada do próximo recipiente abaixo da correnteza, e então travado de novo. Fazia-se uma verificação astronômica da contagem de tempo por um visor apontado para uma determinada estrela. Como a contagem de tempo era governada basicamente pelo fluxo de água, e não pela ação do escape em si, esse dispositivo pode ser considerado uma ligação entre as propriedades da contagem de tempo de um fluxo constante de líquido e as oscilações produzidas mecanicamente.

A distinção fundamental entre o relógio de água e o relógio mecânico, no sentido estrito do termo, é que o primeiro implica um processo contínuo (o fluxo de água através de um orifício), e o segundo é regido por um movimento mecânico que se repete continuamente. O relógio mecânico,

nesse sentido, parece ter sido uma invenção européia do final do século XIII. Já no fim do século XII, o mercado de relógios de água era tal que existia em Colônia uma guilda de relojoeiros que em 1220 ocupava uma rua especial, a Urlogengasse. No entanto, nos climas nórdicos, os relógios de água deviam ser um problema no inverno, quando o líquido congelava. No século XIV foram inventados os relógios de areia, eficazes somente para medir curtos períodos. Eram usados principalmente a bordo dos navios, para medir a velocidade pela contagem do número de nós feitos em uma linha amarrada a um tronco jogado na água, onde ficava boiando preso à popa, enquanto a ampulheta media um período em geral de meio minuto. Aliás, só no final do século XV o relógio de areia foi descrito como o atributo do Pai Tempo.

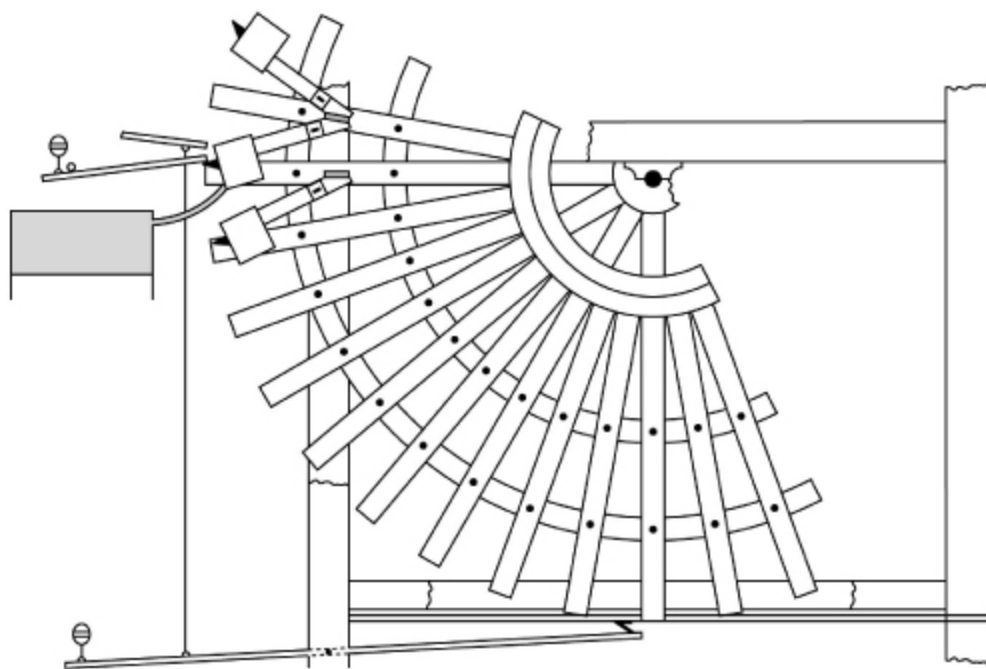


Figura 3: O relógio de água de Su Sung pode ser considerado um mecanismo de escape muito antigo. Uma vez a cada 24 segundos o peso da água em um dos reservatórios torna-se suficiente para pressioná-lo para baixo e desencatar a viga de contrapeso horizontal do alto. Isso permite que a roda dê mais um giro no raio, colocando um reservatório vazio debaixo da torneira de água. A trave com pouca articulação no alto, à esquerda, age como uma lingüeta de catraca, evitando o movimento para trás.

A palavra inglesa *clock* (relógio) é ligada etimologicamente à palavra francesa *cloche*, que significa sino. Os sinos tinham um papel importante na vida medieval, e é provável que os mecanismos para fazê-los tocar, feitos de rodas dentadas e alavancas oscilantes, tenham preparado o

caminho para a invenção dos relógios mecânicos. A invenção fundamental que tornou o relógio mecânico possível foi o escape em haste (em inglês *vergei*, palavra possivelmente derivada do latim *virga*, significando bastão ou vara). Era um dispositivo engenhoso em que uma barra pesada, ou *foliot*, girando perto do seu centro, era empurrada primeiro em um sentido e depois em outro por uma roda dentada movida por um peso suspenso de um tambor. A roda avançava o espaço de um dente a cada oscilação para frente e para trás da barra. Na Itália a barra era às vezes substituída por uma balança com um movimento alternativo similar. Ninguém sabe de quem é essa invenção, mas deve ter ocorrido por volta do final do século XIII ou início do século XIV. Como a barra não tinha um período natural próprio, o ritmo do relógio dependia da roda motora, mas era muito afetado por variações de fricção no mecanismo motor. Conseqüentemente, a exatidão desses relógios era baixa, e sua margem de erro era de pelo menos um quarto de hora por dia. Tornava-se comum um erro de uma hora.

Apesar da falta de exatidão, muitos relógios mecânicos públicos que tocavam as horas foram instalados nas cidades européias no século XIV. Os relógios tinham movimentos curiosos e complicados. Além disso, em vista da crença geral de que era necessário um conhecimento correto das posições relativas dos corpos celestes para o sucesso da maioria das atividades humanas, muitos dos primeiros relógios envolviam representações astronômicas elaboradas. O mais famoso foi o relógio de Estrasburgo, instalado em 1352. Desde 1400 há registros de que a realeza comprava relógios domésticos, mas até o final do século XVI eles eram verdadeiras raridades.

A invenção do relógio mecânico foi o passo decisivo que levou ao uso geral do sistema de cálculo de tempo em que o dia e a noite juntos são divididos em 24 horas. Na Itália, onde em 1335 foi instalado um relógio público em Milão, os relógios davam até 24 badaladas, e esse sistema persistiu naquele país durante vários séculos. A maioria dos outros países da Europa Ocidental, porém, logo adotou o sistema em que as horas eram contadas em dois grupos de 12 horas a partir da meia-noite e do meio dia. Na Inglaterra, as primeiras referências às horas “antes do meio-dia” e “depois do meio-dia” ocorreram por volta de 1380.

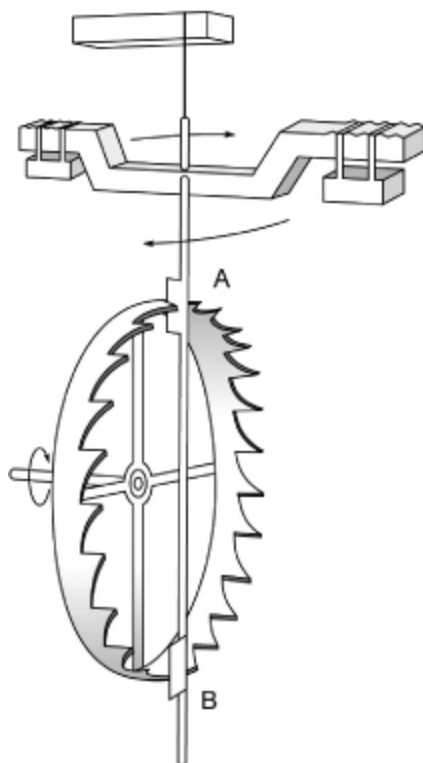


Figura 4: Haste de escape engenhosa e simples. A roda dentada — girando por efeito de um peso — é impedida de disparar por duas projeções no bastão ou haste vertical. No diagrama a roda está prestes a empurrar a projeção A para o lado, movendo dessa forma a barra com peso a 90°, e pondo a projeção B em posição de travar a roda. A haste e a barra devem então ser forçadas a inverter a oscilação antes de a roda poder avançar mais um dente.

Até meados do século XVII os relógios mecânicos tinham um só ponteiro e o mostrador era dividido apenas em horas e quartos de hora. Embora a divisão da hora em 60 minutos e do minuto em 60 segundos fosse usada em 1345 para expressar a duração de um eclipse lunar, não havia qualquer medida real a não ser uma computação teórica. (Essa forma de dividir a hora baseou-se no sistema sexagesimal de frações usado pelos astrônomos helênicos na Antigüidade, e antes deles pelos babilônios.) Mesmo depois da invenção do relógio mecânico, o desenvolvimento do conceito científico moderno de tempo foi seriamente dificultado pela falta de um meio mecânico exato para medir os intervalos curtos. Galileu, na primeira parte do século XVII, em sua famosa experiência baseada na velocidade das bolas rolando em um plano inclinado, mediu o tempo pesando a quantidade de água que emergia em um jato fino de um

recipiente com um furo. Tirou o polegar do furo no início da experiência e recolocou-o quando a bola chegou a um determinado ponto.

A origem da exata contagem moderna do tempo foi descoberta por Galileu a partir de um processo periódico natural que pode ser repetido infinitamente e contado: a oscilação do pêndulo. Seu interesse pelo pêndulo remonta à época em que, como estudante de medicina em Pisa, ele o aplicou à descrição diagnóstica do pulso de um paciente. A aplicação consistia em uma tábua com uma cavilha à qual se prendia um cordão com um peso que oscilava. Em certos lugares da tábua estavam registradas várias descrições diagnósticas, como “febril” e “vagaroso”. O médico tinha apenas de controlar o cordão oscilante com o dedo para fazer as oscilações entrarem em sincronia com o pulso do paciente e ler o diagnóstico indicado. Mais tarde, depois de muitos cálculos matemáticos nas experiências com pêndulos oscilantes, Galileu concluiu que cada pêndulo simples tinha seu próprio período de oscilação, dependendo do comprimento; já na velhice, pensou em usar o pêndulo no relógio para registrar mecanicamente o número de oscilações. Esse passo foi dado com sucesso anos depois, em 1656, pelo cientista holandês Christian Huygens, cujo relógio de pêndulo inaugurou a era da medida física do tempo com uma exatidão de cerca de segundos por dia. Essa medição podia ser considerada simplesmente uma repetição numérica, mas foi também um meio de dividir de modo uniforme um dado intervalo de tempo — por exemplo, uma hora em 60 minutos — e, assim, era análoga à divisão de uma linha contínua de duração finita em um número de segmentos iguais. Conseqüentemente, a invenção do relógio mecânico que, se bem regulado, podia bater continuamente por anos a fio, influenciou muito a crença na homogeneidade e continuidade quase geométricas do tempo.

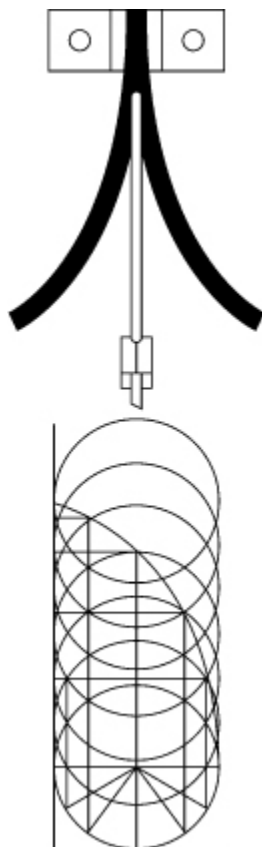


Figura 5: Confinado dentro de “abas” de metal em forma de curva cicloidal, o pêndulo só pode oscilar de tal modo que seu peso também descreva uma curva cicloidal, e não um arco de círculo. O ciclóide é a curva descrita por um ponto na circunferência de um círculo, girado ao longo de uma linha reta (ver diagrama). Huygens descobriu que o período de uma oscilação cicloidal independe do ângulo de oscilação.

Em termos mais exatos, o pêndulo simples de Galileu, cujo peso descreve arcos circulares, não é exatamente isócrono. Huygens descobriu que o isocronismo teoricamente perfeito (significando que o período de oscilação é o mesmo para todos os ângulos de oscilação) podia ser alcançado forçando-se o peso a descrever um tipo especial de curva geométrica conhecida como arco cicloidal. Essa constituía a essência da sua invenção. Por maior que fosse sua realização, particularmente do ponto de vista teórico, a solução prática máxima do problema só ocorreu depois da invenção de um novo tipo de escape. O relógio de Huygens usava o escape de tipo haste, mas, por volta de 1670, foi inventado outro tipo mais aprimorado, o de âncora, que interferia menos com o movimento livre do pêndulo.

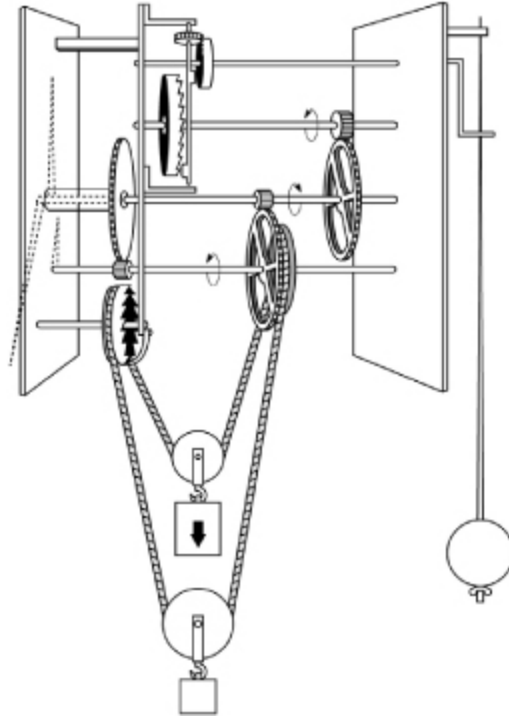


Figura 6: O primeiro relógio com pêndulo foi construído em 1656. Este diagrama, aberto, para maior clareza, baseia-se no próprio diagrama de Huygens e mostra como a haste de escape (no alto, no centro) deve ter afetado a oscilação do pêndulo até certo ponto, daí sua exatidão.

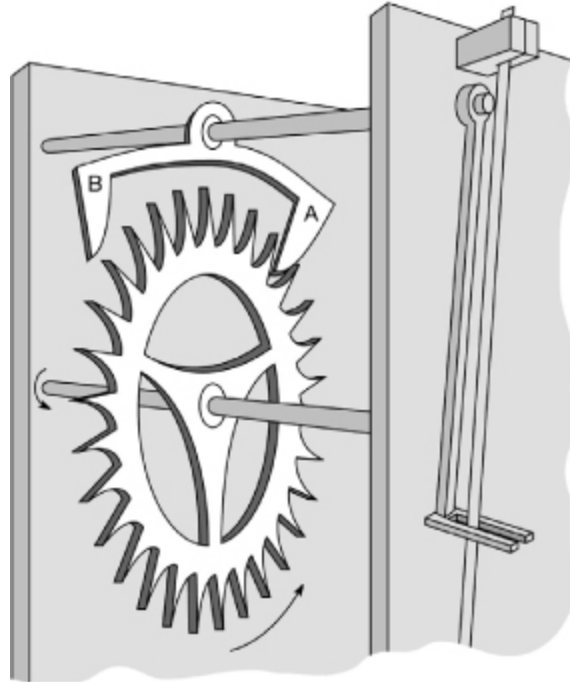


Figura 7: O escape em âncora deu maior exatidão ao mecanismo, pois a oscilação do pêndulo foi transmitida diretamente para a âncora. O diagrama mostra como o pêndulo, tendo oscilado para a esquerda, força a “forquilha” A entre dois dentes da roda. A oscilação para a direita levanta A, e a roda, movida pelo peso (não é mostrado aqui), gira até ser parada pela “forquilha” descendente B.

A exatidão de qualquer relógio mecânico depende não apenas de sua construção: ela deve ser checada pela referência constante a algum relógio natural. Ao longo da história, o padrão supremo de tempo derivou das observações astronômicas. No tempo certo, isso levou à hora, ao minuto e ao segundo, definidos como frações do período de uma rotação da Terra em torno do seu eixo, conforme determinado por cuidadoso estudo da aparente rotação diária da esfera celeste. Porém, há diferentes formas de se determinar isso. Na vida diária é conveniente definir o tempo pela posição da Terra com relação ao Sol, e o *dia solar médio* é o período de uma rotação da Terra com relação ao Sol, corrigido em todas as irregularidades conhecidas. Como a órbita da Terra não é bem circular, a velocidade relativa do Sol não é exatamente uniforme. Também, como o movimento aparente do Sol no céu não é feito ao longo do equador celeste (ou seja, a projeção do equador da terra no céu), o componente da sua velocidade paralela ao equador é variável. Portanto, para fins de cálculo do tempo, é definido um “Sol médio” que se movimenta a uma velocidade igual à média da velocidade do Sol real. A diferença entre o tempo solar médio e o

tempo solar aparente, dada em qualquer relógio de sol, é chamada “equação do tempo”. Pode ser positiva ou negativa; é positiva quando o meio-dia real precede o meio dia médio, e negativa quando o meio-dia médio precede o meio-dia real. (Desaparece quatro vezes por ano: em 15 de abril, 15 de junho, 31 de agosto e 24 de dezembro.) O segundo solar médio é definido como $1/86.400$ do dia solar médio.

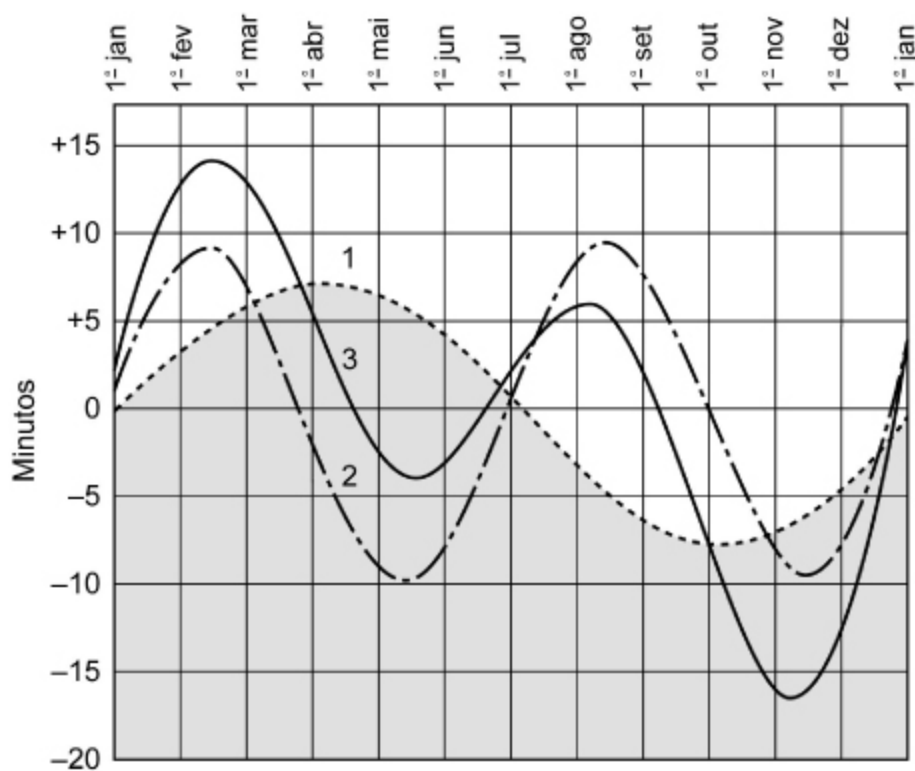


Figura 8: A curva da “equação de tempo”(3) é a soma de dois componentes. Como a órbita da Terra é uma elipse, e a distância Terra-Sol se altera ao longo das estações, é criada uma discrepância (curva 1). Como o aparente movimento anual do Sol pelo céu se faz ao longo da eclíptica, e não do equador, ele parece passar “mais depressa” ou “mais devagar” nas diferentes estações do ano (curva 2). Juntando as duas, teremos a curva 3 — a quantidade pela qual, em qualquer data, o dia aparente ou do relógio de sol difere da média ou do dia do relógio.

Apesar da sua conveniência na vida diária, o tempo solar é mais difícil de ser determinado com exatidão que o tempo sideral, baseado no tempo de trânsito das estrelas pelo meridiano. (O meridiano é a projeção no céu do círculo de longitude através do ponto na superfície da Terra em que foram feitas as medições.) O intervalo entre trânsitos sucessivos da mesma estrela, ou grupo de estrelas, é o *dia sideral*. Graças ao movimento orbital da Terra, como o Sol parece fazer uma revolução completa para o leste com

relação às estrelas ao longo de um ano (cerca de 365 dias e $\frac{1}{4}$ de dia), em um dia ele parece movimentar-se para leste com relação às estrelas a uma fração de $365 \frac{1}{4}$ de um circuito completo (360°), o que é próximo a 1° . Disso decorre que o dia solar é cerca de quatro minutos mais longo que o dia sideral. A fórmula para converter o dia sideral para o solar é: 1 dia solar médio = 1,0027379093 dias siderais, segundo observações que se estendem a dois séculos.

A padronização precisa da medição do tempo data da fundação do Observatório Real de Greenwich, em 1675. A necessidade de se ter um tempo exato, naqueles dias, foi sentida da primeira vez pelos navegadores. Sem um relógio que pudesse marcar com precisão a hora de Greenwich, era impossível determinar a longitude de um navio no mar, e muitas vezes acontecia de um navio desviar-se centenas de milhas do seu curso. A perfeição do cronômetro marítimo de John Harrison, por volta de 1760, foi um marco na padronização prática do tempo. Quase 50 anos antes, o governo britânico oferecera uma recompensa de 10, 15 e 20 mil libras a quem construísse cronômetros que pudessem fazer frente às condições do mar e determinassem, respectivamente, a longitude dentro de 60, 40 e 30 milhas (102, 720 e 54km). O instrumento de Harrison foi testado em uma viagem à Jamaica; e na volta a Portsmouth, em 1762, constatou-se que só dois minutos tinhamse perdido. Isso significava que a longitude de um navio no mar podia ser determinada dentro de 18 milhas (32,4km). Harrison, portanto, reivindicou a recompensa de 20 mil libras, mas, com o habitual cuidado nesses assuntos, o governo só lhe deu vários adiantamentos, e a soma total não foi recebida antes de 1773, quando Harrison tinha 80 anos. Ele morreu três anos depois.

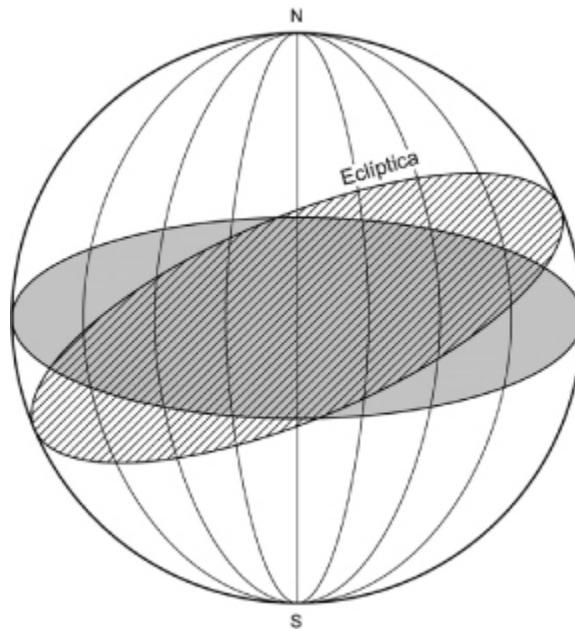


Figura 9: A projeção no céu do equador e dos meridianos de longitude da Terra é a forma convencional de se localizar um objeto no céu. Sobre essa projeção, o trajeto aparente do Sol, a eclíptica, é um círculo que corta o “equador” duas vezes em um ângulo de $23,5^\circ$, que é o ângulo de inclinação do eixo da Terra com relação ao plano da sua órbita.

A transposição bem-sucedida da hora de Greenwich para qualquer lugar do globo terrestre levou a uma importante mudança no método de calcular a medição do tempo. Como a hora solar, baseada na rotação da Terra, varia em quatro minutos para cada grau de longitude, foi necessário, em 1885, dividir o globo terrestre em uma série de fusos horários-padrões. Com o advento do rápido transporte aéreo, isso levou, nos últimos anos, a um novo tipo de doença, conhecida como *disritmia de vôo*, ou fadiga de fuso horário, sofrida por muita gente que faz uma longa viagem na direção de leste para oeste. Esse problema é uma consequência do desacordo resultante entre a hora local externa e o relógio metabólico do corpo, que regula as subidas e descidas da produção de energia, digestão e outras funções. Quando um passageiro sai de Nova York ao meio-dia e encontra-se sete horas depois em Londres, onde é meia-noite, seu relógio metabólico começa a pedir comida e a dar sinais de energia — na hora errada. O resultado é uma sensação de cansaço e irritação que dura de um a dois dias até o corpo se ajustar.

Embora na vida diária seja conveniente dividir o globo terrestre em diferentes fusos horários, para fins astronômicos e geofísicos os cientistas

do mundo inteiro usam o mesmo tempo, conhecido como *Tempo Universal* (UT). Este é definido como o tempo solar médio do meridiano de Greenwich e é calculado em uma base de 24 horas a começar da meia-noite. Outro artifício considerado útil para o cálculo cronológico de períodos mais longos é incluir os *dias julianos*, como foi proposto pelo grande erudito clássico J.J. Scaliger em 1582. Cada dia juliano começa às 12 horas UT, a partir do dia zero, em 1º de janeiro de 4713 a.C. O dia juliano que começou em 1º de janeiro de 1970 recebeu o número 2.440.588. A vantagem de usar os dias julianos é evitar as irregularidades nas durações de meses e anos.

Tempo preciso

Antes de se fundar o Observatório Real, os astrônomos acreditavam que a rotação diária da Terra era uniforme. O primeiro astrônomo real, John Flamsteed, percebeu que talvez não fosse assim. Em 1675, em uma carta a Richard Towneley, ele escreveu: “É questionável que a volta diária de qualquer meridiano na nossa Terra com relação a uma estrela fixa seja igual e isócrona em todas as épocas do ano.” De fato, embora a hora civil (distinta da hora astronômica) ainda se baseie na rotação da Terra, hoje se sabe que isso é sujeito a pequenas irregularidades. A Terra é um corpo sólido rodeado de água e ar, e seu tempo de rotação varia ligeiramente de uma estação para outra. E é também gradualmente retardado pelo efeito de fricção das marés. Além disso, outras pequenas mudanças imprevisíveis ocorrem de tempos em tempos no ritmo de rotação da Terra, o que é imprevisível.

Em 1963, J.W. Wells, da Universidade de Cornell, observou que as faixas de crescimento anual dos corais fósseis são formadas por picos de crescimento diário. A partir da contagem do número de aumentos diários por faixa anual, o número de dias em um ano foi determinado até o meio do período devoniano, quase 400 milhões de anos atrás. Deduziu-se também que a duração do dia há 600 milhões de anos era de menos de 24 horas.

Além da rotação em torno do seu eixo, a Terra gira em volta do Sol. Esse movimento fornece uma unidade natural de medida de tempo usada pelo homem, chamada *ano trópico*; definido como o tempo entre duas

passagens sucessivas do Sol pelo equinócio da primavera, é o ponto onde o Sol cruza a projeção do equador terrestre na esfera celeste na primavera. É do ano definido dessa forma que as estações e o calendário dependem, mas ele não é o mesmo que o tempo entre sucessivas passagens do Sol por um ponto fixo no céu, porque o equinócio tem um movimento retrógrado de 50,2 segundos de arco por ano. Essa precessão de equinócios, como é chamada, deve-se à força gravitacional que o Sol e a Lua exercem sobre a convexidade equatorial da Terra, o que faz com que o eixo da Terra gire, como o eixo de um pião, em um período de cerca de 25.800 anos. O ano trópico é igual a 365,2422 dias solares médios, enquanto o ano sideral é igual a 365,2564 dias.

Graças às pequenas variações imprevisíveis do movimento de rotação da Terra, os astrônomos decidiram introduzir, em 1956, uma unidade de tempo mais exata, baseada no movimento da Terra em torno do Sol. Essa unidade, conhecida como segundo do *tempo ephemeris*, difere ligeiramente do valor médio do segundo solar médio. É definida como a 31.556.925,9747 parte do ano trópico 1900.

Nos últimos anos, diante da necessidade crescente de uma medida de alta precisão, tornou-se desejável buscar um padrão de tempo mais fundamental que o originado das observações astronômicas. Esse padrão é o período natural de ondas eletromagnéticas características produzidas por um átomo ou molécula que vibra. As ondas eletromagnéticas, graças aos modos específicos de vibração, são de frequência muito precisa e formam “linhas” definidas no espectro. As linhas do espectro óptico não são adequadas ao uso como padrão de tempo porque não há meio de medir suas frequências diretamente. Certos átomos, porém, produzem frequências de rádio que podem ser medidas diretamente. Há mais de dez anos essa descoberta levou o físico britânico L. Essen a desenvolver o relógio atômico de césio ou frequência padrão. Os átomos de césio produzem ondas de rádio de cerca de 9.200 megaciclos por segundo, correspondendo a um comprimento de onda de cerca de três centímetros. Isto se situa, convenientemente, dentro do limite dos comprimentos de onda usados pelo radar, e as técnicas eletrônicas para lidar com essas frequências foram altamente desenvolvidas.

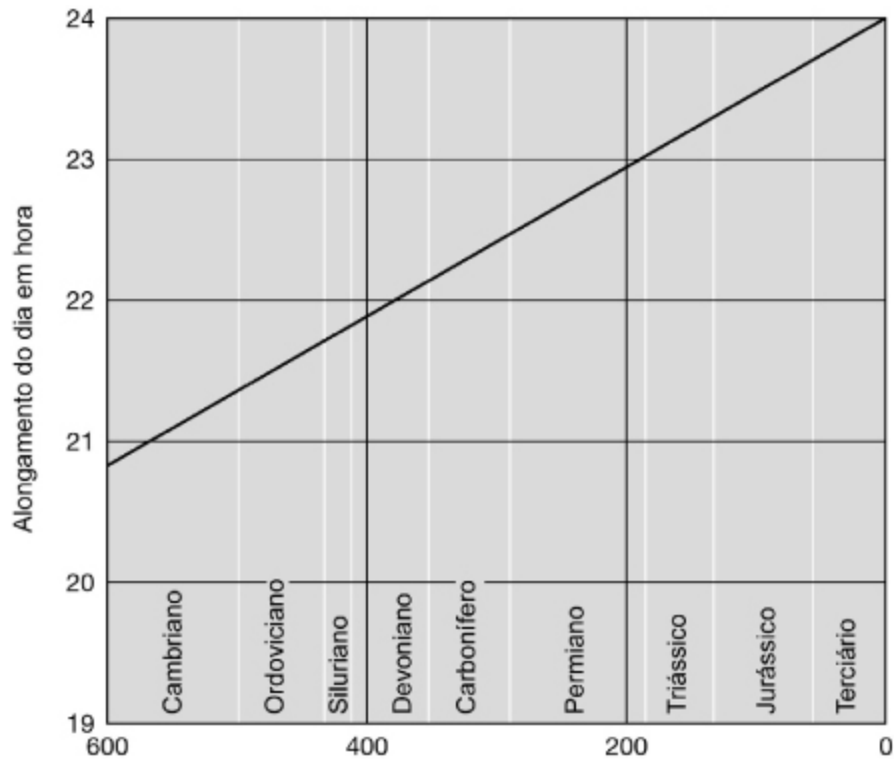


Figura 10: A desaceleração gradual da rotação da Terra resulta em um alongamento do dia menor que 21 horas no período cambriano para as 24 horas de hoje.

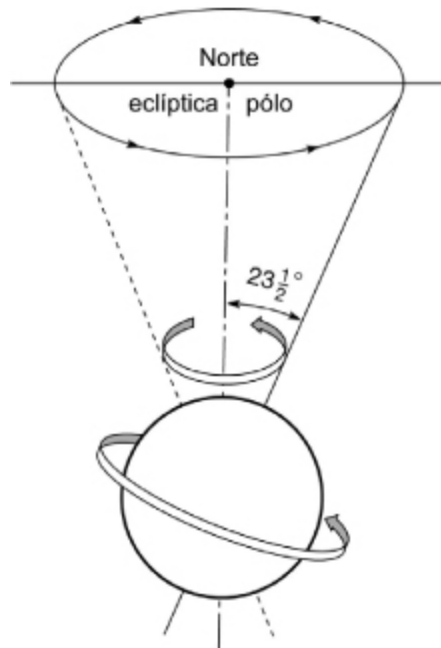


Figura 11: O eixo da Terra, como um pião girando, traça um caminho circular durante sua precessão. Não há nada fixado com relação a que corpo se dá o nome de estrela polar.

O tipo específico de vibração usada no relógio de césio é muito distinto da vibração do pêndulo oscilante. Um átomo de césio-133 tem um núcleo bastante pesado, rodeado por inúmeras camadas, como a casca de uma cebola, todas preenchidas com elétrons. A camada de fora tem um único elétron, que gira como um pião. O núcleo também gira, criando-se duas possibilidades: o elétron pode girar no mesmo sentido (direção) que o núcleo, ou no sentido oposto. Suprido de um pouco de energia, o elétron pode ser induzido a mudar o sentido no qual está girando. Quando volta, algum tempo depois, a energia suprida é liberada como uma emissão abrupta de ondas de rádio com frequência de 9.200 megaciclos por segundo.

O relógio consiste, na verdade, em um pequeno transmissor de rádio em sintonia com a frequência dos átomos de césio. O campo de oscilação magnética produzido pelo transmissor faz esses átomos ressoarem quando a frequência é correta, como um cantor pode fazer um copo de vinho vibrar e até mesmo quebrar cantando para dentro dele em sua frequência natural. O campo magnético pode ser sintonizado com as vibrações atômicas com extrema exatidão. O princípio geral implícito na medição exata das frequências do rádio pode ser comparado ao princípio usado para afinar um piano com a ajuda de um diapasão e do ouvido humano. O papel do ouvido é desempenhado por uma válvula de rádio, e o do diapasão, por uma frequência-padrão mantida em funcionamento contínuo. A partir daí cria-se outra frequência próxima à que deve ser determinada, e a pequena diferença dá origem a uma batida lenta, facilmente mensurável. Por exemplo, se a batida resultante, associada à medição de uma frequência de 200 mil ciclos por segundo, fosse de dois ciclos, e se isso fosse medido a 1% com a ajuda apenas de um cronômetro, a exatidão total dessa única medição seria de uma parte em dez milhões. Com esse exemplo vemos por que a medição de frequência pode levar à mais precisa de todas as medições físicas. Além disso, o padrão de frequência, comparado a outros padrões, como o da duração, tem a grande vantagem de poder ser comunicado pela transmissão de rádio e de estar disponível para uso em qualquer lugar onde haja um receptor adequado.

No caso do relógio de césio, a precisão da cronometragem é de cinco partes em dez milhões de milhões, o que corresponde a um erro de apenas um segundo em 150 mil anos. Isso independe absolutamente de determinações astronômicas de tempo e pode ser reproduzido com uma

exatidão maior que qualquer outra obtida de acordo com tais determinações. Como consequência, em 1967, uma nova definição de segundo foi introduzida em termos do período natural do átomo, e não em termos do movimento dos corpos celestes. Na verdade, ele foi definido como a duração de 9.192.631.770 períodos da radiação de césio-133 examinada anteriormente. Esse número foi escolhido para pôr a escala atômica de tempo em concordância aproximada com o ritmo médio do Tempo Médio de Greenwich (GMT) no século XIX.

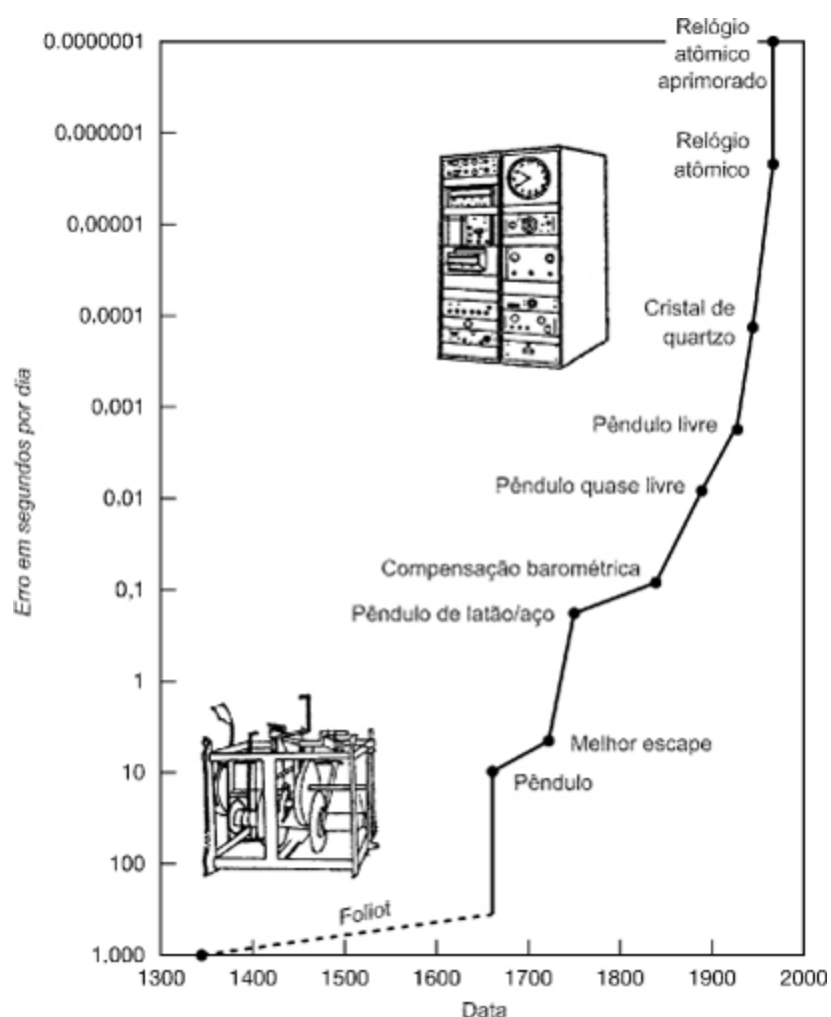


Figura 12: Do relógio do castelo de Dover, no século XIV, que podia ganhar ou perder cerca de um quarto de hora por dia, até a suprema sofisticação do relógio atômico, a marcação exata teoricamente atingível melhorou em uma taxa grosseiramente exponencial.

Durante a década passada, a rotação da Terra ficou mais lenta em comparação com seu ritmo médio, em números que variaram entre 1,8 e 3,2 milissegundos por dia. Alguns usuários dos sinais de rádio, para marcar

a hora, necessitam do tempo rotacional da Terra (GMT), outros necessitam de um tempo uniforme (TAI). O sistema adotado é manter os sinais em um ritmo constante (correspondente ao TAI) e introduzir adaptações no tempo (pular os segundos), quando necessário, para conservar os sinais bem próximos ao GMT, atendendo aos navegadores. Para os usuários que exigem uma aproximação melhor do GMT, a diferença é dada por código com uma exatidão de 0,1 segundo. Não há, porém, possibilidade de que a hora atômica venha a substituir o GMT, que permanecerá a base da hora do mundo como tem sido há quase um século. Acertou-se internacionalmente que, com uma reclassificação adequada, os segundos atômicos uniformes dos sinais do tempo serão mantidos a par com o GMT.

Perda de calor e radioatividade

Embora a idéia moderna de tempo tenha sua base na noção de avanço linear, todos os relógios e outros sistemas de medir o tempo discutidos até então dependiam essencialmente dos processos cíclicos. A primeira proposta de se usar um processo linear para medir o tempo parece ter sido apresentada pelo astrônomo Edmund Halley, em 1715. Ele mostrou que o mar tinha-se tornado salgado pela acumulação de material salino escoado pelos rios, e lamentava que os gregos antigos não “tivessem nos informado qual era o grau de salinidade do mar há cerca de dois mil anos”, para que a diferença entre a salinidade daquela época e a de hoje pudesse ser usada na estimativa da idade dos oceanos.

A sugestão de Halley foi revivida no final do século XIX. Supondo que as águas do oceano primordial fossem doces, e que a atual quantidade anual de sódio dissolvido retirado pelos rios da terra pudesse ser tomada como a média ao longo do tempo geológico, John Joly calculou, em 1899, que cerca de 90 milhões de anos se passaram desde que os oceanos foram formados. Hoje percebemos que essa estimativa era baixa demais, em parte porque o sódio liberado das rochas não se acumula todo no mar; uma parcela é reciclada pela evaporação ou soprada para a terra, e uma parcela se deposita em sedimentos marinhos. É também improvável que o ritmo de crescimento de salinidade dos oceanos tenha sido uniforme. Hoje acredita-se que as áreas terrenas do mundo são muito mais elevadas que no passado, e os rios, portanto, são muito mais ativos. A taxa atual em que o sódio é

depositado por eles no mar provavelmente é bem maior que a média no passado.

O relógio de sódio proposto por Halley é ineficaz por causa do nosso conhecimento inadequado dos fatores envolvidos no seu funcionamento. Outros relógios não-cíclicos propostos no século XIX para medir as idades da Terra e do Sol baseavam-se em suposições que pareciam difíceis de se rejeitar. Essas medidas diziam respeito à perda de calor. As temperaturas em minas fundas revelaram um aumento bastante uniforme com relação à profundidade, indicando que o calor flui do interior quente da Terra para a crosta externa, mais fresca. Essa perda de calor pode ser medida, e lord Kelvin argumentou que a Terra devia estar esfriando, teria sido mais quente no passado. A partir da taxa atual de perda de calor ele calculou a ordem de magnitude do tempo que se passou desde que a superfície da Terra derreteu, e concluiu que isso ocorreu entre 20 e 40 milhões de anos atrás.

Esse resultado era em geral coerente com um cálculo independente da idade do Sol. Depois da criação da lei de conservação de energia, Helmholtz considerou o problema da fonte de radiação do Sol. A queima química foi rapidamente considerada altamente inaceitável. Helmholtz sugeriu que o único mecanismo que podia manter o calor do Sol por mais de alguns milhares de anos era a liberação de energia pela contração gravitacional. Com base nessa hipótese, Kelvin calculou que o encolhimento do Sol ao seu presente tamanho não teria permitido que ele irradiasse por mais de 50 milhões de anos.

Os cálculos de Kelvin surpreenderam os geólogos e os seguidores de Darwin, cujas idéias necessitavam de condições de temperatura adequadas à manutenção da vida na superfície da Terra por períodos de tempo muito mais longos. No entanto, esses cálculos só puderam ser refutados quando se encontraram novas fontes para a manutenção do calor na Terra e no Sol. A descoberta da radioatividade por Henri Becquerel, em 1896, e a subsequente investigação do seu papel nos processos geológicos resolveram o dilema. Lord Raleigh calculou o calor gerado por minerais radioativos da crosta da Terra e mostrou que ele explicava facilmente o fluxo de calor na superfície. Ficou claro que as estimativas anteriores da idade da Terra, baseadas no esfriamento terrestre, eram pouco prováveis. A linha de pesquisa inaugurada pela descoberta de Becquerel também levou mais tarde a uma compreensão dos processos termonucleares considerados

hoje responsáveis pelo calor do Sol. Isso implica uma escala de tempo muito mais longa que a conjecturada por Helmholtz e Kelvin.

A descoberta da radioatividade literalmente marcou época, pois levou a métodos novos e muito mais precisos para medir o tempo geológico. Em 1902 Rutherford e Soddy anunciaram a famosa lei segundo a qual o número de átomos de um elemento radioativo que se desintegra na unidade de tempo é proporcional ao número de átomos presentes no elemento. Essa lei baseia-se no fato de que a probabilidade de um átomo fragmentar-se independe da sua idade e também da temperatura, da pressão e de outras características físicas do seu meio ambiente. Depende apenas do elemento específico em questão, pois a radioatividade é causada pelas instabilidades da estrutura dos núcleos e suas taxas são determinadas unicamente por essas instabilidades. Em outras palavras, a decadência radioativa é essencialmente um fenômeno nuclear envolvendo energias muito maiores que as correspondentes às ligações e às várias influências físicas externas às quais o elemento pode ser submetido. Ocorre que a taxa de degeneração do núcleo de um dado elemento pode ser usada como forma de medir o tempo. É o grande exemplo na natureza de um relógio linear não-cíclico.

Na prática, dois tipos de relógio nuclear são usados para medir o tempo: o *relógio de degeneração* e o *relógio de acumulação*. A não ser pelo urânio, o actino-urânio e o tório, todos os elementos radioativos que ocorrem naturalmente são produzidos a partir de outros elementos, através de alguma reação nuclear. Quando um elemento radioativo está sendo produzido em taxa constante em um determinado ambiente, ele aumenta em quantidade até chegar a um estado de equilíbrio secular, ou estabilidade, entre a produção e a decadência, e a quantidade total torna-se constante. Se uma parte for retirada e armazenada de modo que nenhum material lhe seja acrescentado, essa parte irá se desintegrar segundo a lei de Rutherford-Soddy, e a razão entre a quantidade existente após um certo intervalo de tempo e a quantidade originalmente isolada será a medida desse tempo.

Uma unidade conveniente de medida é a *meia-vida*, definida como o tempo necessário para que a metade de uma dada quantidade do elemento degenere. Em consonância com a lei de Rutherford-Soddy, é um intervalo fixo de tempo de um elemento específico, em princípio independente da quantidade presente. Na prática, os relógios de degeneração muitas vezes

não funcionam de forma satisfatória depois de ultrapassar cerca de dez meias-vidas, pelo provável erro na determinação da quantidade de material que ainda resta (cerca de uma parte em mil da quantidade original).

O exemplo mais conhecido de relógio de degeneração é o método de carbono-14. Esse elemento é produzido na atmosfera superior em resultado do seu contínuo bombardeio por partículas de raios cósmicos, que deixam muitos resíduos nucleares, inclusive alguns nêutrons. Esses nêutrons são absorvidos pelo nitrogênio-14 na atmosfera, que então emite um próton e muda para carbono-14. Esses isótopos radioativos de carbono comum têm uma meia-vida de cerca de 5.700 anos, tão curta que se torna seguro supor que nenhum carbono-14 seja primordial. O carbono-14 recém-produzido é incorporado ao dióxido de carbono da atmosfera e assimilado no ciclo de carbono, de modo que uma planta ou outro organismo que absorva dióxido de carbono recebe uma quota proporcional desse carbono radioativo. Quando o organismo cessa de absorver dióxido de carbono — por exemplo, quando a planta morre —, o relógio de carbono-14 começa efetivamente a bater, pois a proporção de carbono radioativo para o carbono comum diminui conforme a lei de degeneração. Esse método de datação depende de duas suposições importantes: que a taxa da produção de carbono-14 na atmosfera tenha-se mantido sensivelmente constante durante um período em que o método possa ser aplicado (até cerca de 40 ou 50 mil anos); e que a assimilação de carbono-14 pelo organismo seja rápida em comparação ao tempo a ser medido. Essas suposições são em geral satisfeitas, embora se haja constatado nos últimos anos que a primeira tem de ser um pouco modificada graças às flutuações que ocorreram na intensidade do fluxo dos raios cósmicos do espaço externo. Também deve-se levar em conta a interferência do homem na quantidade de carbono na atmosfera, com a queima de carvão e petróleo e a explosão de dispositivos termonucleares. Apesar dessas complicações, a datação de rádio-carbono forneceu aos arqueólogos e outros um instrumento novo e poderoso que tem apresentado resultados de importância fundamental. Por exemplo, permitiu que os rolos de pergaminho do mar Morto fossem datados com uma exatidão de aproximadamente cem anos, e levou à surpreendente descoberta de que o homem apareceu pela primeira vez na América do Norte só há cerca de 11 mil anos, tendo entrado na América Central e América do Sul logo depois.

O outro tipo de datação nuclear depende da acumulação de algum elemento secundário produzido pela degeneração do elemento radioativo primário. O relógio resulta da suposição de que o número de átomos do elemento secundário presente em uma dada época seja igual ao número de átomos do elemento primário que se desintegrou, sendo que este último número apresenta um tempo facilmente calculável pela lei de Rutherford-Soddy. A suposição é válida desde que não haja interferência do sistema externo e que nenhum átomo do elemento secundário já estivesse presente quando o sistema foi formado. Dessas limitações, a segunda é a mais grave. Muitas rochas satisfazem bastante bem a primeira condição para fins de determinação da idade, mas alguns átomos do mesmo elemento produzido pelos processos de decadência estavam em geral presentes no início. Portanto, em vez de supor que não havia átomo algum, então, os métodos devem ser planejados para estimar quantos na verdade havia. A relação medida das quantidades de elementos primário e secundário em um dado tempo pode ser usada para determinar a idade do sistema.

Dos muitos elementos radioativos de longa vida, apenas o urânio, o potássio e o rubídio deram origem aos relógios de acumulação, que foram muito usados. Os produtos finais mais estáveis da degeneração do urânio são o hélio e o chumbo. Ainda em 1906, Rutherford fez a primeira tentativa de medir a idade dos minerais por meio de sua relação urânio-hélio. Chegou a uma idade de 500 milhões de anos em duas amostras de minerais contendo urânio, mas percebeu que este devia ser um limite mínimo para as suas idades, pois como os minerais não são compactos, e sim porosos, um pouco do hélio devia ter escapado. Desde então confirmou-se reiteradamente que a maioria das idades de urânio-hélio são muito baixas, e esse método é hoje raramente empregado.

Em 1907, B.B. Boltwood, químico norte-americano, publicou as idades de urânio-chumbo para diversos minerais que iam de 410 a 2.200 milhões de anos. Embora o conhecimento posterior tenha mostrado que a ignorância de vários fatores complicantes levou a resultados muitas vezes elevados demais, seu trabalho tornou claro que o relógio de acumulação de urânio-chumbo podia ser usado para criar uma escala quantitativa razoavelmente confiável do tempo geológico. O uso bem-sucedido desse relógio de acumulação deve-se à própria meia-vida longa do urânio-239 — 4.500 milhões de anos. Em anos recentes, nosso conhecimento do tempo

geológico obtido dessa forma foi confirmado e complementado pelo uso dos relógios de potássio-argônio e rubídio-estrôncio.

Escalas de tempo

No desenvolvimento dos relógios artificiais modernos, ultraprecisos (como o relógio de célio), adequados para medir com exatidão intervalos muito curtos de tempo, e no uso de relógios radioativos naturais, para determinar os intervalos muito longos, está implícita a suposição de que todos os átomos de um dado elemento comportam-se exatamente da mesma maneira, qualquer que seja o lugar ou a época. A escala suprema de tempo é portanto baseada no nosso conceito das leis universais da natureza. Isso já era reconhecido em princípio, antes desses desenvolvimentos práticos, especialmente pelo grande matemático e filósofo da ciência francês Henri Poincaré (primo de Raymond Poincaré, estadista francês e presidente da França durante a Primeira Guerra Mundial).

Em um de seus ensaios, escritos há aproximadamente cem anos, ele argumentava que, embora tenhamos uma idéia absolutamente clara do que queremos dizer quando indicamos que um fato percebido é anterior, posterior ou simultâneo a outro, nós não temos uma intuição direta da igualdade de dois intervalos de tempo. Qualquer afirmação de igualdade de dois intervalos de tempo depende de uma definição que envolve um certo grau de escolha arbitrária. Isso porque mesmo os melhores cronômetros físicos devem ser corrigidos a toda hora. Poincaré declarou que os astrônomos não aceitavam bem a idéia de usar a rotação da Terra como medida exata de tempo porque as marés tendem a tornar essa rotação mais lenta. Em razão disso, há uma aparente aceleração rápida do movimento da Lua. Essa aceleração foi calculada com base nas leis de Newton. Em outras palavras, supôs-se que o tempo devia ser definido de tal modo que as leis de Newton pudessem ser válidas. Se fosse adotada alguma outra forma de medir o tempo, as leis de Newton provavelmente assumiriam uma forma mais complexa. Conseqüentemente, argumentou Poincaré, a definição adotada implicitamente pelos astrônomos significava que o tempo devia ser definido de tal modo que as equações da mecânica fossem as mais simples possíveis. Citando suas próprias palavras: “Não há uma forma de medir o tempo mais certa que outra; aquela geralmente adotada é apenas mais

conveniente. Entre dois relógios, não temos direito de dizer que um está certo e o outro está errado; podemos dizer apenas que é vantajoso nos adaptarmos às indicações do primeiro.”

Porém, Poincaré parece ter ignorado a possibilidade de que diferentes leis físicas possam, de fato, seguir diferentes escalas de tempo com passos diferentes. Por exemplo, o tempo medido pela lei de degeneração radioativa do urânio-238, com uma meia-vida de cerca de 4.500 milhões de anos, será o mesmo que aquele indicado pelas leis de Newton de dinâmica e gravitação usados para estudar os movimentos dos planetas apenas durante os últimos 300 anos? Esta é uma pergunta para a qual ainda não encontramos resposta.

Tempo e Relatividade

A invenção dos relógios mecânicos que, quando regulados de forma adequada, funcionam continuamente durante anos a fio influenciou muito a idéia da uniformidade e da continuidade do tempo. Essas características estavam implícitas na idéia do tempo físico adotada por Galileu, na parte sobre dinâmica dos seus famosos *Discursos sobre duas novas ciências*, publicados em 1638. Embora ele não fosse o primeiro a representar o tempo por uma linha reta geométrica, tornou-se o pioneiro mais influente dessa idéia por meio da teoria do movimento exposta nesse livro.

Para a primeira discussão explícita do conceito de tempo matemático devemos consultar a obra de Isaac Barrow, *Discursos geométricos*, escrita cerca de 30 anos depois da publicação do livro de Galileu. Suas idéias sobre a natureza do tempo, de grande interesse por si mesmas, são também muito importantes pela influência que exerceram sobre Newton, seu sucessor na cadeira lucasiana de matemática em Cambridge, em 1669. Barrow declarava que, como os matemáticos freqüentemente faziam uso do tempo, precisavam ter uma idéia clara do significado da palavra, caso contrário — como dizia ele — seriam uns impostores. Embora o tempo possa ser medido pelo movimento, ele tinha o cuidado de distinguir os dois:

O Tempo não denota uma existência real, mas uma certa capacidade ou possibilidade de uma continuidade de existência, assim como o espaço denota uma capacidade de intervir na duração. Tempo não implica movimento em termos da sua natureza absoluta e intrínseca, não mais do que implica inatividade; se as coisas se movimentam ou repousam, se nós dormimos ou acordamos, o Tempo segue seu curso uniforme. Tempo implica movimento a ser medido, sem o movimento não percebemos a passagem do Tempo. Evidentemente devemos considerar que o Tempo passa com um fluxo constante; portanto, deve ser comparado a algum movimento constante, como o movimento das estrelas e especialmente do Sol e da Lua.

Barrow salientou que

... para ser mais preciso, os corpos celestes não são as medidas originais do Tempo, e sim os movimentos que observamos à nossa volta pelos sentidos e que fundamentam os experimentos, pois a regularidade dos movimentos celestes é julgada com sua ajuda. Nem mesmo o próprio Sol é um juiz valioso do Tempo, ou deve ser aceito como uma testemunha veraz, a não ser que os instrumentos de medir o tempo atestem, por seus resultados, sua veracidade.

Barrow considerava o tempo um conceito essencialmente matemático que tinha muitas analogias com uma linha, pois esta só tem comprimento, é semelhante em todas as partes e pode ser vista como um simples acréscimo de instantes sucessivos ou como um fluxo contínuo de um instante. Para ele, o tempo podia ser representado por “uma linha reta ou por uma linha circular”. Embora a referência a “uma linha circular” mostre que Barrow não estava completamente emancipado das idéias tradicionais, seu postulado vai além de qualquer outro de Galileu, que usava apenas segmentos de linhas retas para indicar intervalos específicos de tempo. Barrow, porém, teve o cuidado de não forçar muito a analogia entre o tempo e uma linha. O tempo, a seu ver, era “a continuação de qualquer coisa no seu próprio ser”, e, em uma passagem a que faremos referência mais adiante, ele observou, “também não acredito que haja alguém que admita que essas coisas existiram em tempos iguais, que nasceram e morreram juntas”.

A idéia de Barrow — de que, independentemente de as “coisas se moverem ou não, de dormirmos ou acordarmos, o Tempo segue seu curso uniforme ” — repercutiu na famosa definição do início da obra de Newton, *Principia*, de 1687. “O tempo absoluto, verdadeiro e matemático”, escreveu ele, “por si mesmo e sua própria natureza, flui uniformemente, sem relação com qualquer fator externo.” Newton admitia que na prática talvez não houvesse um movimento uniforme pelo qual o tempo pudesse ser medido com exatidão, mas achava necessário que em princípio existisse um medidor ideal do ritmo do tempo. Portanto, acreditava que os momentos de tempo absoluto formavam uma seqüência contínua como os pontos de uma linha geométrica, e que o ritmo em que esses momentos se sucediam independia de todos os eventos e processos particulares.

A idéia de Newton de tempo absoluto, existindo por si só, é coerente com a idéia do senso comum, que quase todos nós temos, automaticamente, quando tentamos pensar sobre o tempo. Sentimos que o tempo é algo que não pode ter começo nem fim, e que deve continuar independentemente do que aconteça. A idéia de Newton causou profunda impressão no filósofo John Locke, que publicou em 1690 *Ensaio sobre o entendimento humano*,

três anos após *Principia* de Newton. Nesse livro encontramos a declaração mais clara sobre o conceito científico de tempo de todo o século XVII. Locke escreveu:

A duração é como se fosse o comprimento de uma linha reta estendida *in infinitum*, incapaz de multiplicidade, variação ou figura, mas é uma medida comum de toda a existência, dentro de todas as coisas enquanto elas existem, compartilhadas igualmente. Pois esse momento presente é comum a todas as coisas que agora existem, e engloba igualmente a parte de sua existência, como se elas fossem todas um único ser; e nós podemos verdadeiramente dizer que tudo existe no mesmo momento do tempo.

Apesar do seu atrativo para os leigos, a idéia de Newton de tempo absoluto fluindo em um ritmo uniforme, quaisquer que sejam os acontecimentos do mundo — de forma que continuaria igual mesmo que o Universo estivesse completamente vazio —, foi muitas vezes justamente criticada pelos filósofos. Essa idéia supõe que o tempo é um tipo de coisa e atribui a ele a função de fluir. Se o tempo fosse uma coisa que fluísse, ele próprio consistiria em uma série de eventos no tempo, mas isso não faria sentido algum. Além disso, se o tempo pode ser considerado isolado, “sem relação com qualquer fator externo”, como dizia Newton, o que significaria dizer que seu fluxo não é uniforme? E se não há significado nem mesmo para a possibilidade de um fluxo não-uniforme, de que adianta dizer que o tempo “flui uniformemente”?

Pode-se objetar que essa crítica é procedente, mas que não leva em conta o fato de Newton não ser um filósofo no sentido moderno do termo, mas um cientista basicamente preocupado com o uso prático de suas idéias fundamentais. Porém, infelizmente, sua definição de tempo absoluto não tem uso prático! Nós podemos apenas observar os eventos e processos reais da natureza e neles basear nossas medidas de tempo. O conceito de tempo de Newton implica que existe uma série única de momentos, e que os eventos deles são distintos, embora possam ocupar alguns deles. Newton foi levado a aceitar esse conceito não apenas porque desejava uma medida ideal para avaliar o tempo a fim de compensar a dificuldade de determinar uma escala de tempo *prática* verdadeiramente exata, mas também porque estava convencido de que devia haver um tempo absoluto e supremo na natureza.

A idéia de que momentos de tempo absoluto existem por si só foi rejeitada por Leibniz, contemporâneo de Newton. Ele argumentou que os eventos são mais fundamentais. A seu ver, os momentos são meros

conceitos abstratos, classes ou conjuntos de eventos simultâneos. Ele definiu o tempo não como uma coisa em si, mas simplesmente como a ordem na qual se dão os eventos. Baseou sua filosofia de tempo no princípio de que todo evento tem razão de ser de uma forma, e não de outra. Ele argumentava o seguinte:

Suponha que alguém pergunte por que Deus não criou tudo um ano antes, querendo dizer com isso que Deus fez uma coisa que não podia ter tido razão para fazer naquele tempo, e não em algum outro. Essa declaração seria correta se o tempo existisse independentemente das coisas. Então não haveria razão para as coisas existirem em certos instantes, e não em outros, e sua sucessão permaneceria a mesma.

Leibniz dizia que isso mostrava o absurdo de se imaginar que podem existir instantes quando não existem coisas. Conseqüentemente, não pode haver um modo de distinguir o Universo, como ele realmente é, de como ele seria se tivesse sido criado um ano antes.

A teoria de Leibniz de que os eventos são mais fundamentais que os momentos é conhecida como *teoria relativa do tempo*. Baseia-se na idéia de que nós derivamos o tempo dos eventos, e não o contrário. Isso significa, por exemplo, que devemos considerar que dois eventos são simultâneos não porque ocupam o mesmo momento de tempo absoluto, mas porque um ocorre quando o outro também ocorre. Para a correlação temporal de eventos que não são simultâneos é possível usar a seguinte idéia: podemos considerar todos os eventos simultâneos formando um estado particular do Universo, e esses estados ocorrendo um após o outro, como ontem, hoje e amanhã. A teoria de Leibniz é atualmente mais bem aceita que a de Newton porque, como veremos, é mais coerente com os desenvolvimentos modernos da física.

Nos séculos XVIII e XIX, porém, o ponto de vista de Newton era dominante, de modo que no início do século XX admitia-se genericamente que havia apenas um sistema universal de tempo e que ele existia por si só. Essa crença não se limitava aos cientistas: foi alimentada pela tendência crescente na civilização industrial para que a vida dos homens fosse regulada pelo relógio, particularmente depois da produção em massa de relógios baratos. Mesmo a divisão da superfície da Terra em fusos horários separados não minou muito a crença da natureza absoluta e universal do tempo. A introdução da “economia de luz” (horário de verão) no Reino Unido, em 1916, durante a Primeira Guerra Mundial, foi recebida com

fortes protestos, não só daqueles que o consideravam inconveniente, mas também dos que achavam um ultraje interferir com “O Próprio Tempo de Deus!”. As pessoas mais sofisticadas percebiam que a escolha da hora zero e das unidades de tempo podia ser alterada para atender às conveniências do homem, mas acreditavam que esses eram os únicos aspectos arbitrários na concepção de tempo, tudo o mais nele era único e inalterável. Na verdade via-se o tempo como uma espécie de lâmina em movimento, que cobria todos os pontos do Universo simultaneamente. Havia uma aceitação geral das opiniões de John Locke, citadas acima, de que “a duração é uma medida comum de toda e qualquer existência”, e que “o presente momento é comum a todas as coisas agora existentes”. Portanto, foi um grande choque quando, em 1905, Einstein descobriu uma lacuna que tinha passado despercebida na teoria da medida do tempo e que o fez rejeitar suas suposições e toda a filosofia do tempo a elas associada.

Relógios parados e relógios em movimento

O ponto de partida das investigações de Einstein sobre a natureza do tempo foi seu desejo de conciliar a teoria eletromagnética da luz, de James Clerk Maxwell, com o resto da física baseada nas leis da mecânica de Newton. Em um dos corolários dessas leis estabelecidas por *Principia*, em 1687, Newton declara que “Os movimentos dos corpos incluídos em um dado espaço são os mesmos entre si, esteja esse espaço em repouso ou seguindo uniformemente em linha reta”. Isso significa que todos os experimentos puramente mecânicos devem dar os mesmos resultados, sejam eles realizados em um laboratório estacionário na superfície da Terra ou em um navio movendo-se constantemente em certa direção. Por exemplo, uma pedra que cai da mão de alguém desce em linha reta, com a mesma aceleração constante em ambos os casos. Embora esse princípio de relatividade fosse considerado universalmente válido para corpos materiais, parecia divergir da teoria de Maxwell da radiação eletromagnética. A luz e outros efeitos eletromagnéticos eram considerados distúrbios ondulados, propagados por um agente universal estacionário, o éter luminescente, com uma velocidade em geral indicada pela letra c , de cerca de 300.000km por segundo. Entretanto, não obstante o grande sucesso da teoria de Maxwell — que em particular levou Hertz a demonstrar a existência das ondas de rádio —, houve algumas sérias dificuldades conceituais associadas à idéia do éter luminescente.

Uma das mais intrigantes ocorreu com Einstein aos 16 anos de idade. Ele tentou imaginar o que observaria se viajasse pelo éter com a mesma velocidade de um raio de luz. De acordo com a idéia habitual de movimento relativo, o raio de luz deveria parecer um campo eletromagnético espacialmente oscilante *em repouso*. Mas esse conceito não era conhecido pelos físicos e divergia da teoria de Maxwell. Einstein considerou que as leis da mecânica e todas as outras leis da física, inclusive as referentes à propagação da luz, deviam ser as mesmas para todos os observadores, por mais depressa que eles se movessem, mesmo que isso entrasse em conflito com a hipótese do éter luminescente. Então começou a se convencer de que o princípio de relatividade aplicava-se tanto aos fenômenos eletromagnéticos quanto aos mecânicos, e que a velocidade da

luz não só era a mesma para todos os observadores em repouso relativo como para os que se encontrassem em movimento uniforme relativo.

Entretanto, só depois de anos de estudo é que Einstein sentiu-se forçado a aceitar essa conclusão, pois ela se conflitava com as idéias tradicionais referentes à medição do movimento. Finalmente, partiu para a análise das suposições subjacentes à forma de medir o movimento, e viu que esta devia depender da forma de medir o tempo. Ocorreu-lhe então que a medição do tempo depende da idéia de simultaneidade. Citando suas próprias palavras, “todos os julgamentos em que o tempo é considerado são sempre julgamentos de *eventos simultâneos*”. Embora essa declaração seja muito ampla, o que Einstein queria dizer é que todas as *medições de duração* envolvem julgamentos de simultaneidade — isto é, a coincidência no tempo de um evento com uma posição específica dos ponteiros de um relógio. De repente ele se deu conta de que, embora essa idéia fosse perfeitamente clara e indiscutível com relação a eventos imediatos próximos, não era tão clara para eventos distantes. O trecho crucial do seu trabalho de 1905 é o seguinte:

Se quisermos descrever o movimento de um ponto material, damos os valores de suas coordenadas como funções do tempo. Mas precisamos ter em mente que uma descrição desse tipo só tem significado físico se formos bem claros quanto ao que entendemos por “tempo”. Devemos levar em conta que todos os julgamentos em que o tempo é considerado são sempre julgamentos de *eventos simultâneos*. Se, por exemplo, eu disser “que aquele trem chega aqui às sete horas”, quero dizer mais ou menos o seguinte: “o ponteiro pequeno do meu relógio marcando sete horas e a chegada do trem são eventos simultâneos”.

Pode parecer possível superar todas as dificuldades referentes à definição de ‘tempo’ substituindo a “posição do ponteiro pequeno do meu relógio” pelo “tempo”. E, na verdade, essa definição é satisfatória se estivermos interessados em definir um tempo exclusivamente para o lugar onde o relógio está localizado; mas não é satisfatória quando temos de relacionar o tempo a uma série de eventos que ocorrem em lugares diferentes, ou — o que vem a dar no mesmo — de avaliar os tempos de eventos ocorrendo longe do relógio.

Einstein percebeu que o conceito de simultaneidade entre um evento distante e um próximo ao observador depende da posição relativa do evento distante e do modo de conexão entre o evento e a percepção que o observador tem dele. Se a distância de um evento externo for conhecida, e também a velocidade do sinal que o liga ao observador, ele pode calcular a época em que o evento ocorreu e relacionar isso a outro instante anterior de sua própria experiência. Esse cálculo será uma operação distinta para cada observador, mas até Einstein levantar a questão admitia-se tacitamente que,

quando conhecemos as regras segundo as quais o tempo da percepção é determinado pelo tempo do evento, todos os eventos percebidos podem ser levados a uma única seqüência objetiva de tempo, a mesma para todos os observadores. Einstein não só percebeu que devia considerar a hipótese de que todos os observadores, se calculassem corretamente, atribuiriam o mesmo tempo a um dado evento, como também apresentou razões convincentes para que essa hipótese fosse rejeitada.

Einstein admitiu que não há conexões instantâneas entre eventos externos e o observador. A teoria clássica do tempo, com a admissão de simultaneidade global de todos os observadores, pressupunha que houvesse essas conexões. Mas Einstein postulou que a forma mais rápida de comunicação é por meio de sinais magnéticos — inclusive raios de luz e ondas de rádio — no espaço vazio, e que a velocidade deles é a mesma para todos os observadores em descanso ou movendo-se uniformemente em linha reta. Considerou esse postulado uma consequência do seu princípio de que as leis da física são as mesmas para todos os observadores. Constatou que os observadores em movimento relativo uniforme seriam em geral levados a atribuir tempos diferentes para o mesmo evento, e que um relógio móvel pareceria andar devagar comparado a um relógio idêntico em repouso, com relação ao observador. Para as velocidades que encontramos na vida diária, esse efeito é insignificante, mas quanto mais a velocidade relativa do relógio em movimento se aproximar da velocidade da luz, mais lenta parecerá, se comparada ao relógio usado pelo observador.

Einstein constatou também que, segundo sua teoria, as leis de movimento de Newton — antes consideradas o fundamento de grande parte da física — tinham de ser modificadas, particularmente para corpos com movimentos rápidos. Por exemplo, a massa inerte de um corpo, anteriormente considerada independente de seu movimento, passou a ser vista aumentando indefinidamente, à medida que sua velocidade se aproxima da velocidade da luz. Conseqüentemente, quanto mais rápido esse corpo se mover, sua velocidade se alterará cada vez menos, pela ação de uma certa força. Disso resulta que nenhuma partícula de matéria pode jamais atingir a velocidade da luz. Dessa forma, Einstein solucionou o problema original referente ao observador que se move com a mesma velocidade de um raio de luz. Esse movimento é fisicamente impossível, sobretudo porque nenhum relógio pode ser transportado dessa forma; na

verdade, se um relógio se movesse com essa velocidade, sua ação seria interrompida e ele sempre registraria a mesma hora!

É sabido que a teoria da relatividade especial de Einstein, como é chamada, explicava automaticamente o fracasso da experiência de Michelson-Morley, realizada pela primeira vez em 1887, quase 20 anos antes da publicação de seu primeiro trabalho. O objetivo dessa experiência dos dois físicos norte-americanos era determinar o movimento da Terra com referência ao éter. Michelson acreditava que um instrumento muito sensível que inventara, conhecido como interferômetro, permitiria medir esse movimento. O instrumento produzia os padrões de interferência quando dois raios de luz eram reunidos, depois de serem transmitidos num vaivém ao longo de caminhos de comprimento igual, em ângulos retos um em relação ao outro. Esses padrões eram comparados às diferentes orientações dos caminhos e deviam mostrar alguma variação, dependendo da mudança dessas direções com relação ao movimento da Terra. Embora no curso de meio ano a Terra mude sua velocidade com relação à do Sol em 30km por segundo, numa direção até 30km oposta, sempre que a experiência foi realizada o resultado foi nulo. E o interferômetro era tão sensível que poderia ter detectado efeitos causados por uma velocidade de menos de 10km por segundo. Na verdade, se fosse possível realizar essa experiência nos dias em que a teoria de Copérnico ainda era discutida, ela teria sido considerada uma evidência conclusiva de que a Terra não se move, mas vive em repouso no centro do Universo! É claro que essa interpretação era bastante implausível no século XIX, e outra explicação para o fracasso da experiência de Michelson teria de ser buscada.

No início da década de 1890, Fitzgerald, na Irlanda, e Lorentz, na Holanda, sugeriram separadamente que o resultado nulo de Michelson podia ser explicado supondo-se que o comprimento de um corpo em movimento se reduz automaticamente pelo movimento de um certo fator dependente da sua velocidade. Esse fator, hoje conhecido como contração Fitzgerald-Lorentz, não seria perceptível a um observador que se move junto com o corpo, pois todos os seus instrumentos seriam afetados da mesma forma que os dele. Esse ponto de vista levou Lorentz a considerar o efeito das forças elétricas sobre a constituição eletrônica e atômica da matéria, com o objetivo de explicar por que essa contração ocorre do mesmo modo em todas as formas de matéria.

Em vez dessa complicada tentativa de explicação, um dos grandes méritos da teoria de Einstein foi explicar *automaticamente* o resultado de Michelson-Morley; segundo sua teoria, a velocidade da luz é invariável, portanto deve ser a mesma ao longo de ambos os caminhos, qualquer que seja a orientação e o movimento da aparelhagem. O resultado nulo de Michelson era, portanto, uma forte evidência confirmatória da teoria de Einstein. Além disso, em vez de admitir que havia mudanças estruturais reais na constituição da matéria graças ao movimento, a teoria de Einstein referia-se apenas às mudanças aparentes, ou seja, mudanças relativas ao observador.

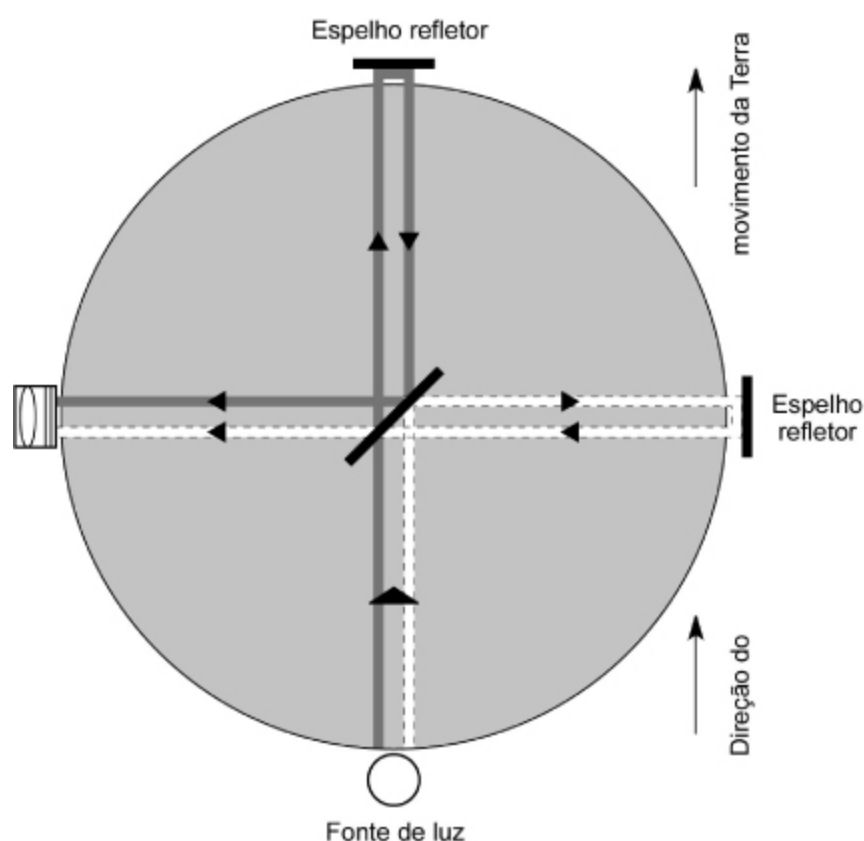


Figura 13: Diagrama simplificado do experimento Michelson-Morley. Um raio de luz é dividido por uma superfície semi-espelhada em dois raios que seguem caminhos de comprimento idêntico, em ângulos retos. Reunidos no interferômetro (esquerda), eles deveriam formar padrões variados de interferência, quando a orientação do mecanismo foi mudada e quando se alterou a direção de trajeto da Terra pelo do “éter” hipotético.

A mesma conclusão aplicava-se também ao aparente atraso de um relógio em movimento relativo uniforme, quando comparado à chamada *hora apropriada*, marcada por um relógio similar em repouso relativo ao

observador. Na teoria de Einstein, esse fenômeno de “dilatação do tempo”, como é hoje chamado, é um fenômeno essencialmente de medição, aplicável a todas as formas de matéria, inclusive os organismos vivos, e é de efeito recíproco no seguinte sentido: se *A* e *B* forem dois observadores em movimento relativo uniforme, o relógio de *B* com relação ao de *A* parece atrasado, e o relógio de *A* com relação ao de *B* idem. Essa relação de reciprocidade deixa de valer se as forças são aplicadas para mudar o movimento de um dos observadores. Especialmente se *A* e *B* estiverem juntos em algum instante, e um instante depois o movimento de *B* for invertido pela intervenção súbita de uma força, até que ele finalmente volte para *A* com a mesma velocidade com que saiu, o tempo decorrido entre o instante em que *B* deixou *A* e o instante em que voltou será mais curto segundo o relógio de *B* que o de *A*.

Essa extraordinária conseqüência da sua teoria do tempo (em geral chamada “paradoxo do relógio”) foi salientada por Einstein em seu trabalho de 1905. Seis anos depois ele a apresentou sob uma forma mais gráfica, para enfatizar que quanto mais a velocidade relativa se aproximasse da velocidade da luz, maior seria a discrepância entre os dois relógios. Einstein disse:

Se colocássemos um organismo vivo em uma caixa, ... seria possível providenciar para que o organismo, depois de um vôo arbitrariamente longo, fosse reconduzido ao seu ponto original em uma condição quase inalterada, enquanto os organismos correspondentes, que haviam permanecido nas posições originais, teriam há muito tempo dado lugar a novas gerações. No organismo em movimento o tempo de duração da jornada foi um mero instante, desde que o movimento tenha ocorrido com a velocidade aproximada da luz.

Conseqüentemente, embora aceitemos a idéia de Barrow de que o “tempo é uma continuação de qualquer coisa no seu próprio ser”, a teoria da relatividade especial não permite que concordemos incondicionalmente com ele quando diz: “também não acredito que haja alguém que admita que essas coisas existiram em tempos iguais, que nasceram e morreram juntas”.

A prova direta da existência da dilatação do tempo originou-se do estudo dos fenômenos dos raios cósmicos. As partículas elementares conhecidas como mu-mésons, produzidas por chuvas de raios cósmicos, desintegram-se espontaneamente; sua duração média de vida característica (isto é, o tempo a partir da produção até a desintegração, conforme o observador que esteja viajando com elas) é de cerca de dois microssegundos (dois milionésimos de segundo). Essas partículas são

produzidas basicamente em alturas de cerca de 10km acima da superfície terrestre. Portanto, as observadas no laboratório ou em placas fotográficas devem ter viajado essa distância. Mas em dois microssegundos a partícula que viajou com a velocidade da luz cobriria menos que um quilômetro, e, segundo a teoria da relatividade, todas as partículas viajam com velocidades menores que a da luz. Na verdade, constatou-se que a velocidade desses mu-mésons é muito próxima à da luz, e o fator correspondente de dilatação do tempo é de cerca de dez. É a quantidade necessária para explicar por que, para o observador de laboratório, essas partículas parecem viajar cerca de dez vezes mais longe do que viajariam na ausência desse efeito.

Nos últimos anos, a dilatação do tempo foi freqüentemente invocada para explicar fenômenos similares, observados no caso de partículas que se movem com velocidade próxima à da luz em aceleradores de alta energia.

Tempo relativista e tempo relativo

A teoria de Einstein da relatividade especial é incompatível com o conceito de Newton de tempo absoluto, mas pode ser vista como um desenvolvimento da teoria de Leibniz do tempo relativo. Embora o próprio Leibniz considerasse um sistema de tempo único, a idéia de que o tempo derivava dos eventos — que é a essência da sua teoria — é compatível com a existência de uma multiplicidade de sistemas de tempo associados com diferentes observadores.

Ao formular seu conceito de tempo absoluto, Newton referia-se à ordem sucessiva de eventos no tempo e ao ritmo com que eles se sucediam. A seu ver, eram coisas bastante distintas: a ordem temporal, ou seqüência de eventos antes e depois, não determina a duração do tempo decorrido entre um evento e outro. Ele acreditava que o ritmo em que os eventos se sucediam era determinado pelos respectivos momentos de tempo absoluto com os quais eles se relacionam e pelo que ele chamava de ritmo de “fluxo” do tempo. A definição de Leibniz de tempo como a *ordem* em que os eventos ocorrem não faz menção ao aspecto de duração de tempo; portanto, ao contrário da de Newton, não é incompatível com o conceito de dilatação do tempo. O Universo de Leibniz era composto de mônadas

(“átomos” dotados de poderes de percepção em graus variados) que ele considerava mutuamente independentes; mas seu famoso princípio da harmonia preestabelecida determinava que os estados de todas as mônadas em cada instante se comunicassem entre si. Leibniz ilustrava esse princípio comparando dois relógios tão perfeitamente construídos que mantinham um tempo perfeito entre si, sem influência mútua nem auxílio externo. Portanto, em termos de aspecto temporal do Universo, o princípio de harmonia de Leibniz equivale ao postulado de um tempo universal único. Devemos então descartar esse princípio se quisermos conciliar a forma de Leibniz ver o tempo com a teoria da relatividade de Einstein.

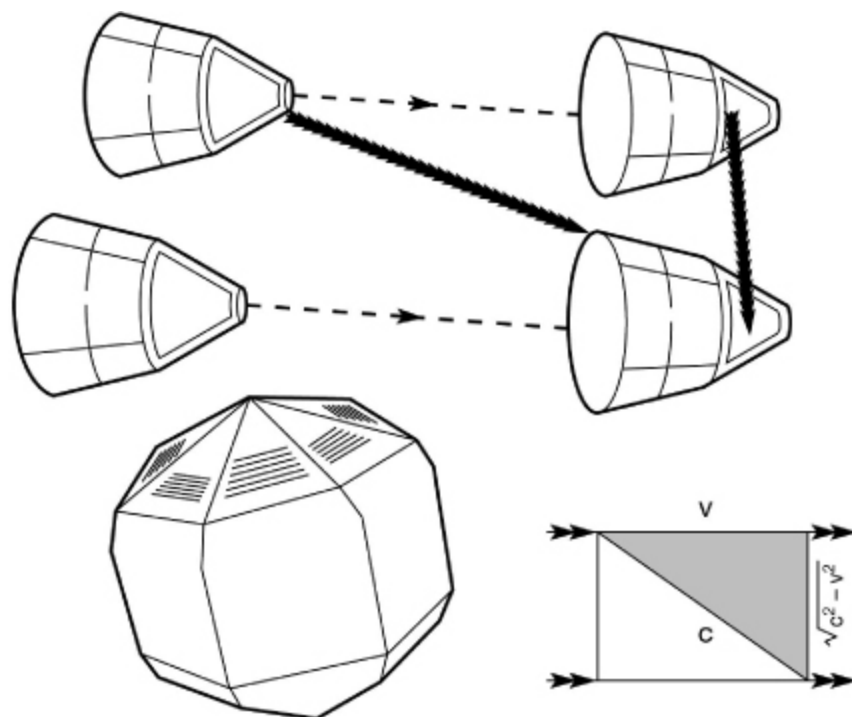


Figura 14: A velocidade invariante da luz proposta por Einstein tem estranhas implicações no tempo. Consideremos duas naves espaciais viajando em curso paralelo à mesma velocidade quando passam por uma estação espacial. No instante da passagem, uma nave espacial envia um sinal de luz para a outra. A nave receptora vê o sinal vindo reto; mas, da estação que vê as naves passando, o sinal parece ter cruzado na diagonal.

Podemos usar o teorema de Pitágoras para tornar isso mais claro. Se as naves estão passando pela estação a v quilômetros por segundo, em um segundo terão viajado v quilômetros. Se a velocidade da luz for de c quilômetros por segundo, o sinal terá percorrido c quilômetros naquele segundo, tal como percebido da estação. Mas, do ponto de vista de uma das naves, parecerá que ele terá percorrido apenas o terceiro lado do triângulo, $\sqrt{(c^2 - v^2)}$ quilômetros. Esse lado, em ângulos retos com a linha de movimento das naves espaciais, tem o mesmo comprimento tanto para o observador na estação espacial quanto para aqueles em um dos lados das naves espaciais. (Isso também é verdade na física relativista e na física clássica.)

Medida por uma estação ou nave, a velocidade da luz é a mesma, o que só pode significar que na nave o tempo passa mais lentamente quando comparado ao relógio da estação espacial. E vice-versa, é claro, pois este é um efeito recíproco.

Nós determinamos que cada observador, em descanso ou em movimento relativo uniforme, tem seu próprio sistema de tempo. Podemos então reformular, no interior da estrutura da teoria da relatividade especial, a teoria de tempo de Leibniz, que discutimos previamente apenas do ponto de vista clássico. Primeiro, definimos o *tempo próprio* de um observador como a ordem de sucessão dos eventos que ocorrem localmente. Em outras palavras, o tempo próprio do observador é aquele marcado pelo seu

relógio. Segundo, ele pode atribuir a qualquer evento que ocorra em outro lugar um *tempo coordenado*, calculado a partir do seu conhecimento da distância do evento no espaço, o tempo próprio de sua percepção e a velocidade de transmissão do sinal ligando o evento em questão a ele — em geral um sinal luminoso, um sinal de rádio ou alguma outra forma de sinal eletromagnético. No caso de um evento ocorrido localmente, o tempo coordenado coincide com o tempo próprio. Para um certo observador, todos os eventos do Universo aos quais ele atribui o mesmo tempo coordenado definem um estado instantâneo do Universo; e a ordem de sucessão desses estados define o tempo como um todo para ele. Assim, nós vemos que, enquanto para Newton o tempo independia do Universo, e para Leibniz era um aspecto deste, a teoria de Einstein nos leva a ver o tempo como um aspecto da relação entre o Universo e o observador.

Já vimos que, segundo a relatividade especial, a duração de tempo entre dois eventos depende do observador, e que isso é compatível com a idéia de tempo de Leibniz como a ordem de sucessão dos fenômenos se ignorarmos seu princípio de harmonia preestabelecida. Portanto, reformulamos a definição de tempo de Leibniz de maneira a não se referir mais a um sistema único de tempo, mas à variedade de sistemas de tempo associada à pluralidade de observadores. Poderíamos ainda esperar que, mesmo que o *intervalo* temporal entre dois eventos E e F dependam do observador, a *ordem* temporal na qual eles ocorrem — por exemplo, o evento E precedendo o evento F — independeria do observador, pois a ordem temporal está intimamente ligada à nossa idéia de causalidade. Ao contrário, porém, uma das conseqüências mais profundas da teoria de Einstein é que *em certas circunstâncias* a ordem temporal depende do observador.

Não é difícil descrever as circunstâncias em que isso pode ocorrer, embora um relato completo não possa ser feito sem o recurso da matemática (ver Apêndice). Suponhamos que, segundo um observador em cuja experiência E ocorre, mas F não, F venha depois de E , e esse intervalo de tempo entre eles seja t , e a distância um do outro seja r . Se r for menor que ct , sendo c a velocidade da luz, é possível para outro observador experimentar os dois eventos localmente. Só é preciso que o segundo observador coincida com o primeiro no evento E (seus relógios estejam acertados para marcar a mesma hora) e se movimente na direção de F com uma velocidade uniforme dada pela razão entre r e t para chegar no lugar

de F no instante em que F ocorrer. Como r é menor que ct , a velocidade relativa desse observador será menor que a velocidade da luz, sendo portanto permitida pela teoria. Conseqüentemente, os eventos E e F podem estar dentro da experiência local de um observador particular e F ocorrer depois de E na sua experiência, como está mostrado no Apêndice. O argumento pode ser invertido, de forma que, se F vier depois de E na experiência do segundo observador, o primeiro observador atribuirá a F um tempo que ocorre depois de E . Em termos mais gerais, não é difícil provar que, para todos os observadores considerados na relatividade especial, F será considerado ocorrendo depois de E .

Da mesma forma, se r for igual a ct , E e F podem ser conectados por um raio de luz (ou outro sinal eletromagnético), pois a velocidade dada pela razão entre r e t é exatamente c . Nesse caso, também F será considerado ocorrendo depois de E segundo todos os observadores. (Como já falamos, nenhum observador ou relógio pode ser transportado com a velocidade da luz.) Porém, se r for maior que ct , não haverá nenhum observador que experimente os dois eventos E e F , porque sua velocidade com relação ao primeiro observador teria de ser maior que c , e isso não é permitido. Mas, como se mostra no Apêndice, pode haver um observador para quem F pareça simultâneo a E , com o intervalo de tempo entre eles igual a zero. A velocidade relativa desse observador com relação ao primeiro observador é dada pela razão entre c^2t e r , que é menor que c . Além disso, haverá observadores com velocidades maiores que essa razão, mas menores que c , para quem o intervalo de tempo de E para F parecerá ser negativo; em outras palavras, F será realmente considerado ocorrendo *antes* de E .

O resultado ostensivamente paradoxal de que a ordem temporal de certos eventos pode realmente ser invertida por uma mudança apropriada do observador associa-se intimamente ao fato de que na relatividade especial nenhuma influência causal pode ser transmitida com uma velocidade maior que a da luz; porém, antes de Einstein formular essa teoria, admitia-se implicitamente que a transmissão simultânea podia ocorrer. Era portanto essencial na teoria pré-relativista que a ordem temporal dos eventos fosse absoluta, independente do observador. Por outro lado, é igualmente essencial na física relativista que isso se aplique apenas a eventos que possam ser causalmente ligados por uma influência transmitida com uma velocidade que não exceda à da luz. Dessa forma, a teoria do tempo de Einstein, apesar dos paradoxos aparentes, é

autoconsistente, desde que não tenhamos qualquer evidência empírica de que, na natureza, “as informações” podem viajar mais rápido que a luz.

Tempo, Gravitação e o Universo

Embora a teoria relativa do tempo seja hoje geralmente aceita, em 1901 Bertrand Russel argumentou contra a definição relativa de um momento como um estado particular do Universo. Declarou que não era *logicamente* absurdo imaginar a ocorrência separada de dois estados idênticos do Universo. De fato, como já vimos, essa possibilidade era por muitos considerada verdadeira antes do aparecimento da ciência moderna. Russel argumentou que, se definirmos um momento como um estado particular do Universo, iríamos deparar com o absurdo lógico de que dois momentos poderiam ser tanto diferentes quanto idênticos.

A fim de evitar essa dificuldade, não somos obrigados a voltar ao conceito de Newton de tempo absoluto. Ao contrário, a argumentação de Russell mostra uma distinção essencial entre as idéias de um *Universo* cíclico e de um *tempo* realmente cíclico. Os conceitos cíclicos de tempo tão amplamente aceitos no passado eram, para falar exatamente, expressões da idéia de que o Universo mantém os mesmos ciclos de processos e eventos.

Por outro lado, se o próprio tempo fosse realmente cíclico, ele seria fechado como um anel. Essa idéia é absurda. Pois se o tempo fosse cíclico nesse sentido, não haveria diferença entre o Universo com um único ciclo de eventos e uma seqüência de ciclos idênticos; qualquer diferença implicaria um tempo não-cíclico ao qual os diferentes ciclos poderiam ser relacionados e se distinguiriam uns dos outros. Além disso, a mesma argumentação também se aplicaria aos eventos iniciais e finais de um único ciclo. Pois se eles fossem realmente idênticos, não faria sentido pensar que ocorreriam separadamente. Na verdade, não podemos nem ao menos fazer uma viagem de ida e volta no tempo linear comum tal como podemos fazer no espaço; se isso fosse possível, poderíamos voltar ao nosso próprio passado e fazer alguma coisa a nós mesmos, que já sabíamos, pela

memória, que na verdade nunca tinha acontecido. Portanto, se o Universo se repetisse devíamos considerar a repetição de um certo estágio da sua história como um evento distinto de sua ocorrência prévia. Assim deve ser, mesmo que o tempo seja relativo, e não absoluto. Mas isso implica que o tempo deve ser visto como um aspecto fundamental do Universo não reduzível a qualquer outra coisa; a data torna-se uma característica essencial de um evento.

Espaço-tempo

A modificação da teoria relativa do tempo em resposta às exigências da teoria de relatividade especial de Einstein introduz uma nova complicação a essa argumentação. O tempo é um aspecto da relação entre o observador e o Universo; uma variedade de datas pode ser atribuída ao mesmo evento, dependendo da escolha do observador. Como então a data pode ser uma característica essencial de um evento? A crítica de Einstein do conceito clássico de simultaneidade parece descartar a possibilidade de uma seqüência *objetiva* de estados temporais do Universo, pois cada observador tem sua própria seqüência desses estados, e nenhum pareceria ser de forma alguma especialmente privilegiado.

Apesar de não haver nenhum observador especialmente privilegiado na teoria de relatividade especial, há uma *classe* privilegiada de observadores, ou seja, todos os que estão em descanso ou em movimento relativo uniforme. O movimento desses observadores é chamado *inercial*, e suas estruturas de referência (reticulados hipotéticos para localizar posições relativas a esses observadores) são chamadas *estruturas inerciais de referência*. Na física clássica, as leis de movimento de Newton — como por exemplo a lei que diz que uma partícula que não age por uma força externa está em descanso ou em movimento uniforme — são válidas apenas para observadores cujas estruturas de referência sejam inerciais.

Da mesma forma, na teoria da relatividade especial, as novas leis de movimento que substituem as leis de Newton são formuladas a respeito das estruturas inerciais de referência. Normalmente, na relatividade especial, consideramos apenas as estruturas inerciais, mas na teoria da relatividade geral de Einstein, introduzida por ele dez anos depois, todas as possíveis

estruturas de referência em todos os possíveis movimentos são consideradas em pé de igualdade. Segundo esse *princípio de covariância geral*, como é chamado, não há nenhum observador privilegiado. Conseqüentemente, a dificuldade de atribuir uma data única a um certo evento tornou-se ainda mais pronunciada; portanto, não foi surpresa alguma que, embora nos seus primeiros trabalhos Einstein tenha dado a maior contribuição desde o século XVII para a compreensão de tempo, no seu trabalho final esse conceito tenha tido um papel definitivamente subordinado.

A ligação essencial do desenvolvimento das idéias de Einstein sobre tempo, entre a publicação de suas duas teorias da relatividade, ocorreu por meio do conceito de espaço-tempo, introduzido pelo celebrado matemático Hermann Minkowski e exposto por ele em uma famosa palestra no simpósio científico em Colônia, em 1908. Em seguida a Einstein, Minkowski argumentou que “ninguém jamais percebeu um lugar a não ser em um tempo, ou um tempo a não ser em um lugar”. Um ponto no espaço em um ponto de tempo foi chamado por ele de “ponto de mundo”, e a totalidade de todos os pontos de mundo foi chamada de “mundo”. Uma partícula de matéria ou eletricidade que dure um tempo indefinido corresponderá nessa representação a uma curva que ele chamou de “linha de Universo”, cujos pontos podem ser classificados por leituras sucessivas de tempo que, pelo menos em princípio, poderiam ser exibidos por um relógio carregado pela partícula. “O Universo inteiro”, dizia ele, parece resumir-se em “linhas de Universo” similares; Minkowski sugeria que “as leis da física podem encontrar sua expressão mais perfeita como relações recíprocas entre essas linhas de Universo”.

O objetivo de Minkowski era encontrar um novo substituto para tempo e espaço absolutos de Newton descartados por Einstein. Em substituição a isso, ele defendeu seu “Universo” absoluto com diferentes “projeções” no espaço e no tempo para diferentes observadores em movimento uniforme. Esse “Universo” absoluto foi mais tarde chamado *espaço-tempo*.

A essência da análise de Minkowski pode ser descrita rapidamente. Na física pré-relativista, a distância espacial e o intervalo de tempo entre dois eventos ocorrendo em lugares diferentes e em horas diferentes são invariáveis, isto é, têm os mesmos valores para todos os observadores. Na relatividade especial, como já vimos, nenhum dos dois é invariável, seus

valores a respeito dos diferentes observadores em movimento relativo uniforme são sujeitos a efeitos de contração e dilatação de tempo de Fitzgerald-Lorentz. Minkowski descobriu que, se a distância espacial e o intervalo temporal entre dois eventos quaisquer (pontos de mundo) na relatividade especial são combinados de uma certa forma, o intervalo de espaço-tempo resultante é o mesmo, ou invariável, para todos os observadores em movimento inercial. Esse intervalo de espaço-tempo invariável é definido pela regra segundo a qual seu quadrado é igual à diferença entre os quadrados do intervalo temporal e da distância espacial entre os dois pontos de mundo em questão; as unidades de espaço e tempo são escolhidas de modo que em seus termos, a velocidade da luz seja a unidade. No espaço-tempo de Minkowski, a linha de Universo de qualquer observador ou partícula em movimento uniforme ou em descanso é representada por uma linha reta. Uma das peculiaridades da geometria do mundo de Minkowski é que, enquanto na geometria comum nenhum segmento de linha tem comprimento zero, há linhas de mundo ao longo das quais a distância espaço-tempo desaparece. São as linhas de mundo de luz e outras formas de radiação eletromagnética, conhecidas como caminhos de luz.

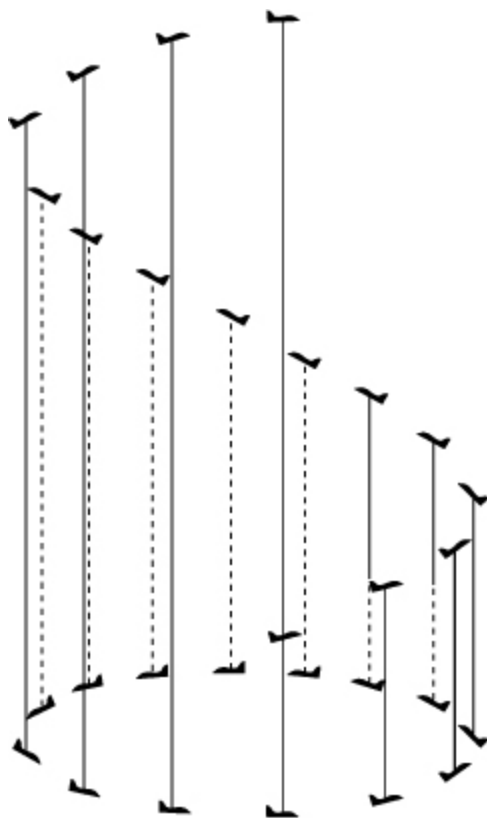


Figura 15: Um avião circulando em um aeroporto pode ser representado como descrevendo um círculo em um espaço tridimensional, ou, com o acréscimo da dimensão do tempo, pode ser representado como uma hélice. Esse é um exemplo de uma linha de universo no espaço-tempo.

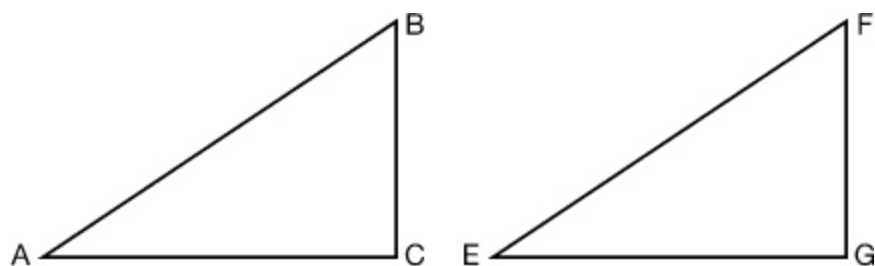


Figura 16: No espaço de Euclides, se AC e BC estiverem em ângulos retos, pelo teorema de Pitágoras, $AB^2 = AC^2 + BC^2$. No espaço-tempo de Minkowski, se E e F forem dois eventos, EG for o intervalo de tempo entre eles, e GF sua separação espacial, se as unidades de medida forem escolhidas de tal modo que a velocidade da luz seja a unidade, o intervalo do espaço-tempo EF será $EF^2 = EG^2 - GF^2$. Vale lembrar que, se o triângulo for isósceles e $EG = GF$, EF será zero.

O conceito de Minkowski de espaço-tempo provou ser uma das contribuições mais valiosas dadas à física teórica por um matemático. No seu entusiasmo ele exclamou: “Daqui em diante o espaço em si e o tempo

em si estão destinados a se tornar meras sombras, e só um tipo de união dos dois preservará uma realidade independente.” Essa declaração famosa, mas exagerada, tendia a reduzir muito mais a importância do tempo que a do espaço. Na verdade, o espaço-tempo de Minkowski foi visto como um novo tipo de hiperespaço no qual os eventos não ocorrem, nós simplesmente “esbarramos neles”. Como disse Hermann Weyl:

O campo de ação da realidade não é o espaço tridimensional, mas um *mundo quadridimensional*, no qual o espaço e o tempo se ligam indissoluvelmente. Por mais profundo que seja o abismo que separa a natureza intuitiva do espaço da natureza intuitiva de tempo na nossa experiência, nenhuma diferença qualitativa entra nos mundos objetivos que a física se esforça para cristalizar por meio de experiência direta. É um *continuum* quadridimensional, nem “tempo” nem “espaço”. Apenas a consciência que passa em uma porção desse mundo sente a parte destacada que vai encontrá-la e ultrapassá-la como história, isto é, como um processo existente no tempo e ocorrido no espaço.

Em outras palavras, a *passagem* de tempo deve ser vista como um mero aspecto da consciência, sem uma contrapartida objetiva. A teoria de Weyl, como a de Minkowski, era essencialmente a do “Universo em bloco”, o termo cunhado pelo psicólogo e filósofo americano William James para apresentar a hipótese de que o mundo é como a tira de um filme; as fotografias estão meramente ali e são meramente exibidas para nós. Segundo essa visão, mesmo que o *continuum* quadridimensional não seja “tempo” nem “espaço”, como diz Weyl, o conceito básico é evidentemente mais espacial que temporal.

Seguida a orientação de Minkowski, Einstein concluiu que o mundo objetivo da física é essencialmente uma estrutura quadridimensional, sua resolução em espaço tridimensional e tempo unidimensional não é o mesmo para todos os observadores. “Parece portanto mais natural pensar na realidade física como uma existência quadridimensional, e não, como se pensava antes, como a *evolução* de uma existência tridimensional”, escreveu ele.

Einstein e a gravitação

O princípio de covariância geral — que afirma que as leis da natureza podem ser expressas pela mesma forma matemática para *todos* os possíveis observadores, como os associados com estruturas inerciais em relatividade especial — foi aplicado por Einstein a um tipo mais geral de espaço-tempo que o introduzido por Minkowski para a relatividade especial. Embora a teoria da relatividade geral de Einstein envolva uma matemática muito mais sofisticada que sua teoria especial, seu ponto de partida era um novo princípio da física referente à natureza da gravitação, já formulado por ele em 1907, vários anos antes da idéia de covariância geral. A origem desse *princípio de equivalência*, como ele chamou, foi o reconhecimento do significado de longo alcance do fato de que, em qualquer pequena região em que a força gravitacional possa ser considerada uniforme, todos os corpos caem com a mesma aceleração, e por isso sem aceleração entre si. (Uma generalização da hipótese de Galileu de que o campo gravitacional da Terra transmite a mesma aceleração a todos os corpos que caem.)

O movimento em um campo gravitacional uniforme é portanto equivalente ao movimento uniforme com respeito a uma estrutura de referência com a aceleração correspondente. Para ilustrar isso, Einstein considerou a situação dentro de um elevador em *queda livre*. A experiência mecânica realizada dentro de um elevador assim apresentará os mesmos resultados que exibiria se nenhuma força gravitacional estivesse presente, e os corpos em questão não tivessem peso; por exemplo, quando esses corpos são arremessados, eles se movimentam em linha reta, e não em trajetórias parabólicas. (Experiências desse tipo foram realizadas nos últimos anos, não em um elevador em queda livre, mas em veículos espaciais na órbita da Terra, em que prevalecem condições similares à falta de peso.)

A partir de considerações desse tipo, Einstein concluiu que é sempre possível, no caso de um campo gravitacional *uniforme*, passar para uma estrutura de espaço-tempo na qual os efeitos da gravidade não irão operar. Na prática, os campos gravitacionais não são exatamente uniformes; por exemplo, o campo terrestre diminui quanto mais longe estivermos no espaço. No caso de campos não-uniformes, o princípio de Einstein deve ser modificado para se aplicar apenas a regiões muito pequenas, nas quais a aceleração gravitacional varia tão pouco que é efetivamente uniforme.

Assim, Einstein chegou à formulação final do princípio de equivalência: em qualquer ponto do espaço-tempo, é sempre possível selecionar coordenadas para que os efeitos da gravidade desapareçam em qualquer região em torno do ponto, que é tão pequeno que a variação espacial e temporal da gravidade naquela região pode ser desprezada.

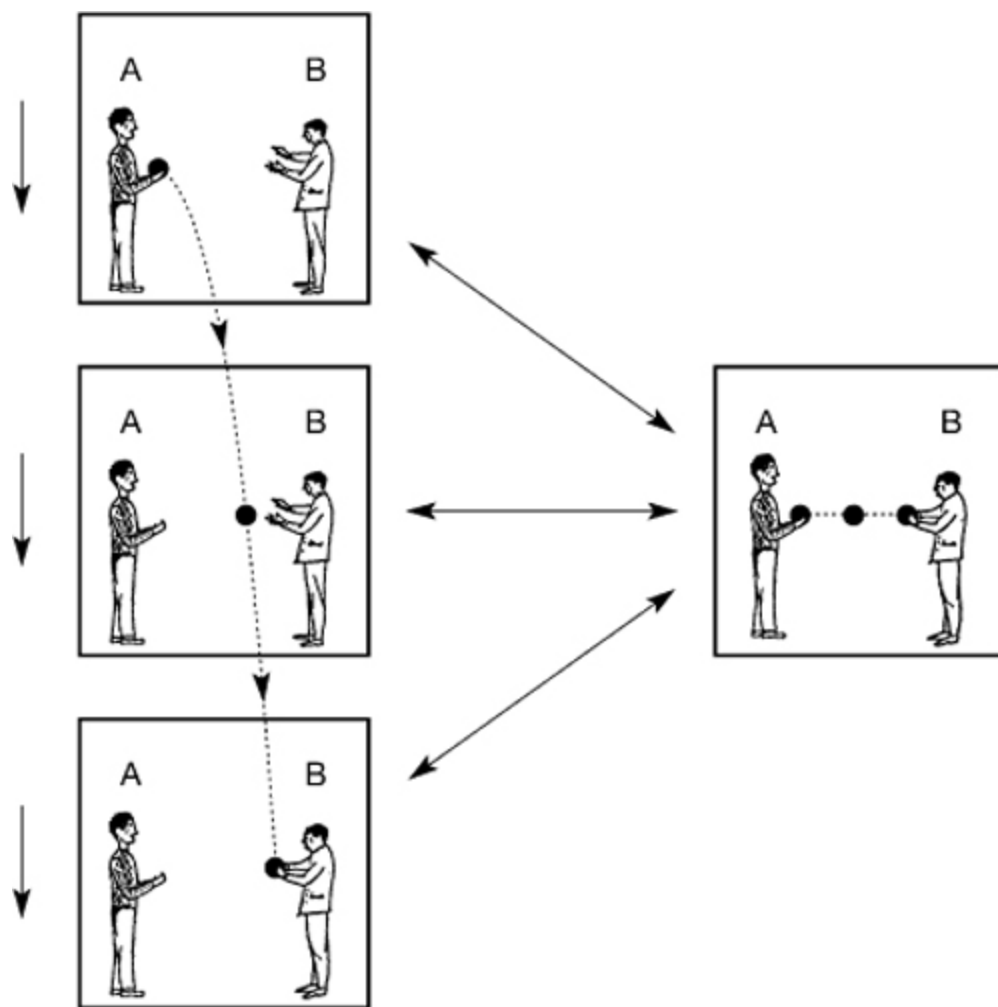


Figura 17: O princípio de equivalência de Einstein pode ser expresso como a declaração de que os efeitos de gravitação não podem, por si sós, se distinguir dos efeitos de aceleração. Dois homens em queda livre jogando uma bola um para o outro verão a bola fazer uma trajetória em linha reta, livre dos efeitos de gravidade. Mas o observador de fora, por quem eles passam de forma acelerada, vê a bola descrever uma curva parabólica, como ela faria em um campo gravitacional.

No seu trabalho definitivo sobre relatividade geral, publicado em 1916, Einstein combinou o princípio de equivalência com o princípio de covariância geral aplicado a um espaço-tempo e com um tipo geral de

geometria conhecida como riemanniana, em homenagem ao matemático alemão G.F.B. Riemann, que a introduziu em 1854. Ele também contou com dois princípios adicionais. O primeiro era um postulado de simplicidade: a lei da gravitação deve poder ser expressa de uma forma comparativamente simples, porém com a mesma forma matemática (isto é, covariante) para todos os possíveis observadores em qualquer tipo de movimento. O outro princípio adicional estava intimamente relacionado aos princípios de equivalência e covariância geral, podendo ser chamado de *princípio da validade geral da relatividade especial*. Declara que as leis da relatividade especial aplicam-se localmente a uma estrutura de referência espaço-tempo (ou sistema coordenado) com campo gravitacional desprezado. Portanto, a relatividade especial deve hoje pressupor um campo gravitacional insignificante quanto à condição de sua aplicabilidade. Embora a velocidade da luz no espaço vazio possa ser considerada de 300.000km/s em cada estrutura *local* de referência, desde que as mesmas convenções de medida sejam adotadas, na relatividade geral essa velocidade não será, em geral, uma constante universal por todo o espaço-tempo.

Esses princípios foram usados por Einstein para criar uma nova lei de gravitação conhecida hoje como *equações de campo de Einstein*. Esse conjunto de equações relaciona o campo gravitacional à estrutura de espaço-tempo para qualquer sistema de corpos que gravitam. Para obter as equações de movimento de uma partícula material em um campo gravitacional específico, Einstein não pôde apelar nem para as leis de Newton de movimento nem para a forma modificada dessas leis usadas na relatividade especial, porque elas não eram compatíveis com o princípio de covariância geral. Usou uma outra lei — mostrada por ele quando trabalhou muitos anos depois em cooperação com L. Infeld e B. Hoffmann — que não seria uma suposição independente, mas uma consequência das equações de campo. Essa lei específica foi sugerida por Einstein sob a condição de que, na relatividade especial, como na teoria de Newton, uma partícula movendo-se livremente na ausência de forças externas mantenha uma velocidade uniforme em linha reta. Na reformulação matemática da relatividade especial de Minkowski, o movimento dessa partícula é representado, como foi mencionado anteriormente, por um caminho em linha reta no espaço-tempo. Isso levou Einstein a propor que, na relatividade geral, a linha de Universo de uma partícula em um campo

gravitacional devia ser uma geodésica no espaço tempo associada a esse campo, sendo a geodésica comparável, na geometria de Riemann, a uma linha reta na geometria comum.

Para trazer o movimento da luz para dentro do escopo da relatividade geral, Einstein continuou com o mesmo espírito que o tinha inspirado a desenvolver a relatividade especial: estendeu o princípio de equivalência para a radiação eletromagnética e os corpos materiais. Usou o resultado de Minkowski segundo o qual no espaço-tempo da relatividade especial o caminho da luz tem comprimento zero, e impôs a mesma lei ao espaço-tempo da relatividade geral. A partir dessa condição podemos calcular como o campo gravitacional de um certo sistema material influencia a transmissão da luz e outras formas de radiação eletromagnética.

Com a relatividade geral Einstein conseguiu inserir a gravitação na geometria do espaço-tempo. Associado a qualquer sistema de corpos gravitantes, há um espaço-tempo definido (sua descrição matemática depende do sistema que as coordenadas de espaço e tempo adotaram) de tal forma que os efeitos gravitacionais do sistema são propriedades desse espaço-tempo. Ao formular as equações de campo, Einstein declarou que, no caso limite de velocidades como a dos planetas e dos campos gravitacionais que têm força comparável à do sol, as propriedades previstas de órbitas seriam muito próximas às admitidas na teoria de Newton. Isso era essencial, pois sabia-se que essa teoria dera resultados muito exatos a respeito dos movimentos dos planetas.

Einstein realizou três testes empíricos ligados à relatividade geral. Primeiro, conseguiu dar conta da pequena discrepância entre a teoria e a observação no caso do movimento orbital do planeta Mercúrio, que era conhecido há mais de 30 anos, mas tinha derrotado os astrônomos matemáticos que tentavam explicar o problema baseados na teoria de Newton. Segundo, com base na relatividade geral, previu que o campo gravitacional do Sol desviaria os raios de luz de uma estrela observada próxima à posição do Sol no céu, na hora de um eclipse solar total. O efeito preciso é muito difícil de ser medido com exatidão, mas recentemente foi possível estudar o mesmo efeito no caso das ondas de rádio a partir de uma forte fonte de rádio extragaláctica quando oculta pelo Sol. O resultado é próximo ao previsto pela teoria de Einstein.

O terceiro teste de Einstein tem uma implicação mais direta sobre as propriedades de tempo. Ele descobriu que um campo gravitacional tem o efeito de atrasar os relógios naturais, análogo ao efeito de dilatação de tempo do movimento na relatividade especial. Esse efeito é mais prontamente estudado nos espectros de luz emitidos por um corpo maciço. O campo gravitacional do corpo diminuirá a frequência dessa luz, fazendo com que sua cor se torne mais vermelha. Chamamos esse efeito de *desvio gravitacional para o vermelho*. Foram feitas tentativas de detectar esse efeito na luz emitida pelo sol, mas tudo em vão, porque os desvios proporcionais na frequência e comprimento de onda são apenas da ordem de duas partes em um milhão. Porém, surpreendentemente, 40 anos atrás tornou-se possível testar esse efeito com muito mais exatidão por meio de uma experiência de laboratório. R.V. Pound e G.A. Rebka, de Harvard, usaram com sucesso uma nova técnica altamente sensível, chamada efeito Mössbauer, para medir a mudança na frequência da luz caindo de alto a baixo de uma torre de 22,50m, instalada para outra finalidade vários anos antes na Universidade de Yale. Eles confirmaram com incrível exatidão a mudança de frequência prevista com base na teoria de Einstein, da ordem de apenas uma fração em um bilhão de milhões.

Todos esses efeitos são muito pequenos. Genericamente, no caso de qualquer campo esfericamente simétrico como o produzido pelo Sol, os fenômenos previstos pela teoria gravitacional de Einstein e por Newton tendem a diferir significativamente só quando nos aproximamos do ponto central. Essa tendência pode ser mais bem ilustrada em termos do conceito conhecido como “velocidade de escape”: dependendo da distância de uma partícula do centro do campo gravitacional, é a menor velocidade da partícula *naquele lugar*, caso fosse possível, pois ela acabará se afastando indefinidamente. Na teoria de Newton, quanto mais uma partícula se aproximar do centro do campo, maior se tornará a velocidade de escape, tendendo ao infinito no próprio centro. Na teoria da relatividade, porém, nenhuma partícula material pode atingir a velocidade local da luz, designada como c . No caso de um corpo esférico gravitacional, a distância do seu centro no qual a velocidade de escape é igual ao valor de c é conhecida como *raio Schwarzschild*, obtido pela fórmula $2GM/c^2$, em que M é a massa da esfera e G é a constante universal de gravitação (a mesma da teoria de Newton, em que a força gravitacional entre duas massas M e m a uma distância r é GMm/r^2). Pode-se comprovar que a essa distância do

centro existe uma barreira efetiva não só para o escape das partículas materiais como para o escape dos raios de luz e todos os outros sinais físicos. Nenhum sinal de dentro dessa barreira pode escapar para fora, mas os sinais de fora podem entrar.

É natural perguntar se essa “cortina de ferro”, peculiar à relatividade geral sem contrapartida com a teoria de Newton, poderia ocorrer na prática. A solução das equações de campo de Einstein, que envolve o raio Schwarzschild, aplica-se apenas no espaço vazio fora do corpo gravitante. Dentro do corpo, a presença de matéria leva a uma solução diferente das equações, e conclui-se que não há de fato nenhum raio Schwarzschild crítico nesse caso. Portanto, o raio de Schwarzschild do Sol é de menos de 3km, enquanto seu raio real é de quase 700.000km.

Para um corpo com massa comparável à do Sol ou de qualquer estrela normal ser comprimido dentro do seu raio Schwarzschild, ele precisa ter uma densidade tremenda, 10 bilhões de milhões de vezes maior que a da água. Se a matéria for suficientemente comprimida, os elétrons e prótons nela combinam-se para formar nêutrons, mas um corpo composto inteiramente de nêutrons comprimidos ao máximo tem uma densidade de cerca de um bilhão de milhões de vezes maior que a da água. Até há alguns anos não havia evidência de que estrelas desse tipo, chamadas *estrelas de nêutrons*, realmente existissem. Mas depois da descoberta dos pulsares pelos radioastrônomos da Universidade de Cambridge, em 1968, parece provável que existam. Os pulsares emitem sinais de rádio em uma seqüência regular em intervalos de cerca de um segundo ou, em alguns casos, de um décimo de segundo. Como nenhum corpo pode emitir uma seqüência de pulsos coerentes de radiação em menos tempo que o necessário para a luz viajar através dele, ficou claro que há pulsares que não excedem 30.000km de diâmetro. Além disso, pode-se estabelecer teoricamente que um período de um décimo de segundo só pode ser atingido por um corpo de densidade pelo menos da ordem de um bilhão de vezes maior que a da água. Pode-se também estabelecer teoricamente que um corpo com essa densidade tem probabilidade de se contrair até chegar à forma de uma estrela de nêutrons. Embora no presente não haja um consenso geral sobre o mecanismo preciso aí envolvido, a maioria dos astrônomos acredita que os pulsares provavelmente tenham rotação mais rápida que as estrelas de nêutrons.

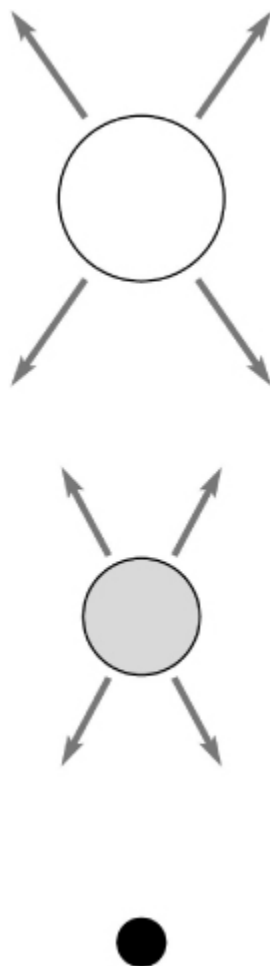


Figura 18: A velocidade de escape — seja de um veículo espacial, ou de uma partícula, ou até mesmo da radiação — de um corpo esférico em gravitação aumenta quando a distância inicial do seu centro diminui. Se o corpo contrair-se o suficiente — com a massa permanecendo a mesma —, ocorre um estágio em que a velocidade da luz seria necessária para escapar de sua superfície; depois disso nada pode escapar daí, seja uma partícula material ou radiação.

Enquanto as estrelas anãs brancas, como a companheira escura de Sirius, com densidade de cerca de um milhão de vezes maior que a da água, eram os objetos mais densos conhecidos, a questão da existência de algum objeto dentro do raio Schwarzschild parecia ser irreal; mas hoje, que a evidência de estrelas de nêutrons é tão forte, vemos essa questão sob luz muito diversa. Um corpo com densidade de dez trilhões de vezes maior que a da água não pode existir como estrela de nêutrons porque as forças gravitacionais que atuam dentro dele são superiores a qualquer possível contrapartida de forças nucleares. Como a força gravitacional aumenta com a massa, há uma massa crítica que um corpo não deve exceder, senão

entrará em colapso sob essa força. Isso depende da densidade, e, para um corpo com densidade de 10 trilhões de vezes a da água, a massa crítica é de apenas 70% da massa do Sol. Se um corpo com massa maior atingir essa densidade, não há nada que se possa fazer para evitar que ele entre em colapso sob sua própria atração gravitacional e se comprima a um estado singular de raio zero e densidade infinita.

Os nomes alternativos *buraco negro* e *collapsar* foram dados ao que sobrou depois que o corpo sofreu o colapso gravitacional dentro do raio Schwarzschild. Como já mencionamos, depois que o corpo encolhe dentro do seu raio, nenhuma radiação pode surgir, nem a matéria pode ser expelida. Portanto, para um observador de fora, o corpo torna-se completamente invisível, e não se pode obter informação sobre ele. Por outro lado, para um observador infeliz o suficiente para estar nele localizado, o colapso completo do corpo — e dele próprio — ao volume zero e densidade infinita ocorreria em tempo muito curto! A fim de evitar a possibilidade desse destino estranho, sugeriu-se que, em distâncias muito pequenas, a gravitação talvez deixe de ser uma força de atração e se torne uma força de repulsão. Mas se aceitarmos toda a relatividade geral, iremos deparar com a possibilidade de haver realmente buracos negros no Universo.

De todos os objetos que possam existir nenhum oferece previsão mais pobre de descoberta que o solitário buraco negro, pois ele seria completamente invisível. Mas se fosse de massa estelar ou maior poderia ser detectado pelo efeito do seu forte campo gravitacional sobre objetos próximos. Sugeriu-se que talvez exista um buraco negro maciço no centro da nossa galáxia, e também que na estrela binária Epsilon Aurigae o componente escuro que só pode ser detectado no infravermelho seja possivelmente um buraco negro rodeado de uma nuvem de partículas sólidas das quais vem a radiação infravermelha. Nenhuma dessas sugestões foi aceita em geral, e ainda há dúvida se a existência de buracos negros pode ser estabelecida de forma conclusiva.

Embora o colapso gravitacional não seja uma peculiaridade da relatividade geral, pois podia também ocorrer nas mesmas altas densidades, com base na teoria de Newton, há diferenças importantes. Na teoria de Newton, com seu conceito de tempo universal, o colapso em uma singularidade de densidade infinita podia, em princípio, ser diretamente

observado de fora. Por outro lado, na relatividade geral, a singularidade não só seria inobservável de fora, a não ser por seus efeitos gravitacionais, como o tempo necessário para o corpo em questão encolher até o raio Schwarzschild seria infinitamente prolongado *conforme o observador externo*. Esse é essencialmente o efeito da dilatação de tempo: quando o corpo encolhe, e o campo gravitacional próximo a ele se torna mais forte, o intervalo de tempo entre os sinais emitidos pelo corpo em colapso e medidos por um observador externo em intervalos de tempo-padrão apropriado — por exemplo, um segundo — se torna cada vez mais longo, tendendo ao infinito quando o corpo encolhe até o raio Schwarzschild. A diferença mais acentuada entre as duas teorias no caso de colapso gravitacional é que, enquanto na teoria de Newton a singularidade afetaria só a matéria, na relatividade geral a gravitação está intimamente ligada à estrutura de espaço-tempo; portanto, o estado de densidade infinita levaria a uma singularidade na geometria de espaço-tempo. Segundo o observador associado ao corpo em colapso, isso ocorreria em um tempo finito. Em uma singularidade assim o próprio tempo pareceria parar!

Um tempo universal cósmico?

Não é de surpreender que, nos anos recentes, os matemáticos tenham dado muita atenção a questões referentes às singularidades do espaço-tempo. Podemos achar que a possibilidade de elas existirem tornaria ainda mais difícil manter a idéia defendida no início deste capítulo de que o tempo dever ser visto como um aspecto fundamental do Universo, e que a data é uma característica essencial de qualquer evento. Como é possível que uma singularidade de buraco negro ocorra em um tempo finito para o observador interno e infinito para o observador externo?

A fim de solucionar essa questão devemos nos voltar para a cosmologia, a ciência da estrutura e evolução do Universo físico como um todo. Por mais importante que sejam as teorias da relatividade especial e geral para nossa compreensão de tempo, elas não nos apresentam uma explicação completa do conceito. Essas teorias preocupam-se com a natureza das leis da física, e não com o padrão específico de eventos da natureza e a distribuição real das matérias no Universo. Se considerarmos o tempo um aspecto da relação entre o Universo e o observador, não devemos concluir

que ele não é um aspecto fundamental do Universo com significância objetiva, antes de levarmos em devida conta a estrutura geral do Universo.

Conforme as idéias correntes, o Universo é composto de galáxias, umas maiores e outras menores, mas, apesar de certas diferenças características de estrutura, todas grosseiramente comparáveis ao nosso próprio sistema estelar da Via Láctea. A distribuição dessas galáxias é um tanto irregular, porém mostra sinais marcantes de uniformidade geral, quando consideradas de um ponto de vista em escala suficientemente ampla. A descoberta do desvio para o vermelho nos espectros das galáxias e seu aumento sistemático à medida que nos aprofundamos no espaço foram geralmente interpretados como evidência de que as galáxias estão se afastando umas das outras e que o Universo como um todo está se expandindo.¹ Nas investigações dos modelos teóricos do Universo, os observadores hipotéticos fixos nas diferentes galáxias são chamados “observadores fundamentais”. Eles são “privilegiados”, no sentido de que são associados ao grosso da distribuição da matéria no Universo. (As velocidades relativas das *estrelas* dentro de uma galáxia são pequenas comparadas à velocidade da luz; só as velocidades relativas das partículas diminutas são mais comparáveis à velocidade da luz.) Nos modelos mais amplamente estudados, os tempos registrados pelos observadores fundamentais encaixam-se e formam um tempo comum universal, chamado tempo *cósmico*. Em outras palavras, de acordo com esses observadores, há sucessivos estados do Universo como um todo que definem um tempo cósmico. Nesses termos, todos os eventos têm uma única ordem de tempo. As anomalias e discrepâncias da ordem de tempo que surgem em conexão com a teoria de relatividade especial devem-se não à natureza dos eventos em si, mas à introdução dos observadores que se movimentam pelo Universo relativo até os observadores fundamentais próximos. Na relatividade geral, os estranhos efeitos temporais dentro dos buracos negros referem-se a regiões de espaço tempo de onde os sinais não podem ser transmitidos para nenhum observador externo. Do ponto de vista dos observadores fundamentais, há uma ordem de tempo linear comum a todos os eventos que podem, em princípio, ser observados por eles.

Pode-se comprovar matematicamente que a existência de tempo cósmico em um Universo modelo depende de não haver nenhuma direção preferencial. Em outras palavras, se o modelo for *isotrópico*, isto é, parecer o mesmo em toda direção para qualquer observador fundamental, ele tem

um tempo cósmico. Em um modelo desse tipo, as direções da expansão cósmica são como os raios de uma roda, só que existem em um espaço tridimensional, e não em um plano, e a aparência geral do Universo é a mesma ao longo dessas direções. Além disso, cada observador fundamental se vê no centro do mesmo quadro de mundo que qualquer outro na mesma época do tempo cósmico.

Ocorre que, para ajudar a decidir se o Universo real é caracterizado por um tempo cósmico universal, procuramos evidência que confirme sua isotropia além da fornecida pela distribuição um tanto irregular das galáxias do céu. Felizmente, nos últimos anos, houve uma forte evidência por meio de uma descoberta da radioastronomia. Descobriu-se que o Universo é banhado de radiação de microonda, de ondas com comprimento de poucos centímetros. Ao contrário da luz estelar, essa radiação parece chegar a nós em quantidades mais ou menos iguais de cada direção do espaço. A variação de intensidade das diferentes direções é menor que 1%. Esse grau de isotropia é suficientemente preciso para excluir a possibilidade de qualquer origem local da radiação, pois uma fonte restrita ao sistema solar, à galáxia, ou mesmo ao agrupamento local de galáxias, não pareceria isotrópica para um observador localizado, como nós, longe do centro desses sistemas. Essa radiação é portanto vista como uma constituinte do Universo como um todo, e há fortes razões, embora ainda não totalmente conclusivas, para considerá-la uma relíquia da radiação primordial intensiva que pode ter acompanhado uma origem explosiva de todo o Universo. Essa radiação de microonda cósmica é muitas vezes referida como “bola de fogo primordial”. Afora a explicação de sua origem, a não ser que estejamos em um centro anômalo de isotropia — o que parece improvável —, devemos admitir que essa radiação é isotrópica para todos os observadores fundamentais do Universo. A evidência da validade do conceito de tempo cósmico é portanto hoje marcante.

Horizontes de tempo

Em *Ensaio sobre o entendimento humano*, John Locke terminou um capítulo sobre espaço e tempo declarando que “expansão e duração ligam-se e abrangem-se mutuamente; toda parte do espaço está em toda parte de duração, e toda parte de duração está em toda parte de expansão”. Até 1917 essa declaração foi considerada óbvia por todos. Naquele ano, o astrônomo holandês Willem de Sitter construiu um modelo do mundo no qual o tempo estava sujeito a uma limitação curiosa até então insuspeita. Na experiência de um observador P localizado em um certo ponto do modelo havia um horizonte finito no qual o tempo parecia manter-se imóvel, como na festa de Desaniversário do Chapeleiro Louco [do livro *Alice no País das Maravilhas*], em que eram sempre seis horas. Esse horizonte de tempo era um fenômeno apenas aparente, pois o fluxo real de tempo sentido por qualquer observador Q nesse horizonte era semelhante ao sentido por P . Esse efeito ocorria porque o tempo necessário para a luz ou qualquer outro sinal eletromagnético viajar de Q para P era infinito.

Na descrição original que de Sitter faz desse modelo do Universo não havia expansão nem tempo cósmico. Hoje, escolhem-se coordenadas de espaço e tempo para que o Universo de de Sitter seja um exemplo de Universo em expansão com um tempo cósmico, sendo sua taxa de expansão uma função exponencial desse tempo. Em termos de tempo cósmico, há uma época na história de B que parece a A ser um horizonte de tempo, no sentido de que nenhum sinal emitido então ou mais tarde por B poderá alcançar A .² Da mesma forma, de acordo com B , há um horizonte de tempo associado com A . O horizonte de tempo desse tipo é hoje chamado *horizonte de evento* e existirá para qualquer observador fundamental A em qualquer modelo de mundo em expansão em que a taxa de expansão aumente tão rápido com o tempo que os sinais emitidos por B nunca chegarão a A . Para visualizar melhor essa situação, podemos imaginar o Universo como a superfície de um balão em expansão.³ As galáxias podem ser então representadas por pontos grandes distribuídos uniformemente sobre o balão. Um ponto específico pode ser associado ao observador A . Os sinais luminosos podem ser representados por pontos pequenos movendo sobre o balão com uma velocidade constante relativa à superfície. Um horizonte de evento em B existirá para A em qualquer modelo de mundo

em que a taxa de expansão aumente tão depressa que depois de uma certa época da história de B nenhum ponto pequeno emitido por ele na direção de A poderá alcançá-lo, porque a taxa de expansão tornou-se rápida demais. Na comparação de Eddington, a luz é então “como um corredor em uma pista em expansão, em que o ponto de chegada se afasta mais depressa do que ele pode correr”.

Existe um tipo diferente de horizonte de tempo em qualquer modelo de Universo, com uma taxa decrescente de expansão que era a princípio tão rápida que nenhuma luz emitida por B podia alcançar A , de forma que só depois de passado certo tempo após o estado inicial do modelo um sinal emitido por B poderia alcançar A . Usando a analogia, inicialmente o balão se expande tão rápido que sua taxa de expansão é superior à dos pontos pequenos, de modo que só depois de passado um certo tempo e de a expansão ter diminuído é que um B específico se tornará visível para A . Esse tipo de horizonte de tempo pode ser chamado *horizonte de criação*, pois parece, para cada observador fundamental A , que a matéria é criada continuamente nos confins do Universo visível.

Até aqui admitimos que A permanece ancorado em uma galáxia particular, portanto mantendo o tempo cósmico; mas, se pudesse mover-se pelo Universo (com velocidade local sempre menor que a velocidade da luz, é claro), a classe de eventos que poderia em princípio ser observada por ele aumentaria. Se o modelo possuir um horizonte de evento para A antes de ele se mover, de qualquer forma que ele se mova, jamais conseguirá observar todos os eventos do Universo. Seu horizonte de tempo mudará, mas nunca será abolido.

A maioria dos modelos em expansão estudada como possíveis formas do Universo real possui um ou outro tipo de horizonte, ou ambos. (Uma exceção notável é o Universo em expansão uniforme considerado por E.A. Milne, que não possui nenhum dos dois tipos e portanto mantém uma unidade completa no tempo não compartilhada pela maioria dos modelos.) Entretanto, a existência dos horizontes de tempo não invalida o conceito fundamental de tempo cósmico associado à idéia de estados sucessivos do Universo.

Cosmologia e escalas de tempo

A existência do tempo cósmico não descarta automaticamente a possibilidade, mencionada no final do capítulo 4, de que diferentes leis da física possam definir diferentes escalas de tempo que não mantêm o mesmo passo. Dados três eventos sucessivos E , F e G , os intervalos temporais entre E e F e entre F e G , respectivamente, podem ser considerados de duração igual, conforme um relógio, e de duração desigual, de acordo com outro relógio, ambos pertencendo ao mesmo observador. Os intervalos iguais de tempo em um relógio serão correspondentes a intervalos iguais de tempo no outro, se a relação matemática entre as medidas de tempo dos dois for algebricamente linear. Pode-se dizer que os dois relógios mantêm efetivamente a mesma hora; quaisquer diferenças entre eles podem ser acertadas com uma escolha adequada do tempo inicial e da medida de unidade de tempo. Nos últimos 60 anos ou mais foram dadas sugestões específicas referentes à possibilidade da existência de diferentes escalas de tempo naturais não relacionadas linearmente. Por exemplo, em 1936, Milne sugeriu que a escala de tempo do declínio radioativo — em termos do qual ele acreditava que o Universo se expandia com uma taxa uniforme — difere das escalas de tempo uniforme da dinâmica e da gravitação, sendo a escala da gravitação uma função logarítmica da escala dinâmica. Outra forma de expressar esse resultado foi afirmar que, em termos da escala de tempo uniforme de declínio radioativo, a constante universal de gravitação G não é uma constante verdadeira, pois aumenta com a época cósmica. O geólogo Arthur Holmes tentou usar essa idéia para explicar a maior atividade dos processos abaixo da crosta da Terra, associados à formação de montanhas terrestres etc., nos 500 milhões de anos que se passaram desde o período cambriano. Ele chegou à conclusão de que a evidência disponível não indicava uma mudança significativa no valor de G . Foram dadas sugestões alternativas referentes a G e outras constantes nas leis fundamentais da física, especialmente nos últimos anos, por R.H. Dicke, de Princeton, que modificou a teoria da relatividade geral de Einstein para permitir uma mudança secular no valor de G .

Todas as sugestões referentes à variabilidade das “constantes” universais como G afirmam que a taxa de mudança no seu valor pode ser no máximo de poucas partes em 20 bilhões por ano. Para detectar essa mudança em um

tempo perceptível é necessário, portanto, dispor de alguns métodos de medida de tempo ultraprecisos. Já mencionamos, no capítulo 4, que a exatidão do relógio de cézio é de cerca de cinco partes em dez trilhões de anos. Uma forma natural altamente precisa de marcar a hora, que pode ser checada com o relógio de cézio, foi descoberta no pulsar. Os pulsos de radiação emitidos pelos primeiros desses objetos a serem detectados tinham uma regularidade maior que uma parte em cem milhões, sendo o período precisamente de 1,33730113 segundos. Embora se tenha descoberto desde então que os pulsares tendem a diminuir a velocidade, pode perfeitamente ocorrer que os períodos de alguns sejam mantidos em alto grau de precisão em um intervalo de tempo suficientemente longo para uma verificação parcial da hipótese de que o tempo astronômico derivado dos corpos celestes mantém-se a par com o tempo de relógios atômicos em laboratórios terrestres. Pode ser também possível, no curso devido, comparar com grande precisão o tempo uniforme da mecânica celestial com o tempo dos vibradores atômicos e relógios radioativos.

Seja como for, creio que, até obtermos uma evidência conclusiva em contrário, devemos aceitar a hipótese de que há um único ritmo básico do Universo. Portanto, há uma única escala de tempo cósmico universal em termos do qual, dependendo da escolha feita de tempo inicial e unidade de tempo, todo evento tem em princípio sua própria data intrínseca.

¹ Essa questão será considerada no próximo capítulo.

² *A* e *B* são quaisquer dois observadores fundamentais no modelo.

³ Essa analogia deve ser usada com cautela. O universo tem três dimensões no espaço, enquanto a *superfície* de um balão tem duas dimensões. Além do mais, no Universo não há nada que corresponda às regiões dentro e fora da superfície do balão.

A Origem e a Flecha do Tempo

A idéia de que qualquer evento tem uma data intrínseca nos leva a perguntar como os eventos do Universo podem ser datados. É uma pergunta técnica que já foi parcialmente considerada no capítulo 4, embora o problema de uma escolha adequada do tempo inicial não tenha sido aventado. John Locke, em passagem citada previamente, disse que “a duração é como se fosse o comprimento de uma linha reta estendida *in infinitum*”. Porém, a visão linear do tempo não nos obriga necessariamente a concluir que o tempo seja infinito. O moribundo Hotspur, na tragédia de Shakespeare, *Henrique IV*, parte 1, diz:

... o tempo que observa o mundo todo
Deve ter um fim.

Essa idéia foi muitas vezes vista como uma “parada” gradual do Universo — a “morte do calor” associada a uma aplicação direta da segunda lei da termodinâmica a todo o cosmo. Mas mesmo que aceitemos essa conclusão, e nem todos os cientistas aceitam, não é provável que ela nos forneça uma época conveniente de referência pela qual datar os eventos passados e presentes. O tempo inicial poderia ser escolhido estabelecendo-se um evento significativo específico qualquer; os primeiros eventos seriam apresentados com datas negativas, e os posteriores com datas positivas — como os eventos históricos podem ser apresentados com datação a.C. e d.C. Porém, se houvesse uma origem finita do tempo, ela seria a escolha mais natural para a época inicial na escala do tempo cósmico.

Muita gente tem dificuldade de imaginar uma origem do tempo porque tende a acreditar que ele é semelhante a um limite de espaço, conceito que normalmente rejeitamos em razão do problema que encontraríamos do outro lado se chegássemos a um limite; presumindo-se que lá fosse espaço

também, o conceito de limite seria contraditório em si. Porém, uma objeção semelhante no caso do tempo não é tão convincente, pois não se pode viajar livremente no tempo como se pode no espaço. Se o tempo não existe por si só, mas coexiste com o Universo, sua origem (e um fim) implicaria simplesmente uma certa restrição temporal ao Universo. Não há certamente em nós qualquer compulsão lógica a considerar todos os fenômenos temporais ilimitados. Na verdade, se houvesse alguma vantagem nisso, poderíamos considerar que o Universo e todo o seu conteúdo, inclusive as memórias humanas simuladas, têm início em um momento específico, passado ou presente. Esse momento seria efetivamente a origem do tempo.

Mais realistas, perguntamos se houve algum estado inicial singular do Universo (como uma origem explosiva) que possa ser considerado uma origem natural do tempo. O primeiro passo para responder a essa difícil questão é procurar a evidência de tendência no Universo. Em uma famosa palestra sobre cosmogonia, em 1871, Helmholtz argumentou que os cientistas não só tinham o direito como também o dever de investigar se, “supondo uma uniformidade eterna das leis da natureza, nossas conclusões das circunstâncias presentes com relação ao passado... imperativamente nos levam a um estado impossível de coisas; isto é, à necessidade de uma infração das leis da natureza, de um início que pode não ter sido causado pelos processos que conhecemos”. Conforme Helmholtz enfatizou com razão, essa questão não é uma especulação infundada, pois diz respeito a tudo em que as leis existentes são válidas.

Foi mencionado no capítulo 1 que o fator decisivo que levou à prevalência da idéia linear de tempo foi a acumulação da evidência de tendências evolucionárias no mundo externo. Só nos últimos 180 anos a crença no caráter essencialmente imutável do Universo começou a ser seriamente questionada. Até o século XIX, o conceito de evolução teve pouco impacto sobre a forma de o homem ver o mundo. A astronomia, a mais antiga e mais avançada ciência, não indicava nenhuma evidência de direção no Universo. Pois embora já se soubesse que o tempo em si podia ser medido pelos movimentos dos corpos celestes, e que a exatidão dos relógios mecânicos podia ser controlada por referência às observações astronômicas, o padrão dos movimentos celestes parecia ser essencialmente o mesmo, fossem eles lidos para a frente ou para trás. O padrão de todos os movimentos era um sistema de rodas, e o futuro era essencialmente

considerado uma repetição do passado. Não chegava assim a surpreender que há séculos os homens pensassem no tempo como cíclico por natureza.

A especulação de Kant e Laplace no final do século XVIII sobre a origem do sistema solar renunciou o abandono no século XIX da crença antiga de que o estado geral do mundo permanecia mais ou menos invariável. Mas foi basicamente por meio do estudo de fósseis nas rochas terrestres que a atenção dos cientistas voltou-se para os processos de mudança no Universo ao longo de milhões de anos. Por volta de 1800, percebeu-se pela primeira vez que a ordenação das rochas por camadas podia ser considerada uma ordenação cronológica. A teoria darwiniana da evolução biológica, que tanta luz lançou sobre a natureza do registro fóssil, foi o fator decisivo que forçou os homens a se conscientizarem do aspecto do tempo do Universo. A seleção natural é um processo, muitas vezes efetivo apenas ao longo de milhões de anos, por meio do qual certas combinações genéticas tendem a ser eliminadas, e outras, com maior capacidade de adaptação, tendem a proliferar. A irreversibilidade da evolução biológica é atribuída à improbabilidade comparativa de uma combinação específica de um dado conjunto de mutações e um dado ambiente se repetirem, de modo que as chances de voltar atrás em termos da evolução diminuem rapidamente com o aumento da complexidade dos organismos e ambientes. Segundo esse ponto de vista, novas mutações levam a novos modos de adaptação dos organismos ao seu meio ambiente, e os efeitos subsequentes da seleção natural dão origem àquele aspecto característico que nos leva a pensar na evolução como um processo unidirecional. Como autoridade em direção e evolução do tempo, Harold F. Blum comentou: “Seria difícil negar que o efeito global da evolução é irreversível; a amonite, o dinossauro e a lepidodendrácea se foram para sempre.”

Ao contrário do processo unidirecional da evolução biológica, a história da superfície da Terra parece ser cíclica à primeira vista. O deslocamento de massas de terra de dentro dos oceanos depende dos movimentos diferenciais na crosta terrestre, influenciados pelo menos parcialmente pelo fluxo de calor no interior do planeta. Como esse calor é irradiado para fora do espaço, é necessária uma fonte contínua para que o fluxo se mantenha. Hoje acredita-se que essa fonte sejam depósitos radioativos da crosta da terra (capítulo 4). Esses depósitos são quase suficientes para manter um equilíbrio estável, portanto a superfície e o interior da Terra podem ter

permanecido como são agora ao longo de milhares de milhões de anos. Ao longo do registro total de fósseis — há cerca de 500 milhões de anos —, não há evidência de nenhuma diminuição marcante de atividade vulcânica e outras atividades na crosta terrestre; calcula-se que a produção de calor na Terra durante esse período não tenha diminuído em mais que 3 a 4%. No entanto, apesar do imenso período de tempo durante o qual o ciclo da história da superfície da Terra teve e tem probabilidade de continuar a se repetir, parece inevitável a tendência geral de um estado estável em que todos os continentes finalmente ficarão submersos nos oceanos.

Passando para o Sol e as estrelas, vemos que os processos hoje considerados responsáveis pela radiação contínua são também essencialmente irreversíveis. Embora acreditemos que estrelas como o Sol possam continuar a brilhar de forma estável durante milhares de milhões de anos, as transformações nucleares responsáveis em última instância por essa radiação não podem continuar indefinidamente. Acreditamos que mais cedo ou mais tarde todas as estrelas cessarão de brilhar da forma como o Sol hoje brilha, e se tornarão estrelas brancas minúsculas, ou estrelas de nêutrons e possivelmente buracos negros. Qualquer que seja seu destino final, o mero fato de as estrelas serem corpos radiantes que não podem continuar no mesmo estado para sempre parece ser a evidência do tempo unidirecional.

Portanto, na escala terrestre e na escala celeste, há evidência abundante da direção do tempo *no* Universo, particularmente quando considerados longos intervalos de tempo. Mas há também agora uma forte evidência de associação do tempo *com* o Universo, originada do estudo das galáxias. Seus espectros são sistematicamente desviados para o vermelho, o que é interpretado como evidência de uma expansão geral do Universo. Essa conclusão baseia-se na combinação de duas importantes linhas de argumentação: que as galáxias formam a estrutura geral do Universo, e que desvios para o vermelho do seu espectro são os efeitos Doppler do movimento de afastamento.

À primeira vista, a distribuição das galáxias no céu parece extremamente irregular. Em especial, há uma zona de desvio na região da Via Láctea. Porém, Edwin Hubble mostrou que essa zona de desvio é causada pela existência de matéria difusa obscura nas regiões afastadas do nosso sistema estelar, que nos impede de ver outras galáxias nessas

direções. Quando a distribuição observada é corrigida para esse efeito, embora continue um tanto irregular, torna-se quase isotrópica. Esse resultado, ao qual nos referimos no capítulo 5, é em geral considerado uma poderosa evidência de que o sistema de galáxias forma a estrutura do Universo.

Com relação à interpretação dos desvios para o vermelho nos espectros das galáxias, é improvável que sejam causados pelos efeitos de campos gravitacionais mais fortes quando nos aprofundamos no espaço de um Universo estático. Essa explicação foi rejeitada em favor do efeito Doppler.¹ Esse efeito pode ser descrito, por analogia, com o fato familiar de o apito de uma locomotiva ser mais agudo quando ela se aproxima do que quando se afasta de nós. Isso porque as ondas sonoras são mais comprimidas quando se aproximam. Da mesma forma, as ondas luminosas de uma fonte que se aproxima são também comprimidas, e o encurtamento geral resultante dos comprimentos da onda significa que o espectro da fonte parece ser desviado para o azul. Por outro lado, se a fonte estiver se afastando da luz, as ondas dela provenientes tornam-se alongadas, e o espectro desvia para o vermelho. Nos dois casos, o deslocamento fracional (razão entre a mudança e o comprimento de onda original) é o mesmo em todo o espectro e possibilita determinar a velocidade da fonte na linha da visão.

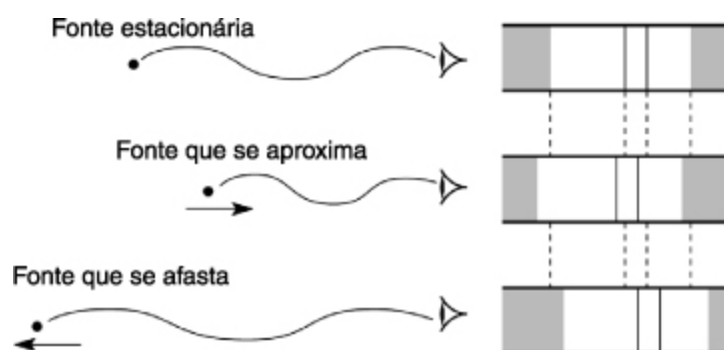


Figura 19: As ondas de luz de uma fonte que se aproxima são comprimidas, e as de uma fonte que se afasta são expandidas. Isso, que é o efeito Doppler, muda o comprimento da onda de todas as linhas espectrais da fonte na direção do final do espectro curto, ou azul, ou na direção do final vermelho, conforme seja o caso. Quando medida com cuidado, essa mudança dá a velocidade radial com a qual a fonte está se movimentando.

Embora outras interpretações do deslocamento dos espectros das galáxias tenham sido defendidas de tempos em tempos, nenhuma recebeu

tanto apoio quanto a interpretação do efeito Doppler em termos de movimento de afastamento; foram feitas sérias objeções contra todas as outras teorias que especificam um mecanismo físico preciso. Assim, as únicas alternativas viáveis pareceriam ser que o Universo (ou sistema de galáxias) está se expandindo, ou que há uma lei da natureza desconhecida operando na escala cósmica que não tem efeito apreciável sobre a escala da astronomia estelar comum. Naturalmente os astrônomos se inclinam para uma explicação em termos de movimento relativo, e não de um efeito desconhecido, e continuarão a pensar assim até que haja uma boa razão para abandonarem essa interpretação dos desvios para o vermelho.

Um dos primeiros a ver que a idéia da expansão do Universo podia ser usada para explorar o conceito de tempo foi E.A. Milne. Ele argumentou que, enquanto o Universo de Newton *tem* um relógio, o Universo em expansão *é* um relógio, e que a flecha do tempo — para usar a famosa expressão de Eddington — é automaticamente indicada pelo afastamento das galáxias. Na nova abordagem a essa questão, Milne criou uma analogia entre o Universo em expansão e um enxame de partículas não-colidentes movendo-se uniformemente em linhas retas. Se elas forem contidas em um volume finito em algum instante inicial, quando estiverem se movendo a esmo, acabarão formando um sistema de expansão. Mesmo que o sistema esteja se contraindo originalmente, ele se expandirá. Por outro lado, um sistema em expansão desse tipo nunca se tornará por si só um sistema de contração. Esse ponto pode ser ilustrado mesmo quando o sistema contém apenas duas partículas. Se inicialmente elas estiverem se aproximando uma da outra, acabarão se movendo em separado. Mas se inicialmente estiverem se movendo em separado, continuarão a se mover em separado e nunca se aproximarão uma da outra. Por exemplo, se pegássemos duas tiras de filme e constatássemos que em uma delas as partículas estavam se aproximando e em outra se afastando, poderíamos dizer logo qual fotografia tinha sido tirada primeiro.

Essa argumentação é invalidada em um Universo espacialmente fechado, que portanto pressupõe que o espaço é infinito. Da mesma forma, qualquer tentativa de definir a flecha do tempo em termos de expansão do Universo pressupõe que não há reversão do processo. Não há certeza alguma de que o Universo nunca tenha passado por uma fase de contração, como ocorreria se ele se expandisse e contraísse como uma concertina. Portanto, é preferível considerar a expansão do Universo uma indicação

corrente da flecha do tempo, e não um fenômeno básico original. Se o Universo está em expansão, é provável que tenha existido no seu presente estado por um tempo apenas finito, embora a medida real desse tempo vá depender se o afastamento das galáxias foi mais ou menos uniforme ou significativamente diferente no passado. As velocidades de afastamento das galáxias são de cerca de dois quintos da velocidade da luz, mas não há razão para considerar isso um limite superior. Na verdade, no caso dos misteriosos quasars, foram descobertos desvios para o vermelho que, se causados por um movimento de afastamento, indicam velocidades de até quase nove décimos da velocidade da luz.

Em 1929 Hubble constatou que a velocidade v e a distância r de uma galáxia são ligadas pela relação simples $v = Hr$, onde H tem o mesmo valor de todas as galáxias investigadas. O fator H , conhecido como constante de Hubble, tem dimensões inversamente proporcionais ao tempo, mas sua avaliação exata não foi possível pelas dificuldades fundamentais de determinar uma escala de distância confiável para objetos extragalácticos. A determinação pioneira de Hubble das distâncias das galáxias mais próximas, notadamente da nebulosa Andrômeda, dependeu da identificação das estrelas variáveis da Cefeida, a respeito das quais se sabia que podiam ser usadas como indicadores de distância. Mas, para obter uma relação sistemática entre v e r , era necessário sair do chamado Grupo Local de galáxias, e os telescópios existentes não tinham capacidade suficiente para revelar estrelas desse tipo em galáxias mais remotas.

Porém, em algumas nebulosas, especialmente naquelas da constelação de Virgem, Hubble conseguiu identificar objetos particulares que acreditou, erradamente, sabe-se hoje, serem as estrelas mais brilhantes. Comparando suas magnitudes aparentes com as das estrelas mais brilhantes das galáxias com distâncias já determinadas, ele estimou a que distância ficavam elas e as galáxias que as continham. Quando relacionou as distâncias com os desvios para o vermelho dessas galáxias para postular sua lei, constatou que a recíproca de H era quase de dois bilhões de anos.

Nos anos recentes, a escala de distância de Hubble das galáxias foi drasticamente revista, e isso afetou o valor conferido a H . Os resultados das últimas investigações anunciados por Allan Sandage em uma conferência sobre escala de distância astronômica, realizada no Observatório Real de Greenwich, em agosto de 1971, conferiram um valor de 18 milhões de anos

à recíproca constante de Hubble, quase dez vezes mais do que o próprio Hubble estimava. Se o Universo se expandia em uma taxa uniforme, a lei que relacionava a distância e a velocidade seria $r = vt$, onde t seria o tempo que se passou desde o estado inicial do Universo de compressão máxima. Comparando a fórmula com a lei empírica de Hubble, $v = Hr$ (ou $r = v/H$), vemos que nesse caso t seria exatamente igual à recíproca de H , que seria portanto uma medida direta da idade do Universo. Porém, se este se expandiu mais rápido no passado que agora, o tempo de expansão seria correspondentemente menor; por outro lado, se o Universo se expandiu mais devagar no passado, o tempo seria aumentado. Se as equações de campo da relatividade geral se aplicam ao Universo como um todo, é impossível a expansão uniforme, e o modelo mais simples de Universo será aquele em que (usando a terminologia newtoniana) toda galáxia se afasta com uma velocidade igual à velocidade de escape do campo gravitacional do Universo inteiro. Nesse caso, a taxa de expansão diminui continuamente, e a idade do Universo é dada por dois terços do valor do inverso de H . O que vem a ser cerca de 12 bilhões de anos, em surpreendente concordância com a idade de dez bilhões de anos (com margem de erro de três bilhões de anos) estimada para as estrelas mais velhas (dos aglomerados globulares) com base na teoria da evolução estelar.

Devemos ver essa convergência de duas linhas de pesquisa completamente distintas para o mesmo resultado como uma espantosa coincidência, ou, o que é mais plausível, como uma forte evidência de que ocorreu algum tipo de singularidade no passado histórico do Universo entre 12 e 18 bilhões de anos atrás. Embora possamos considerar isso uma conveniente origem do tempo para o Universo como o conhecemos, não podemos excluir a possibilidade de que, antes de o Universo entrar nesse estado singular — que pode ser caracterizado por uma temperatura indefinidamente alta que deu origem à bola de fogo primordial discutida no capítulo 6 —, ele tenha passado por uma fase de contração. A idéia de fases alternadas de expansão e contração poderia significar que o Universo passa por uma seqüência interminável de ciclos semelhantes. A fim de conciliar essa idéia com as histórias de vida aparentemente finitas de estrelas individuais e galáxias, devemos admitir que, em cada ciclo, estrelas e galáxias são criadas de novo a partir do que restou do ciclo anterior. Não sabemos se é possível acontecer isso. Nosso conhecimento presente nos

limita ao que está acontecendo no ciclo presente — ao contrário dos pensadores das civilizações anteriores, cujas especulações sobre ciclos de tempo e do Universo eram mais poéticas que científicas. Mesmo assim deparamos com uma séria dificuldade. Se o Universo se expande de forma cíclica, e não contínua, é difícil entender a física da fase de contração que deverá se estabelecer quando todos os desvios para o vermelho extragalácticos se tornarem desvios para o azul. Entretanto, não podemos excluir automaticamente um tipo tão oscilante de Universo do âmbito de possibilidades da física.

A flecha termodinâmica

Já vimos que a idéia de uma origem natural de tempo pode ser associada à singularidade na história passada do Universo. Essa singularidade é evidenciada pela interpretação mais geralmente aceita dos desvios para o vermelho nos espectros das galáxias. A associação íntima do tempo com o Universo é portanto revelada pela história dos *conteúdos materiais do Universo*. Por outro lado, no final do capítulo 4, deu-se uma sugestão alternativa de que a escala suprema de tempo é intimamente associada ao conceito de *leis universais da natureza*. Naquele capítulo só nos preocupamos com a medida do tempo, e não com o problema de datação e questões associadas à escolha do tempo inicial e à direção da flecha do tempo. Quando procuramos evidência que corrobore nosso conhecimento das leis da física para fundamentar as respostas a essas questões obtidas por pesquisas da distribuição da matéria na escala astronômica, nos confrontamos com uma estranha situação. Longe de obtermos qualquer evidência, constatamos que tanto as leis de movimento quanto as leis que governam as forças e interações conhecidas na física (com uma pequena exceção) são compatíveis com a inversão da flecha do tempo! Isso se aplica às leis de gravitação (de Newton e de Einstein), de eletromagnetismo e às que governam as chamadas interações “fortes” entre prótons e nêutrons nos núcleos atômicos. Só no caso de interações “fracas”, envolvendo neutrinos, é que surgiu uma dúvida sobre a invariância da reversão do tempo. Afora essa possível saída, não parece que as leis que governam as forças e interações fundamentais da natureza dêem alguma indicação da flecha do tempo!

Qualquer que seja a situação real referente às interações fracas, acredita-se há muito tempo que a evidência da flecha do tempo deve ser buscada nos aspectos estatísticos da natureza. A lei da física mais celebrada com relação a esses aspectos do Universo é a segunda lei da termodinâmica. Ela tem um caráter bastante distinto das leis que regem as forças naturais. Refere-se ao comportamento temporal de grande número de partículas e não tem significado para partículas individuais ou sistemas com poucas partículas. É essencialmente estatística e afirma a tendência de arranjos ordenados de moléculas para destruir os arranjos desordenados. Um exemplo familiar tirado da vida diária é o efeito que ocorre quando o creme é despejado em uma xícara de café. Vê-se logo depois um líquido de cor uniforme, e por mais que se misture o conteúdo da xícara, ele não reverte ao estado original, quando o café e o creme estavam claramente separados.

A segunda lei da termodinâmica foi interpretada pelo físico austríaco Ludwig Boltzmann como a declaração de que qualquer sistema fechado — ou seja, um sistema que nem ganha nem perde energia de seu meio ambiente — automaticamente tende a um estado em que a distribuição e o movimento das suas partes componentes são completamente aleatórios, pois para um grande número de partes esse é o arranjo mais provável. Isso ocorre quando o conteúdo de uma xícara de café é bem misturado. É muito pouco provável que a mistura contínua produza um arranjo em que o café e o creme se separem de novo. Boltzmann sugeriu que essa interpretação estatística da segunda lei levava em conta automaticamente o caráter dimensional do tempo em si.

Embora parecendo convincente, essa conclusão foi considerada logicamente infundada. Pois graças à simetria das leis de movimento com relação às duas direções do tempo, para qualquer estado escolhido arbitrariamente que mostre algum grau de ordenação há não só uma grande probabilidade de ele levar a um estado menos ordenado como também uma grande probabilidade de ele próprio originar-se de um estado desordenado. Seria portanto muito provável que, na época do escolhido estado ordenado, o sistema estivesse passando por uma flutuação de desordem. Conseqüentemente, a teoria estatística de Boltzmann não fornece uma direção definida para a flecha do tempo, que deve portanto ser examinada — se é que ela pode ser explicada afinal — de alguma outra forma.

Contudo, a situação curiosa de que as leis gerais da física (nas escalas subatômica e macroscópica) ajudam a ocultar a tendência unidirecional não deve nos levar a concluir que a flecha do tempo é um fenômeno puramente subjetivo, como foi sugerido por alguns filósofos. Para aplicar as leis a um certo sistema físico, nós impomos certas “condições iniciais” contingentes, tais como as posições e velocidades das partes constituintes do sistema em um dado instante. Essas condições não são dadas pelas leis em si, que são de caráter geral, e não particular. Se há alguma conexão profunda entre o tempo e o Universo, é porque a flecha do tempo está associada de alguma forma às “condições iniciais” que determinaram o Universo particular que realmente existe, tão distinto de qualquer outro Universo que poderia ter existido de acordo com os mesmos princípios físicos. Em outras palavras, pode ser que a explicação suprema da flecha do tempo seja encontrada na cosmologia, isto é, no padrão específico de eventos no Universo, e não nas leis gerais.

As três flechas do tempo

Recentemente David Layzer, de Harvard, fez uma nova tentativa de relacionar o Universo às três flechas macroscópicas do tempo: a flecha termodinâmica, definida por processos de entropia² em sistemas fechados; a flecha histórica, definida por processos de geração de informação em certos sistemas abertos; e a flecha cosmológica, definida pelo afastamento das galáxias. Depois de mostrar as sutis dificuldades associadas à flecha termodinâmica, Layzer volta-se para a flecha histórica fornecida pelos registros evolucionários que apontam na direção de maiores informações. Esses registros não são produzidos só pelos sistemas biológicos. Um registro do passado da Lua está escrito na sua superfície esburacada; a estrutura interna de uma estrela, como a de uma árvore, registra o processo de envelhecimento; e as complexas formas que observamos nas galáxias em espiral refletem os processos evolucionários que as moldam. Podemos definir a flecha histórica por meio da declaração de que “o estado presente do Universo (ou de qualquer subsistema suficientemente grande dele) contém um registro parcial do passado, mas nenhum do futuro”.

Layzer esboça uma teoria que procura relacionar as flechas termodinâmica e histórica com a cosmológica, derivando todas três de um

postulado comum: que a estrutura espacial do Universo é *estatisticamente* homogênea e isotrópica. Em outras palavras, nenhuma propriedade estatística do Universo serve para definir uma direção ou posição específica no espaço. A partir disso ele deduz que uma descrição *completa* do Universo pode ser expressa em termos estatísticos. Por exemplo, se um Universo, de acordo com o postulado de Layzer, estivesse em um estado de equilíbrio termodinâmico, seria caracterizado completamente pela sua temperatura e densidade, e todas as outras quantidades observáveis poderiam ser calculadas considerando-se apenas estas. Layzer argumenta que o equilíbrio termodinâmico de todo o Universo provavelmente só pode ser atingido quando o Universo está fechado para um estado singular de densidade infinita, que ele define como estado inicial. A expansão cósmica gera tanto a entropia quanto as informações. Ele conclui que o Universo se desdobra no tempo e no futuro nunca completamente previsível, pois o conteúdo das informações específicas aumenta constantemente a partir do estado singular inicial. Portanto, o estado presente do Universo não pode conter informações suficientes para definir nenhum estado futuro. “O futuro origina-se do passado como a planta origina-se de uma semente, porém contém mais do que o passado.”

Apesar da ingenuidade de tentativas como as de Layzer para explicar a flecha do tempo, e o valioso *insight* que argumentos como os dele oferecem para as relações que prevalecem entre os diferentes processos unidirecionais do Universo, qualquer teoria que busque derivar o conceito *todo* de tempo de algumas considerações mais primitivas está destinada ao fracasso. Pois qualquer teoria que se empenhe em levar em consideração o tempo *completamente* deve explicar por que tudo não acontece de uma vez só. A não ser que a existência de estados *sucessivos* (não simultâneos) de fenômenos seja tacitamente admitida, é impossível deduzi-los. O que as várias tentativas para analisar a natureza do tempo mostraram é que, em última instância, o tempo deve ser considerado cosmologicamente. Em suma, o tempo é uma propriedade fundamental da relação entre o Universo e o observador que não pode ser reduzida a nada mais.

¹ Nome dado em homenagem ao cientista austríaco que primeiro chamou a atenção para isso, em 1842.

² Entropia é uma medida de desorganização de um sistema físico. A segunda lei da termodinâmica indica que, em um sistema físico fechado, não sujeito à interferência de fora, a entropia tende

automaticamente a aumentar.

O Significado de Tempo

O conceito de tempo nunca deixou de intrigar aqueles que pensam sobre o assunto. Nós sentimos que, independentemente do que ocorra, o tempo passa sem cessar; mas quando vamos analisá-lo encontramos boas razões para rejeitar a idéia de que ele existe por si só. O tempo é visto como a ordem na qual os eventos ocorrem. Portanto, se não houvesse uma sucessão de eventos, não poderia existir o tempo. “O que Deus fez antes de fazer o céu e a Terra?”, perguntou santo Agostinho. Ele rejeitava a explicação superficial de que Deus estava preparando o inferno para aqueles que se intrometem nos mistérios! Sua explicação era que antes de Deus fazer o céu e a terra Ele não fez nada. O tempo foi feito juntamente com o céu e a Terra.

A associação íntima do tempo com o Universo remonta a Platão, o filósofo que exerceu grande influência sobre santo Agostinho. Na cosmologia de Platão, tal como apresentada no diálogo *Timeu*, o Universo foi criado por um artífice divino que impôs ordem ao caos primordial, reduzindo-o à regra do que hoje chamamos de lei natural. Segundo Platão, o padrão de lei era dado por formas geométricas ideais em estado de absoluto descanso, portanto essencialmente *sem tempo*. Enquanto o espaço era visto por Platão como uma estrutura preexistente na qual o Universo se encaixava, o tempo em si era produzido pelo Universo. Pois o Universo, ao contrário do modelo ideal eterno no qual se baseava, está sujeito a mudança, e o tempo é o aspecto de mudança que preenche a lacuna entre os dois (o Universo material e seu modelo ideal) — a “imagem móvel da eternidade”, segundo sua famosa frase.

A aversão de Platão a todas as pesquisas que envolviam o mundo material temporal levou-o a criticar os seguidores de Pitágoras, que pesquisavam problemas de harmonia musical e acústica de forma empírica.

Em uma divertida passagem da *República*, ele os ridiculariza por gastarem tempo medindo sons e harmonias audíveis.

Eles colam os ouvidos no instrumento como se estivessem tentando ouvir uma conversa do outro lado da porta. Um diz que pode detectar uma nota de permissão com o menor intervalo possível, o que deve ser considerado a unidade de medida; outro insiste que não há diferença entre as notas. Ambos preferem os ouvidos à inteligência.

Platão estava convencido de que as “melodias ouvidas são doces, mas as não ouvidas são mais doces ainda” — atitude profundamente influenciada pelo trabalho de um filósofo anterior, Parmênides, o criador da argumentação estritamente dedutiva e da discussão lógica. Parmênides submeteu as idéias de transformação e perecimento a uma crítica aguda, e concluiu que o tempo não pertence a nada que seja verdadeiramente “real”, apenas ao mundo logicamente insatisfatório das aparências que nos é revelado pelos sentidos.

A crença de Parmênides de que o fluxo temporal não é um aspecto intrínseco da natureza *última* das coisas foi extremamente influente. Não foram apenas os filósofos idealistas que declararam que a forma temporal da nossa percepção não tem significância última. Mesmo assim um pensador de mente empírica como Bertrand Russell, embora rejeitando os argumentos pelos quais esses filósofos procuraram justificar essa conclusão, admitiu o seguinte em seu famoso ensaio “Misticismo e lógica”: “Há algum sentido — mais fácil de sentir que de declarar — pelo qual o tempo é uma característica sem importância e superficial da realidade. O passado e o futuro devem ser considerados tão reais quanto o presente; uma certa emancipação da escravidão ao tempo é essencial ao pensamento filosófico.” Até os filósofos são homens como todos os outros. Conta-se uma história interessante sobre o filósofo russo Nicolas Berdyaev, que, depois de ter defendido veementemente a insignificância e irreidade do tempo, de repente parou e olhou o relógio ansioso, com medo de atrasar por alguns minutos seu remédio!

É sabido que a maioria dos filósofos considerava o tempo um conceito absolutamente insatisfatório. Há cerca de 70 anos, o psicólogo Pierre Janet observou no seu livro sobre tempo e memória que, sempre que se enfatizam a lógica e a razão, o tempo tende a ser impopular. Os filósofos em geral têm um horror particular ao conceito, e fizeram tudo que puderam para suprimi-lo. Entretanto, vale lembrar que muitos matemáticos e físicos

também eram céticos a respeito da significância última do tempo e estavam mais inclinados a conceitos espaciais. Até certo ponto isso se deve ao fato de o espaço nos ser apresentado como um todo, enquanto o tempo é visto em partes. O passado deve ser lembrado com a ajuda dúbia da memória, o futuro é desconhecido, e só o presente é diretamente vivenciado. Até mesmo Einstein, que deu a maior contribuição desde o século XVII para a compreensão do tempo quando formulou sua teoria da relatividade especial, mais tarde tornou-se decididamente contra o conceito, como já vimos, e chegou à conclusão de que a realidade física devia ser considerada uma existência quadridimensional, e não a *evolução* de uma existência tridimensional. Em outras palavras, a passagem do tempo deve ser vista como um mero aspecto da nossa consciência sem qualquer significância física objetiva. Essa hipótese sofisticada torna o conceito de tempo completamente subordinado ao de espaço.

Mas o tempo tem certas características importantes que o distinguem claramente do espaço. Fora sua natureza unidimensional, os dois principais aspectos peculiares à nossa concepção do tempo são sua flecha e sua passagem. Enquanto a flecha do tempo descreve a irreversível sucessão de eventos antes-e-depois, a passagem do tempo refere-se à distinção que fazemos entre passado, presente e futuro. Essas duas propriedades intimamente associadas não devem ser confundidas.

A série antes-e-depois é permanente, no sentido de que, se a declaração “*B* ocorre depois de *A*” for verdadeira, será sempre verdadeira. Por exemplo, a declaração de que a batalha de Waterloo ocorreu depois da batalha de Hastings é uma verdade permanente. A série antes-e-depois é a forma pela qual nós *contemplamos* normalmente uma cadeia de eventos no tempo. É o método de ordenação análogo à ordenação numérica, e é compatível com a idéia de “Universo em bloco”. Por outro lado, a série de passado, presente e futuro caracteriza a forma pela qual nós realmente *vivenciamos* os eventos. Ao contrário da série antes-e-depois, é uma série em mudança e dá sentido ao conceito de ocorrência. O fato de ser uma série em mudança — o que ocorre agora já foi futuro e será passado — nos leva a fazer declarações que não são verdades permanentes. Para os filósofos, essa série em mudança foi tal fonte de perplexidade que muitos deles concluíram que deve ser uma ilusão — visão mantida pelo filósofo de Cambridge, M.J.E. McTaggart. O fundamento de sua argumentação era a controvérsia de que o evento nunca pode cessar de ser evento. “Veamos

um evento como a morte da rainha Anne, por exemplo, e consideremos que mudanças podem ocorrer nas suas características. Que é uma morte, a morte de Anne Stuart, que tem tais causas, que tem tais efeitos — cada característica desse tipo nunca muda”, escreveu ele. McTaggart argumentou que desde o início do tempo o evento em questão foi a morte de uma rainha. E continuou:

No último momento do tempo — se é que o tempo tem um último momento — ainda será a morte de uma rainha. E sob cada aspecto, exceto um, é igualmente destituído de mudança. Mas sob um aspecto ele muda. Já foi um evento no futuro longínquo. Tornou-se a cada momento um evento no futuro próximo. Finalmente tornou-se presente. Depois tornou-se passado e será sempre passado, embora a cada momento se torne cada vez mais passado.

McTaggart argumentou que, embora passado, presente e futuro sejam incompatíveis, eles devem se aplicar a cada evento. Podemos argumentar ser óbvio que os eventos não têm essas características de forma simultânea, e sim de forma sucessiva; nesse caso, McTaggart poderia facilmente contra-argumentar que nossa declaração de que um evento é presente, será passado e foi futuro significa que o evento é presente em um momento do tempo presente, passado em um momento do tempo futuro, e futuro em um momento do tempo passado. Mas cada um desses momentos é em si um evento no tempo, portanto é passado, presente e futuro. Em outras palavras, a dificuldade surge de novo, e nós caímos em um regresso infinito vicioso. McTaggart concluiu que o tempo é uma ilusão. Na minha opinião, essa conclusão é *non-sequitur*. O erro de McTaggart foi tratar a ocorrência dos eventos como se fosse uma forma de mudança qualitativa. Mas o tempo não é em si um processo no tempo.

Embora nos últimos anos poucas pessoas tenham sido influenciadas por McTaggart, inúmeros filósofos e outros pensadores argumentaram que o aspecto transitório do tempo é puramente subjetivo. Eles não o vêem como uma característica do tempo físico em si, e sim da nossa percepção do tempo. Em particular, declaram que nosso conceito de “presente”, que expressamos pela palavra “agora”, é simplesmente o modo temporal na nossa experiência pessoal; se não houvesse essas experiências não haveria o “agora”. Esse ponto de vista é adequado para grande parte da física e de outras ciências, desde que as datas sejam irrelevantes, e não importe o tempo específico em que uma experiência é sentida. Nesses casos, para a classificação dos eventos de forma temporal, é suficiente nos

concentrarmos nas relações de “antes de”, “depois de” ou “ao mesmo tempo que”. Porém, para o meteorologista empenhado em prever o tempo, as distinções entre passado, presente e futuro são vitais. Da mesma forma, para o paleontólogo que estuda o registro fóssil nas rochas terrestres, não só as datas são relevantes, como a distinção entre passado e presente domina seus pensamentos, pois o efeito total da evolução parece ser irreversível.

No entanto, alguns filósofos argumentavam que não se pode definir o presente a não ser por referência a si próprio. Segundo eles, o presente é simplesmente o nosso “agora”, e, como essa é uma definição circular, não há razão para supormos que o que ela define tenha significância objetiva. Eles concluem, portanto, que devemos restringir o conceito de “agora” ao nosso modo de percepção. Se não aceitarmos isso, será que poderemos estabelecer a objetividade de passado, presente e futuro?

Primeiro, vejamos o que queremos dizer com simultaneidade e presente. Na terminologia introduzida por Minkowski na teoria da relatividade, dois eventos nas respectivas linhas de Universo de dois indivíduos A e B , sejam eles vivos ou inanimados, são simultâneos quando se localizam em um ponto de intercessão O das suas linhas de Universo. Para estabelecermos a objetividade de um fenômeno, geralmente tentamos mostrar que ele não é apenas uma peculiaridade de uma experiência específica da pessoa. Por exemplo, em uma bela noite de novembro de 1572, o famoso astrônomo dinamarquês Tycho Brahe, que conhecia os céus estrelados como a palma de sua mão, viu com surpresa uma estrela brilhante (era na verdade o que hoje chamamos de “supernova”) onde nenhuma outra estrela tinha sido vista antes. Suas dúvidas a respeito dessa existência objetiva foram resolvidas quando ele constatou que outras pessoas (seus empregados e alguns camponeses que por ali passavam) também tinham visto a estrela. Da mesma forma, se o conceito de presente é objetivo, qualquer A e B , quando no mesmo O , devem ter o mesmo “agora”.

O que significaria se A e B tivessem diferentes “agoras” estando simultaneamente em O ? Para esse propósito não podemos comparar quaisquer sentimentos puramente internos de presente, pois eles são subjetivos, e nós estamos procurando estabelecer a objetividade; devemos nos concentrar nos eventos físicos externos e na relação do indivíduo com o meio ambiente. O “presente” de um indivíduo pode ser definido como

tudo que interage com ele em um dado instante. É uma relação entre o indivíduo e o resto do Universo, tudo que lhe está acontecendo em um certo instante — tudo que é de fato presente para ele. Essa definição não implica necessariamente autoconscientização e pode ser aplicada a qualquer indivíduo, inanimado ou animado, desde que ele seja capaz de interagir com o meio ambiente.

Definindo o presente dessa forma, será possível mostrar que o presente é um conceito objetivo? É claro que só poderíamos ir contra isso se dois indivíduos (animados ou inanimados) pudessem simultaneamente ter diferentes “agoras”. Isso ocorreria se, quando *A* e *B* estivessem juntos em *O*, eles tivessem interações incompatíveis com seus ambientes. Suponhamos que *A* seja um espelho capaz de refletir a luz que incide nele, e *B* seja um ser humano. Se *A* apresentasse uma imagem de árvores sem folhas no inverno, enquanto *B* via as mesmas árvores cheias de folhas, poderíamos interpretar essa discrepância como a evidência de que o “agora” de *B* está defasado em relação ao “agora” de *A*.

Na prática, normalmente¹ não encontramos esse tipo de discrepância, e o mundo físico seria muito mais complicado se a encontrássemos. Portanto, não temos razão de rejeitar a admissão sensata de que *A* e *B* têm um “agora” comum, e que as distinções que fazemos entre passado, presente e futuro não são meramente subjetivas.

Já se mostrou que a aceitação da teoria da relatividade não nos força a considerar a ordem dos eventos no tempo totalmente dependente do observador. Como já vimos, a teoria realmente permite uma ordem de tempo objetiva para uma ampla classe de eventos, a saber, os que podem interagir com ou influenciar uns aos outros. Conseqüentemente, ao definir o conceito de presente para qualquer observador em termos de suas interações com o meio ambiente, não estamos em conflito com a relatividade. Além disso, se o Universo admite um tempo cósmico comum para observadores fixados nas galáxias, em termos desse tempo cósmico, todos os eventos têm uma única ordem de tempo. Do ponto de vista dos observadores fundamentais, há uma ordem de tempo linear comum de tempo do Universo e uma distinção clara entre passado, presente e futuro. Assim, voltamos à idéia de Platão de que o tempo e o Universo estão intimamente associados.

Átomos do tempo

O conceito de tempo que prevaleceu nos últimos séculos baseia-se na idéia de avanço linear, mas também supõe que o tempo é homogêneo e contínuo. A plausibilidade dessas suposições foi não só muito reforçada com o desenvolvimento de métodos e máquinas precisas para medir o tempo, como também, em termos mais sutis, com o declínio geral da crença nas associações temporais tradicionais de natureza mágica, e não científica. É bem verdade que as idéias de dias de sorte e dias de azar e de anos climatéricos — datas periódicas na vida do homem que eram pontos críticos potenciais na sua saúde e fortuna, com base na doutrina de que o corpo do homem mudava de caráter a cada sete anos — foram rejeitadas pela Igreja medieval. Mas o calendário eclesiástico também tendia a encorajar a crença na natureza irregular do tempo.

No século XVII, muitas práticas tradicionais cultuadas nesse calendário, como a observância da Quaresma e a comemoração dos dias santos, foram atacadas pelos puritanos, que advogavam a adesão a uma rotina regular de seis dias de trabalho seguidos de um dia de descanso. No final do século essa rotina tinha-se tornado aceita na Inglaterra. Segundo Keith Thomas, que fez uma investigação detalhada das crenças populares dos séculos XVI e XVII na Inglaterra, em seu livro *Religion and Decline of Magic*, essa mudança nos hábitos de trabalho foi um “passo importante para a aceitação social da idéia moderna de tempo uniforme em qualidade, em oposição ao sentido primitivo de desigualdade e irregularidade do tempo”. Entretanto, uma relíquia desse conceito mais primitivo de tempo sobreviveu na observância rígida do domingo como um dia de descanso, rigorosamente cumprida em várias casas, segundo a memória viva.

A crença nessa desigualdade do tempo foi mais natural no passado, quando a sociedade era essencialmente agrária e dependente das estações para sua sobrevivência. O calendário cristão medieval, com ênfase no *ano*, baseava-se nas necessidades desse tipo de sociedade, enquanto a insistência puritana em um ritmo de vida pautado na *semana* era mais natural para aqueles que trabalhavam nas cidades e não se prendiam ao solo. Durante a última parte do século XVII, os desenvolvimentos na vida econômica começaram a prevalecer sobre a rotina sazonal da tradição, o que criou uma aceitação geral da idéia científica de tempo homogêneo e contínuo.

Hoje, a maioria das pessoas tende a aceitar automaticamente a idéia de que o tempo é contínuo porque acredita na continuidade da existência. Até o século XX era também possível acreditarmos na continuidade da matéria e da energia, mas com o estabelecimento da teoria atômica e da teoria quântica, fomos forçados a abandonar essas crenças. Nos últimos anos a continuidade do tempo tem sido ocasionalmente questionada, embora seja cedo demais para se dizer qual será a decisão última. Em lugar do tempo ser infinitamente divisível, sugeriu-se que, como a matéria e a energia, ele tenha estrutura atômica ou granular. Essa especulação liga-se a uma idéia semelhante a respeito da natureza do espaço. Alegava-se que o deslocamento espacial mínimo poderia ser de cerca de uma bilionésima parte de milímetro (correspondente ao diâmetro efetivo de um próton ou elétron). Se assim fosse, o tempo mínimo correspondente — o *crono* — poderia ser o tempo necessário para a luz (a coisa móvel mais veloz) atravessar essa distância, que seria de cerca de uma bilionésima parte de segundo (10^{-24} /s). É claro que, se o *crono* existe, ele seria um valor mínimo do próprio tempo, e, graças à dilatação do tempo, pareceria relativamente mais curto para o observador em movimento.

Se o tempo consiste em uma seqüência de “átomos” pequenos assim, para todos os fins práticos ele seria virtualmente contínuo. Entretanto, do ponto de vista teórico, por menor que seja sua magnitude, a existência possível do *crono* é uma idéia revolucionária que põe em dúvida um aspecto fundamental tanto da idéia científica de tempo, que prevaleceu nos séculos recentes, quanto da concepção popular de tempo que a maioria das pessoas aceita intuitivamente.²

Pré-cognição e a natureza do tempo

Outra propriedade tradicional do tempo que também tem sido ocasionalmente questionada nos últimos anos é a sua unidimensionalidade. Alguns pesquisadores da percepção extra-sensorial argumentaram que o tempo linear é inadequado para explicar todos os eventos do nosso mundo. Em particular a idéia de que o tempo pode ter mais de uma dimensão foi invocada por J.W. Dunne no seu famoso livro *An Experiment with Time*, para justificar a alegação de que ocasionalmente, nos sonhos, os eventos futuros de nossa vida são vivenciados como pré-apresentações. Um evento *P* pode preceder um evento *Q* na dimensão de tempo familiar, e o *Q* pode preceder o *P* em outra dimensão de tempo. Conseqüentemente, se *P* fosse a impressão pré-cognitiva do evento *Q* — por exemplo, um sonho referente à ocorrência de *Q* antes de *Q* realmente ocorrer —, seria compreensível dizer que *Q* determina *P* se *Q* ocorreu antes de *P* na segunda dimensão de tempo.

Qualquer hipótese desse tipo envolvendo uma segunda dimensão de tempo é dificilmente aceita, porque significa que estaríamos diante da intrigante idéia de um duplo “agora” — pois o que é “agora” sob um aspecto, ou dimensão, pode ser “passado” ou “ainda não” em outro. Pior ainda, isso nos levaria à curiosa situação que se segue.

Suponhamos que eu tenha o pré-conhecimento de um evento que irá ocorrer no próximo domingo. Sob um aspecto — isto é, em uma dimensão de tempo — esse evento ainda não ocorreu: é futuro, ainda não existe. Mas, sob outro aspecto, ou segunda dimensão de tempo, é passado, e portanto já ocorreu. É, por assim dizer, semi-real, pois existiu de forma parcial, e não total. Só no próximo domingo ele receberá sua segunda parcela de existência, e então será completamente real. Mas será mesmo? Essas duas partes da sua existência estão de fato em desarmonia, pois o que começa a existir em uma dimensão de tempo já terá passado em outra.

A possibilidade do pré-conhecimento foi rejeitada pelo filósofo de Cambridge C.D. Broad, que argumentou que a frase “— evento futuro” não descreve um evento de tipo especial, como a frase “evento súbito” ou “evento histórico”. O evento futuro nada mais é que uma possibilidade não realizada até que venha a ocorrer, portanto não pode influenciar nada por si só, embora o *conhecimento* presente de que ocorrerá um tal evento possa

influenciar nossas ações quando nos recordamos dele. O evento que parece “preencher” uma vivência anterior, dando a impressão de um pré-conhecimento, não pode ajudar a determinar a ocorrência real dessa vivência. Portanto, embora haja casos de pré-conhecimento aparente, esses casos não podem ser pré-percepções autênticas, e a hipótese de tempo bidimensional certamente não é necessária para explicá-los.

A natureza transitória do tempo

O pré-conhecimento autêntico, no sentido de podermos, em certas circunstâncias, perceber eventos futuros, talvez fosse possível se vivêssemos em um Universo em bloco, no qual, como foi dito antes, os eventos físicos não ocorrem de repente, esperam que nós os vivenciemos. Essa idéia já foi rejeitada, tendo em vista que o passado, o presente e o futuro são na verdade características objetivas de eventos físicos. Mas a hipótese de Universo em bloco tem implicações estranhas para eventos mentais, tais como percepções conscientes e decisões de realizar ações físicas. No Universo em bloco, como já vimos, passado, presente e futuro não se aplicam a eventos físicos, portanto nem começam a ser nem cessam de ser — eles simplesmente são. Mas em qualquer tipo de Universo que vivamos, os eventos mentais certamente começam a ser e cessam de ser na nossa experiência pessoal. Portanto, se vivêssemos em um Universo em bloco, os eventos mentais teriam um tipo de existência completamente distinto dos eventos físicos — o que teria conseqüências muito peculiares de causa e efeito. Na causalidade puramente física, o efeito não seria realmente produzido por sua causa, existiria meramente mais adiante no tempo. Mas a causalidade mental de um evento físico — como decidir jogar uma pedra em um lago — significaria que uma causa (no caso, a decisão de jogar a pedra) de repente passa a existir, mas o efeito (o borrito de água quando a pedra cai no lago) não, ele sempre existirá. Essa estranha distinção entre causa e efeito seria completamente incompreensível.

Se os eventos físicos estão ali eternamente, como poderíamos ter a ilusão de que não estão? É claro que temos a capacidade de conscientização temporal de fases sucessivas de experiência sensorial, porque a mente é adaptada ao mundo em que vivemos, e o mundo está em mudança constante. As objeções levantadas contra a natureza transitória do tempo

físico são uma ação de resguardo em favor da antiga crença no caráter essencialmente imutável do Universo e na suprema significância do seu aspecto temporal. Longe de efemeridade do tempo ser uma característica não-essencial, por ser puramente subjetiva, a significância suprema do tempo é encontrada na sua natureza transitória. Assim como a razão da existência do mal em um universo moral deve ser que, sem ele, não pode haver o bem — pois não haveria nada com que contrastar o bem, e, assim, dar sentido ao conceito —, sem efemeridade a permanência não teria significado.

Para concluir, embora nossa percepção de tempo tenha muitos aspectos subjetivos e até mesmo sociológicos, ela se baseia em um fator objetivo que fornece um controle externo do *timing* de nossos processos fisiológicos. Esse fator objetivo é o que chamamos de tempo físico. É um aspecto supremo do Universo e da sua relação com os observadores, em especial os observadores fundamentais, que não pode ser reduzido a nada mais. O que não significa que o tempo exista por si só: ele é um aspecto dos fenômenos. A essência do tempo é sua natureza transitória. Que isso tenha dado margem a tanta discussão ao longo dos séculos não é de surpreender, pois, nas palavras de Whitehead, “é impossível meditar sobre o tempo e o mistério da passagem criativa da natureza sem uma emoção avassaladora diante das limitações da inteligência humana”.

¹ Alucinações, ilusões de ótica etc. foram consideradas evidências fraudulentas, e os fenômenos ditos paranormais foram rejeitados.

² Muita gente tem dificuldade de imaginar o tempo como uma estrutura “atômica” porque acredita que isso implicaria a existência de lacunas temporais que devem, elas próprias, fazer parte do tempo, em contradição com a hipótese. Ao contrário, porém, a “atomicidade” do tempo refere-se apenas à *indivisibilidade do crono*. Em princípio, o *crono* pode ser imaginado como uma fileira de pedrinhas que se tocam, de forma que não haveria lacunas entre elas.

Apêndice

Ordem temporal na relatividade especial

Para calcular os resultados discutidos na p.118, devemos apelar para as fórmulas da relatividade especial de Lorentz, apresentadas em qualquer livro sobre o assunto.

O primeiro observador A e o segundo observador B estão juntos no evento E , ao qual portanto cada observador atribui distância zero de si mesmo. Além disso, cada observador pode acertar seu relógio para que ele marque zero na época desse evento. No evento F , que ocorre à distância r de A , suponhamos que a época atribuída por A seja t . Como, segundo A , o evento F ocorre depois de E , o valor t é maior que zero. Se a velocidade de B relativa a A for V , segundo as fórmulas de Lorentz, o tempo atribuído a t por B no evento F não é o mesmo que t' , como seria na física clássica de Newton, mas dado pela fórmula:

$$t' = \frac{t - Vr/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$$

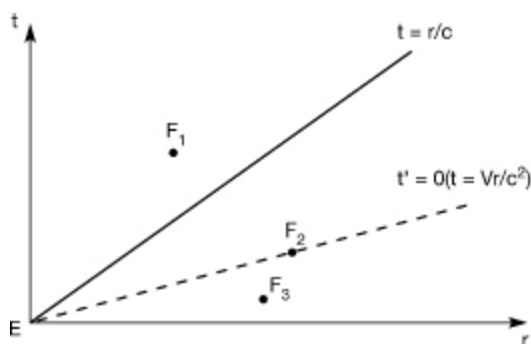
em que c é a velocidade da luz.

Como V deve ser menor que c , então, se a distância r , segundo A , no evento F for menor que ct , então t' é maior que zero. Conseqüentemente, B concorda com A que F ocorre depois de E . Da mesma forma, se $r = ct$, vemos que t' é ainda maior que zero para todos os valores possíveis de V , e B refere-se de novo a F como ocorrendo depois de E .

Porém, se r for maior que ct , podemos encontrar um valor possível de V em que $t' = 0$, ou seja, $V = c^2t/r$, que nesse caso é menor que c .

Conseqüentemente, segundo o observador específico B movendo-se com essa velocidade V relativa a A , o evento F é simultâneo a E . Além disso, se V for escolhido de modo a ser maior que c^2t/r (mas menor que c , é claro), então t' será negativo. Nesse caso, o observador B refere-se ao evento F como ocorrendo antes do evento E .

Esses resultados, calculados algebricamente, podem ser ilustrados geometricamente pelo diagrama abaixo. Os eixos representam tempos t e distâncias r segundo A . Qualquer evento ao qual B atribui o mesmo tempo $t' = 0$, como faz para E , é representado por um ponto na linha marcada $t' = 0$, onde $t = Vr/c^2$, segundo A . Essa linha sempre está abaixo da linha $t = r/c$, porque V deve ser menor que c . Se r for menor que ct , então F ficará acima da linha $t = r/c$, digamos em F_1 , portanto acima da linha $t' = 0$. Conseqüentemente, o valor de t' atribuído por B a F é maior que zero, tempo atribuído a E . Porém, se r for maior que ct , então F fica abaixo da linha $t = r/c$, digamos em F_2 . Podemos então encontrar um valor admissível para V , onde F_2 fica na linha $t' = 0$; portanto, para o observador correspondente B , o evento F_2 é simultâneo a E . Finalmente, se F fica abaixo dessa linha, digamos em F_3 , então t' é menor que zero, e B refere-se ao evento F como ocorrendo antes de E .



A literatura do tempo *

J.T. FRASER E M.P. SOULSBY

Em *Henrique IV*, de Shakespeare, parte 1, sir Henry Percy é apresentado como um jovem irrequieto. Ganhou o apelido de Hotspur por sua função de patrulhamento constante na fronteira da Escócia com a Inglaterra. Tem o temperamento explosivo e está sempre pronto para a briga. Mas, à beira da morte, torna-se reflexivo. “O tempo que observa o mundo todo deve ter um fim”, ele diz.¹

O debate sobre um fim do tempo prolonga-se ao longo dos anos, sem que se tenha chegado a uma conclusão universalmente aceita. Em contraste, há um consenso universal de que o tempo observa — o tempo entra em todas as negociações das pessoas consigo mesmas, umas com as outras e com seus ambientes. Portanto, tudo que já foi vivenciado, notado, dito ou criado pelos seres humanos, fatos efêmeros ou duradouros, deveria ser considerado material de estudo do tempo.

Porém um estudo da natureza do tempo, e até mesmo uma pequena amostra bibliográfica do tema, se formulada sem princípios orientadores, se tornaria mera versão contemporânea da deliciosa Associação Mudfog para o Progresso de Tudo, de Dickens.² E tão incompleto quanto as teorias-físicas-de-tudo, que, como observou J.D. Barrow, “são insuficientes para desvendar as sutilezas de um Universo como o nosso”.³ Há uma necessidade de regras de seleção na compilação das notas bibliográficas sobre qualquer assunto. Essa necessidade de determinar o que é e o que não é relevante em um campo de conhecimento é quase única para o estudo do tempo. Nem toda linha riscada pelo macaco ou pelo homem é

necessariamente um exemplo de arte a ser homenageada. Embora essas linhas sejam sujeitas às regras de geometria, nem todas precisam ser estudadas para se formular a ciência da geometria. Até aqui, no estudo integrado do tempo, os julgamentos sobre a relevância do material dependeram dos estudiosos dessas disciplinas a quem recorreremos. Os botânicos que decidam o que é importante para a compreensão do comportamento cíclico e o amadurecimento das plantas. Como recorrer a julgamentos de especialistas por meio de longas notas críticas e referências, isso é ilustrado no clássico de G.J. Whitrow, *The Natural Philosophy of Time*. Como se pode fazer de forma natural é ilustrado no presente livro.

Que tentativas foram feitas até aqui para uma pesquisa sistemática de material importante para um estudo integrado do tempo?

Em 1981, uma pesquisa no computador considerou 15 bancos de dados contendo aproximadamente 15 milhões de livros e artigos publicados entre 1965 e 1980. Trabalhos de possível interesse publicados entre 1900 e 1964, então não disponíveis em bancos de dados computadorizados, foram identificados nos registros de bibliotecas. Esses bancos de dados pesquisados, os assuntos procurados, a estratégia da investigação e as diretrizes da seleção são descritos no artigo de J.T. Fraser “Report on the Literature of Time, 1900-1980”.⁴ O número total de verbetes considerados potencialmente relevantes ao estudo sistemático do tempo foi de aproximadamente 65 mil.

Time: A Bibliographic Guide,⁵ de Samuel L. Macey, contém cerca de seis mil verbetes sobre livros e artigos relacionados ao tempo. São divididos em 25 disciplinas acadêmicas e cerca de cem subdisciplinas.

Os dez volumes da série *The Study of Time* (1972-2001) contêm mais de 230 trabalhos, todos com extensas notas e referências. Uma listagem desses trabalhos — por autor, títulos e locações — pode ser encontrada em *KronoScope: Journal for the Study of Time*, vol.2, número 2 (2002) p.263-73. A coluna “Time’s Books” do *Time’s News*, o boletim aperiódico da Sociedade Internacional do Estudo do Tempo (<http://www.studyoftime.org>), entre 1984 e 2002, fez mais de 300 resenhas de livros. Essa coluna faz hoje parte do *KronoScope*.

Antes que possa ser formulado um esquema defensável dos critérios para seleção de material relevante para um estudo integrado do tempo, juntamente com um esquema crítico e classificatório dos trabalhos, será

necessário construir uma “estrutura intelectual coerente” e identificar “um vocabulário de conceitos” necessário para a introdução deste livro, “Sobre os ombros de gigantes”.

Essa listagem começa com uma seleção das obras relacionadas com o tempo de G.J. Whitrow, e continua com títulos sugeridos para este livro por membros da Sociedade Internacional do Estudo do Tempo, a quem os compiladores desejam expressar seu agradecimento. Os verbetes são apresentados nos subtítulos do oitavo capítulo deste livro. Cada verbete foi colocado no que se julgou ser o melhor lugar, ou talvez no lugar perfeito. Porém, alguns volumes editados não se encaixam de forma fácil ou apropriada na classificação baseada nos títulos do capítulo deste livro. Talvez por oferecerem abordagens interdisciplinares ao estudo do tempo, ou um foco especializado. Uma seção para esses livros editados foi incluída a fim de permitir a variedade e o alcance do material. A listagem conclui com títulos desses trabalhos de J.T. Fraser que abordam especificamente problemas do estudo integrado do tempo.

O julgamento final da relevância e do valor de cada um e de todos os verbetes listados a seguir cabe ao leitor. Como observou o médico de lady Macbeth, “É preciso, aqui, que o doente seja seu próprio médico”.

Seleção de publicações de G.J. Whitrow relacionadas ao tempo

LIVROS

What is Time?. Londres, Thames & Hudson, 1972.

The Natural Philosophy of Time. 2^a ed. Oxford, Clarendon Press, 1980 [1961].

Time in History: The Evolution of our General Awareness of Time and Temporal Perspective. Nova York, Oxford University Press, 1988.

(Trad. Bras., *O tempo na história*, Rio de Janeiro, Jorge Zahar, 1993.)

ARTIGOS

- “General Relativity and Lorentz Invariant Theories of Gravitation”. *Nature*, 188, 3 dez 1960, p.790-4.
- “The concept of time from Pythagoras to Aristotle”. *Proceedings of the 10th International Congress for the History of Science*. Paris, 1964, p.499-503.
- “Time”. *International Science and Technology*, 42, jun 1965, p.32-7.
- “Albert Einstein: a biographical portrait”. BBC, transmitido em 30 jul 1966.
- “Entropy”. In Paul Edwards (coord.). *The Encyclopaedia of Philosophy*, vol.2 Nova York, Macmillan, 1967, p.526-8.
- “Reflections on the Natural Philosophy of Time”. In *New York Academy of Sciences, Annals*, Conference on Interdisciplinary Perspectives of Time, vol.138, art.2, 1967, p.422-32.
- “Time and Mathematics”. In *Akten des XVI Internationalen Kongress für Philosophie*, Viena, 2-9 set 1968. Viena, Herder, p.641-5.
- “Reflections on the History of the Concept of Time”. In J.T. Fraser, F.C. Haber, e G.H. Miller (org.). *The Study of Time I*. Nova York, Springer-Verlag, 1972, p.1-11.
- “Time and Measurement”. In P.P. Wiener (org.). *Dictionary of the History of Idea: Studies of Selected Pivotal Ideas*. Nova York, Scribners, 1973, p.398-406.
- “Time and Timing: the Astronomical and Historical Developments”. *Naturwissenschaften*, n.54, 1977, p.105-12.
- “Man and Time: Some Historical Reflections”. In J.T. Fraser (org.). *The Study of Time VI*. Madison, CT, International Universities Press, 1989, p.295-304.

Seleção bibliográfica classificada sob os títulos dos capítulos deste livro

1. A ORIGEM DA NOSSA IDÉIA DE TEMPO

- AIGNER, C., G. Poechat e Rohsman, A. (org.). *Zeit/Los: Zur Kunstgeschichte der Zeit*. Colônia, DuMont, 1999.
- ARGYROS, A.J. *A Blessed Rage for Order: Deconsctruction, Evolution, and Chaos*. Ann Arbor, University of Michigan Press, 1991.
- BARREAU, H. *La construction de la notion de temps*. 3 vol. Estrasburgo, Fondements des Sciences, 1982.
- BORST, A. *Computus: Zeit und Zahlim Mittelalter*. Colônia, Bohlau, 1988.
- BRANN, E. *What, then, is Time?*. Lanham, MD, Rowan and Littlefield, 1999.
- BRIN, G. *The Concepts of Space and Time in the Bible and the Dead Sea Scrolls*. Leiden, Brill, 2001.
- CAPEK, M. (org.). *The Concepts of Space and Time: Their Structure and their Development*. Dordrecht, Reidel, 1976.
- CARR, D. *Time, Narrative, and History*. Bloomington, Indiana University Press, 1986.
- DUHEM, P. *Medieval Cosmology: Theories of Infinity, Place, Time, Void and the Plurality of Worlds*. Chicago, University of Chicago Press, 1987.
- DUX, G. *Die Zeit in der Geschichte: Ihre Ebtwicklungslogikvon Mythos zur Weltzeit*. Frankfurt, Suhrkamp, 1989.
- EKELAND, I. *Mathematics and the Unexpected*. Chicago, University of Chicago Press, 1988.
- KRIEGER, L. *Times Reasons. Philosophies of History, Old and New*. Chicago, University of Chicago Press, 1989.
- LEVINAS, E. *Dieu, la mort et le temps*. Paris, Grasset, 1993.
- LIPPINCOTT, K. (org.). *The Story of Time*. Londres, Merrell Holberton, 2000.
- MORSON, G.S. *Narrative and Freedom: The Shadows of Time*. New Haven, Yale University Press, 1994.
- RAULFF, U. *Der unsichbare Augenblick: Zeitkonzepte in der Geschichte*. Göttingen, Wallenstein, 1999.

- ROMILLY, J. de. *Time in Greek Tragedy*. Ithaca, Cornell University Press, 1968.
- SORABJI, R. *Time, Creation and the Continuum*. Londres, Duckworth, 1983.
- TER MEULEN, A.G.B. *Representing Time in Natural Language*. Cambridge, MA, MIT Press, 1997.

2. O TEMPO E NÓS

- ABRAVAYA, I. *Studies of Rhythm and Tempo in the Music of J.S. Bach*. Tese de doutorado. Tel Aviv, Universidade de Tel Aviv, 1999.
- ADAM, B. *Time and Social Theory*. Filadélfia, Temple University Press, 1990.
- . *Timewatch: The Social Analysis of Time*. Cambridge, Polity Press, 1995.
- . *Timescapes of Modernity: The Environment and Invisible Hazards*. Londres, Routledge, 1998.
- ALVERSON, H. *Semantics and Experience*. Baltimore, Johns Hopkins University Press, 1994.
- ASSAD, M. *Reading with Michel Serres: An Encounter with Time*. Albany, State University of New York Press, 1999.
- BERTMAN, S. *Hyperculture: The Human Cost of Speed*. Westport, CT, Praeger, 1998.
- BLOCK, R.A. (org.). *Cognitive Models of Psychological Time*. Hillside, Erlbaum, 1990.
- CHEREDNICHENKO, V.I. *Typology of Temporal Relations in Lyrics*. Tbilisi, Academia de Ciências da Geórgia, 1986 (em russo).
- COYNE, K. *A Day in the Night of America*. Nova York, Random House, 1992.
- CROSBY, A.W. *The Measure of Reality: Quantification and Western Society, 1250-1600*. Cambridge, Cambridge University Press, 1997.
- EDELMAN, G.M. *Neural Darwinism: The Theory of Neural Group Selection*. Nova York, Basic Books, 1987.
- . *The Remembered Present: A Biological Theory of Consciousness*. Nova York, Basic Books, 1989.
- . *Bright Air, Brilliant Fire: On the Matter of the Mind*. Nova York, Basic Books, 1992.

- EMERY, E. *Temps et musique*. Lausanne, L'Age d'Homme, 1998.
- EPSTEIN, D. *Shaping Time: Music, the Brain, and Performance*. Nova York, Schirmer Books, 1995.
- FLAHERTY, M.G. *A Watched Pot: How We Experience Time*. Nova York, New York University Press, 1999.
- FRIEDMAN, W.J. *The Developmental Psychology of Time*. Nova York, Academic Press, 1982.
- GEISSLER, K.A. *Zeit leben. Von Hasten und Rasten, Arbeiten und Lernen, Leben und Sterben*. 6^a ed. Berlim, Quadriga Verlag, 1997.
- GENDOLLA, P. *Zeit: zur Geschichte der Zeiterfahrung*. Colônia, Dumont, 1992.
- GLEICK, J. *Faster: The Acceleration of Just about Everything*. Nova York, Pantheon Books, 1999.
- GOODY, W. *Time and the Nervous System*. Nova York, Praeger, 1988.
- GREEN, A. *Le temps éclaté*. Paris, Les Editions de Minuit, 2000.
- GROSSIN, W. *Pour une science des temps: introduction à l'écologie temporelle*. Toulouse, Octares, 1966.
- HEISE, U. *Chronoschism: Time, Narrative and Postmodernism*. Cambridge, Cambridge University Press, 1997.
- JACKSON, J.B. *A Sense of Place, a Sense of Time*. New Haven, Yale University Press, 1994.
- JACOBS, M.T. *Short-Term America: The Causes and Cures of our Business Myopia*. Boston, Harvard Business School Press, 1991.
- KAEMPLER, Wolfgang. *Zeit der Menschen*. Frankfurt, Insel Verlag, 1994.
- KAFKA, J.S. *Multiple Realities in Clinical Practice*. New Haven/Londres, Yale University Press, 1989.
- KILWARDBY, R. "On time and imagination". In Osmund Lewry (org.) *De Tempore. De Spiritu Fantastico*. Nova York, Oxford University Press, 1987.
- KRAMER, J.D. *The Time of Music: New Meanings, New Temporalities, New Listening Strategies*. Nova York, Schirmer Books, 1988.
- LÉON-PORTILLA, M. *Time and Reality in the Thought of the Maya*. Boston, Beacon Press, 1968.
- MACAR, E., V. Pouthas, e W.J. Friedman. *Time, Action and Cognition: Towards Bridging the Gap*. Dordrecht, Kluwer Academic, 1992.

- MACEY, S.L. *The Dynamics of Progress: Time, Method and Measure*. Athens, GA, University of Georgia Press, 1989.
- MCFADDEN, S.H. e R.C. Atchley (org.). *Aging and the Meaning of Time*. Nova York, Springer, 2001.
- MELBIN, M. *Night as Frontier: Colonizing the World after Dark*. Nova York, Free Press, 1987.
- MICHON, J.A., V. Poulthas e J.L. Jackson (org.). *Guyau and the Idea of Time*. Amsterdã, North Holland, 1988.
- NOWOTNY, H. *Time: The Modern and Postmodern Experience*. Oxford, Polity Press, 1994.
- ORLOCK, C. *Inner Time*. Nova York, Birch Lane Press, 1993.
- POGORIŁOWSKI, A. *Energies of Musical Time: Essential Studies of Pulsatory Functionalism*. Bucarest, Ararat, 1994.
- RAPPAPORT, H. *Marking Time: How our Personalities, our Problems and their Treatment are Shaped by our Anxiety about Time*. Nova York, Simon & Schuster, 1990.
- READ, K.A. *Time and Sacrifice in the Aztec Cosmos*. Bloomington, Indiana University Press, 1998.
- REALE, P. *Tempo e personalità: una tecnica psichodiagnostics*. Roma, Bulzoni, 1992.
- REEHEIS, F. *Die Kreativität der Langsamkeit: Neuer Wohlstand durch Entschleunigung*. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1996.
- REINER, T. *Semiotics of Musical Time*. Nova York, Peter Lang, 2000.
- RICOEUR, P. *Time and Narrative*. Chicago, University of Chicago Press, 1988.
- RIZZI, P. *I Percorsi del tempo: sulla psicogenesi della temporalità*. Milão, Unicopli, 1988.
- ROBINSON, J.P. e G. Godbey. *Time for Life: The Surprising Ways Americans Spend their Time*. University Park: Pennsylvania State University Press, 1997.
- SCHIFFER, I. *The Trauma of Time*. Nova York, International Universities Press, 1978.
- SCOTT, C.E. *The Time of Memory*. Albany, State University of New York Press, 1999.

- SHACTER, D.L. *Searching for Memory: The Brain, the Mind, and the Past*. Nova York, Basic Books, 1996.
- SHEROVER, C. *The Human Experience of Time: The Development of its Philosophic Meaning*. Nova York, New York University Press, 1975.
- SLIFE, B.D. *Time and Psychological Explanation*. Albany, State University of New York Press, 1993.
- STONE, R.M. *Dried Millet Breaking: Time, Words, and Songs in the Wei Epic of the Kpelle*. Bloomington, Indiana University Press, 1988.
- TARKOWSKA, E. *Time in Polish Life: Results of Research, Hypotheses, Impressions*. Varsóvia, Polish Academy of Sciences, 1992 (em polonês).
- TEDLOCK, B. *Time and Highland Maya*. Albuquerque, University of New Mexico Press, 1987.
- TURNER, F. *Shakespeare and the Nature of Time*. Oxford, Clarendon Press, 1971.
- . *Rebirth of Value: Meditations on Beauty, Ecology, Religion and Education*. Albany, State University of New York Press, 1991.
- WEINER, J. *Time, Love, Memory*. Nova York, Knopf, 1999.
- WENDORFF, R. *Der Mensch und die Zeit*. Opladen, Westdeutscher Verlag, 1988.
- . (org.). *Im Netz der Zeit: menschliches Zeiterleben*. Stuttgart, Hirzel, 1989.
- YOUNG, M., e Schuller, T. (org.). *The Rhythms of Society*. Londres, Routledge, 1988.
- ZERUBAVEL, E. *Hidden Rhythms: Schedules and Calendars in Social Life*. Chicago, University of Chicago Press, 1981.

3. RELÓGIOS BIOLÓGICOS

- EDMUNDS, L.N. *Cellular and Molecular Bases of Biological Clocks*. Nova York, Springer-Verlag, 1988.
- HILDEBRANDT, G., M. Moser e M. Lehofer. *Chronobiologie und Chronomedizin: biologische Rhythmen, medizinische Konsequenzen*. Stuttgart, Hippokrates, 1998.
- HUGHES, M. (org.). *Body Clock: The Effects of Time on Human Health*. Nova York, Facts on File, 1989.

- MACAR, F. *Le temps: perspectives psychophysiologiques*. Bruxelles, Mardaga, 1980.
- MLETZKO, I. e H.-G. Mletzko. *Biorhythmik: Elementareinführung in die Chronobiologie*. Wittenberg, SiemensVerlag, 1985.
- . *Die Uhr des Lebens*. Leipzig, Urania Verlag, 1985.
- . *Die Zeit und der Mensch*. Leipzig, Urania Verlag, 1985.
- . *Mensch und Zeit*. Bad Hersfeld, Neuromedizin, 2002.
- PALMER, J.D. *Biological Clocks in Marine Organisms*. Nova York, Wiley-Interscience, 1974.
- PALMER, J.D. *The Biological Rhythms and Clocks of Intertidal Animals*. Nova York, Oxford University Press, 1995.
- . *The Living Clock: The Orchestrator of Biological Rhythms*. Nova York, Oxford University Press, 2002.
- ROSENBERG, G.D. e S.K. Runcorn (org.). *Growth Rhythms and the History of the Earth's Rotation*. Nova York, Wiley, 1975.
- SHEVING, L.E., F. Halberg e J.E. Pauly. *Chronobiology*. Stuttgart, Georg Thieme, 1974.
- SIMAKOV, K.V. *Origin, Development and Perspectives of the Theory of Paleobiospheric Time*. Magadan, North-East Science Press, 2001.
- SMOLENSKY, M. e L. Lamberg. *The Body Clock Guide to Better Health*. NovaYork, Henry Holt, 2000.
- TOUITO, Y. e E. Haus (org.). *Biological Rhythms in Clinical and Laboratory Medicine*. Nova York, Springer-Verlag, 1992.
- WENDORFF, R. *Die Zeit mit der wir Leben*. Iena, Heitkamp, 1991.
- YOUNG, M. *The Metronomic Society: Natural Rhythms and Human Timetables*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1988.

4. A MEDIDA DO TEMPO

- ANDREWES, W.J.H. *The Quest for Longitude*. Cambridge, MA, Collection of Historical Scientific Instruments, 1996.
- AVENI, A.F. *Empires of Time: Calendars, Clocks, and Cultures*. Nova York, Basic Books, 1989.
- BARNETT, J.E. *Time's Pendulum: The Quest to Capture Time – From Sundials to Atomic Clocks*. Nova York, Plenum Press, 1998.
- BARREAU, H. *Le temps*. Paris, Presses Universitaires de France, 1996.

- BARTKY, I.R. *Selling the Truth Time: Nineteenth Century Timekeeping in America*. Stanford, Stanford University Press, 2000.
- BEAR, M. *Days, Months & Years: A Perpetual Calendar*. Norfolk, Tarquin, 1989.
- BEDINI, S.A. *The Trail of Time: Time Measurement with Incense in East Asia*. Nova York, Cambridge University Press, 1994.
- BLAISE, C. *Time Lord: Sir Sandford Fleming and the Creation of Standard Time*. Nova York, Pantheon, 2000.
- CARDINAL, C. (org.). *La révolution dans la mesure du temps. Calendrier républicain, heures décimales 1793-1805*. La Chaux-de-Fonds, Musée International d'Horlogerie, 1989.
- CORBIN, A. *Village Bells: Sound and Meaning in the 19th Century French Countryside*. Trad. Martin Thom. Nova York, Columbia University Press, 1998.
- COYNE, G.V., M.A. Hoskin e O. Pedersen (org.). *Gregorian Reform of the Calendar*. Vaticano, Pontificia Academia Scientiarum, 1983.
- DOGGET, R. (org.). *Time: The Greatest Innovator. Timekeeping and Time Consciousness in Early Modern Europe*. Washington, Folger Shakespeare Library, 1986.
- DUNCAN, D.E. *Calendar: Humanity's Epic Struggle to Determine a True and Accurate Year*. Nova York, Avon, 1998.
- GOUK, P. *The Ivory Sundials of Nuremberg, 1500-1700*. Cambridge, Whipple Museum of the History of Science, 1988.
- GOULD, S.J. *Time's Arrow, Time's Cycle*. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1988.
- HEILBRON, J.L. *The Sun in the Church: Cathedrals as Solar Observatories*. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1999.
- HERBERGER, C.F. *The Thread of Ariadne: The Labyrinth of the Calendar of Minos*. Nova York, Philosophical Library, 1972.
- KING, H.C. *Geared to the Stars: The Evolution of Planetariums, Orreries, and Astronomical Clocks*. Toronto, University of Toronto Press, 1978.
- LANDES, D.S. *Revolution in Time: Clocks and the Making of Modern World*. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1983.
- MACEY, S.L. *Clocks and the Cosmos: Time in Western Life and Thought*. Hamden, CT, Archon Books, 1980.

- . *Patriarchs of Time: Dualism in Saturn-Cronus, Father Time, the Watchmaker God and Father Christmas*. Athens, GA, University of Georgia Press, 1987.
- MCCROSSEN, A. *Holiday, Holy Day: The American Sunday*. Ithaca, NY, Cornell University Press, 1986.
- NEEDHAM, J., W. Ling e D.J. deSolla Price. *The Hall of Heavenly Records: Korean Astronomical Instruments and Clocks 1380-1780*. Cambridge, Cambridge University Press, 1986.
- . *Heavenly Clockwork: The Great Astronomical Clocks of Medieval Chine*. Cambridge, Cambridge University Press, 1986.
- PARIS, F. (org.) *The Book of Calendars*. Nova York, Facts on File, 1982.
- SHERMAN, S. *Telling Time: Clocks, Diaries, and the English Diurnal Form, 1660-1785*. Chicago, University of Chicago Press, 1996.
- SMITH, M.M. *Mastered by the Clock: Time, Slavery, and Freedom in the American South*. Chapel Hill, University of North Carolina Press, 1997.
- SOBEL, D. *Longitude*. Nova York, Walker, 1985. [trad. Bras. *Longitude*, Rio de Janeiro, Ediouro, 1996.]
- TURNER, A. J. *Ritmi de Cielo e Misura del tempo*. Brugine, Edizione 1+1, 1985.
- TURRIANO, J. *Breve discurso a su Majestad el Rey Catolico en torno a la reducción del ano y reforma del calendario*. Madri, Fundación Juanelo Turriano, 1990.
- WAUGH, A.J. *Time: From Microseconds to Millenia: A Search for the Right Time*. Londres, Headline Books, 1999.
- WENDORFF, R. *Tag und Woche, Monat und Jahr: eine Kulturgeschichte des Kalenders*. Opladen, Westdeutscher Verlag, 1993.
- WILCOX, D.J. *The Measure of Time Past: Pré-Newtonian Chronologies and the Rhetoric of Relative Time*. Chicago, University of Chicago Press, 1987.
- ZERUBAVEL, E. *The Seven Days Circle: the History and Meaning of the Week*. Nova York, Free Press, 1985.

5. TEMPO E RELATIVIDADE

- BERNARD, P. *Philosophie et science du temps*. Paris, PUF, 1996.

- FRIEDMAN, W.J. *About Time: Inventing the Fourth Dimension*. Cambridge, MA, MIT Press, 1990.
- GOTT III, J.R. *Time Travel in Einstein's Universe. The Physical Possibilities of Travel through Time*. Nova York, Houghton Mifflin, 2001.
- KAZARYAN, V.P. *The Concept of Time in Philosophy and Physics*. Moscou, Nauka, 1980 (em russo).
- MARDER, L. *Time and the Space-Traveller*. Londres, Allen & Unwin, 1971.
- NAHIN, P.J. *Time Machines: Time travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*. Nova York, American Institute of Physics, 1991.

6. TEMPO, GRAVITAÇÃO E O UNIVERSO

- BARROW, J.D. *Between Inner Space and Outer Space*. Nova York, Oxford University Press, 1999.
- DAVIES, P. *About Time*. Nova York, Simon & Schuster, 1995.
- FAGG, L.W. *Two Faces of Time*. Wheaton, Quest, 1985.
- GORST, M. *Measuring Eternity: The Search for the Beginning of Time*. Nova York, Broadway, 2001.
- HAWKING, S.W. *A Brief History of Time*, 10th ed. atualizada e ampliada. Nova York, Bantam, 1998.
- LAYZER, D. *Cosmogenesis: The Growth of Order in the Universe*. Nova York, Oxford University Press, 1990.
- MITTELSTAEDT, R. *Der Zeitbegriff in der Physik*. Mannheim, Bibliographische Institut, 1980.
- PARK, D. *The Image of Eternity: Roots of Time in the Physical World*. Amherst, University of Massachusetts Press, 1980.
- THORN, K.S. *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. Nova York, W.W. Norton, 1994.

7. A ORIGEM E A FLECHA DO TEMPO

- FAGG, L.W. *The Becoming of Time*. Athens, GA, Scholars Press, 1995.
- HALLWELL, J., J. Pérez-Mercader e W.H. Zurek (org.). *Physical Origins of Time Asymmetry*. Cambridge, Cambridge University Press, 1994.
- HORWICH, P. *Asymmetries in Time*. Cambridge, MA, MIT Press, 1987.

- LEBEDEV, Y.A. *The Ambivalent Universe: Apocryphal Reflections upon Time's Arrows*. Moscou, Kostroma, 2000 (em russo).
- LESTIENNE, R. *Le hasard créateur*. Paris, Editions de la Découverte, 1993.
- . *The Children of Time: Causality, Entropy, Becoming*. Urbana, University of Illinois Press, 1995.
- PRICE, H. *Time's Arrow and Archimedes' Point*. Nova York, Oxford University Press, 1996.
- SAVITT, S. (org.). *Time's Arrow Today*. Cambridge, Cambridge University Press, 1995.

8. O SIGNIFICADO DE TEMPO

- DOLNIKOWSKI, E.W. *Thomas Bradwardine: A View of Time and a Vision of Eternity in Fourteenth Century Thought*. Leiden, Brill, 1995.
- GEISSLER, K.A. *Von Tempo der Welt: am Ende der Uhrzeit*. Freiburg, Herder, 1999.
- GIULIO, L. F. *Saggio di una cronologia delle idee e delle esperienze sul tempo*. Bolonha, CLUEB, 2000.
- HALPERN, P. *Time Journeys: A Search for Cosmic Destiny and Meaning*. Nova York, McGraw-Hill, 1990.
- HELM, B.P. *Time and Reality in American Philosophy*. Amherst, University of Massachusetts Press, 1985.
- HÖRZ, H. *Philosophie der Zeit*. Berlim, Verlag der Wissenschaften, 1989.
- MOLCHANOV, Y.B. *Four Conceptions of Time in Philosophy and Physics*. Moscou, Nauka, 1977 (em russo).
- RINDERSPRACHER, J.P. *Gesellschaft ohne Zeit*. Frankfurt, Campus Verlag, 1985.
- ROSENTHAL, S.B. *Time Continuity and Indeterminacy: A Pragmatic Engagement with Contemporary Perspectives*. Albany, State University of New York Press, 2000.
- SANDBOTHE, M. *Die Verzeitlichung der Zeit: Grundtendenzen der modernen Zeitdebatte in Philosophie und Wissenschaft*. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1998.
- SHEROVER, C.M. *Time, Freedom, and the Common Good: An Essay in Public Philosophy*. Albany, State University of New York Press, 1990.

Volumes de coletâneas de artigos

- ACHTNER, W., S. Kunz e Walter, T. (org.). *Dimensionen der Zeit: Die Zeitstrukturen Gottes, der Welt und des Menschen*. Darmstadt, Primus, 1998.
- AVENI, A. F. (org.). *World Archeoastronomy: Selected Papers from the 2nd Oxford International Conference on Archeoastronomy*. Cambridge, Cambridge University Press, 1989.
- BAUDSON, M. (org.). *Zeit: Die Vierte Dimension in der Kunst*. Weinheim, Acta Humaniora, 1985.
- BIERVERT, B. e M. Held (org.). *Zeit in der Ökonomik: Perspektiven für die Theoriebildung*, Frankfurt, Campus Verlag, 1995.
- BUCCHERI, R., V. di Gesu, V. e M. Saniga (org.). *Studies on the Structure of Time: From Physics to Psychopathology*. Nova York, Kluwer Academic/Plenum, 2000.
- BUCCHERI, R., e M. Saniga (org.). *The Nature of Time: Geometry, Physics and Perception*. Moscou, Kluwer Academic/Plenum, 2002.
- BUTTERFIELD, J. (org.). *The Arguments of Time*. Nova York, OxfordUniversity Press, 1999.
- CARDINAL, C., F. Jequier, J-M. Barrelet e A. Beiner (org.). *L'homme et le temps en suisse, 1291-1991*. La Chaux-de-Fonds, Musée International d'Horlogerie, 1991.
- CASTELLI, E. (org.). *Il tempo*. Pádua, Cedam, 1958.
- CLEARY, T.R. (ed.) *Time, Literature and the Arts: Essays in Honor of Samuel L. Macey*. Victoria, BC, University of Victoria Press, 1994.
- FECHTRUP, H., F. Schulze e T. Sternberg (org.). *Zwischen Anfang und Ende: Nachdenken über Zeit, Hoffnung und Geschichte*. Munique, Lit Verlag, 2000.
- FORMAN, F.J. e C. Sowton (org.) *Taking our Time: Feminist Perspectives on Temporality*. Oxford, Pergamon Press, 1989.
- FRASER, J.T. (org.). *The Voices of Time: A Cooperative Survey of Man's Views of Time as Expressed by the Sciences and the Humanities*. Nova York, Braziller, 1996; e Londres, Allen Lane the Penguin Press, 1968; 2^a ed., Amherst, University of Massachusetts Press, 1981. [Como e-book, em.]

- . *Time and Mind: The Study of Time VI*. Madison, CT, International Universities Press, 1989.
- FRASER, J.T., F.C. Haber e G.H. Müller (org.). *The Study of Time I*. NovaYork, Springer-Verlag, 1972.
- FRASER, J.T. e N. Lawrence (org.). *The Study of Time II*. Nova York, Springer-Verlag, 1975.
- . *Time, Science, and Society in China and the West: The Study of Time V*. Amherst, University of Massachusetts Press, 1986. [Como e-book, em.]
- FRASER, J.T., N. Lawrence e D. Park (org.). *The Study of Time III*. NovaYork, Springer-Verlag, 1978.
- . *The Study of Time IV*. Nova York, Springer-Verlag, 1981.
- FRASER, J.T. e Rowell, L. (ed.). *Time and Process: The Study of Time VII*. Madison, CT: International Universities Press, 1992.
- FRASER, J.T. e M.P. Soulsby (ed.). *Dimensions of Time and Life: The Study of Time VIII*. Madison, CT, International Universities Press, 1995.
- . *Time at the Millenium: Changes and Continuities: The Study of Time X*. Madison, CT, International Universities Press, 2000.
- FRASER, J.T., M.P. Soulsby e A. Argyros (org.). *Time, Order, Chaos: The Study of Time IX*. Madison, CT, International Universities Press, 1998.
- GIMMLER, A., M. Sandbothe e W.C. Zimmerli (org.). *Die Wiederentdeckung der Zeit: Reflexionen, Analysen, Konzepte*. Darmstadt, Primus, 1997.
- HEINEMANN, G. (org.). *Zeitbegriffe: Zeitbegriffe der Naturwissenschaften, Zeiterfahrung und Zeitbewusstsein*. Freiburg, Karl Alber, 1986.
- HEINTEL, P. e T. Macho, T. (org.). *Zeit und Arbeit hundert Jahre nach Marx*. Viena, Wissenschaftliche Gesellschaft Österreichs, 1985.
- HELD, M. e K.A. Geissler (org.). *Von Rhythmen und Eigenzeiten: Perspektiven einer Ökologie der Zeit*. Stuttgart, Hirzel, 1995.
- HERSCG, J. e R. Poirier, R. (org.). *Entretiens sur le temps*. Paris, Mouton, 1967.
- HUGHES, D.O. e T. Trautman, T. (org.). *Time: Histories and Ethnologies*. Ann Arbor, University of Michigan Press, 1995.
- LEVICH, A.P. (org.). *On the Way to Understanding the Time Phenomenon: The Construction of Time in natural Science*. 2 vol. Cingapura, World Scientific, 1995-96.

- MALLLMANN, C.A. e Nudler, O. (org.). *Time, Culture, and Development*. Bariloche, Fundación Bariloche, 1986.
- OAKLANDER, L.N. (org.). *The Importance of Time: Proceedings of the Philosophy of Time Society, 1995-2000*. Dordrecht, Kluwer, 2001.
- PAFLIK, H. (org.). *Das Phänomen der Zeit in Kunst und Wissenschaft*. Weinheim, Acta Humaniora, 1987.
- PAISL, A. e A. Mohler (org.). *Die Zeit*. Munique, Oldenburg, 1983.
- PFUSTERSCHMID-HARDTENSTEIN, H. (org.). *Zeit und Wahrheit*. Viena, Ibero, 1995.
- RINDERSPRACHER, J.P. (org.). *Zeit für die Umwelt: Handlungskonzepte für eine ökologische Zeitverwendung*. Berlim, Sigma, 1996.
- SABBADINI, A. (org.). *Il tempo in psicoanalisi*. Milão, Feltrinelli, 1979.
- SCHALL, J. (org.). *Tempus Fugit: An Exhibition Catalog*. Kansas City, MO, Nelson-Atkins Museum of Art, 2000.
- SZALAT, A. e P.E. Converse (org.). *The Use of Time*. Haia, Mouton, 1972.
- THOLEN, G.C., M. Scholl e M. Heller (org.). *Zeitreise; Bilder/Maschinen/Strategien/Rätsel*. Basiléia, Stroemfeld/Roten Stern, 1993.
- TURNER, A.J. (org.). *Time: An Exhibition Catalog*. Haia, Tijd voor Tijd Foundation, 1990.
- VON AUER, F., K. Geissler e H. Schauer (org.). *Auf der Suche nach gewonnener Zeit*. Mössingen-Talheim, Talheim Verlag, 1990.
- WEIS, K. (org.). *Was treibt die Zeit: Entwicklung um Herrschaft der Zeit in Wissenschat, Technik und Religion*. Munique, DTV, 1998.
- WIECK, R.S. (org.). *Time Sanctified: The Book of Hours in Medieval Art*. Nova York, Braziller, 1988.
- ZAJACZKOWSKI, A. (org.). *Czas w Kulturze*. Varsovia, Pantswowy Insytut Wydawniczy, 1988.
- ZOLL, R. (org.). *Zerstörung und Wiederaneignung der Zeit*. Frankfurt, Suhrkamp, 1988.

Estudo integrado do tempo por J.T. Fraser

Time, Conflict, and Human Values. Urbana and Chicago University of Illinois Press, 1999.

Of Time, Passion, and Knowledge: Reflections on the Strategy of Existence.
2ª ed. Princeton University Press, 1990.

Time the Familiar Stranger. Amherst, University of Massachusetts Press,
1987. (Também em alemão, italiano e braille inglês.)

The Genesis and Evolution of Time: A Critique Interpretation in Physics.
Amherst, University of Massachusetts Press, 1982. (Também em
espanhol e japonês.)

Time as Conflict: A Scientific and Humanistic Study. Basileia/Boston,
Birkhäuser, 1978.

* Dedicado aos membros da Sociedade Internacional de Estudo do Tempo.

¹ *Henrique IV*, V, iv.82

² A Associação Mudfog é o tema de Charles Dickens em *Sketches by Boz*, Nova York, Bigelow, s.d., vol.2, "The Mudfog Papers", p. 353-436.

³ Barrow, J.D. *Theories of Everything: The Quest for Ultimate Explanation*, Oxford, Clarendon Press, 1991, p.210.

⁴ Fraser, J.T., N. Lawrence e D. Park (org.), *The Study of Time VI*, Nova York, Spring-Verlag, 1981, p.234-70.

⁵ Nova York, Garland, 1991.

Índice remissivo

Os números em negrito referem-se às páginas com ilustração.

A filosofia natural do tempo (Whitrow), 1-2, 3-4, 5

a secco, pintura, 1

abelhas, 1-2, 3-4

aborígenes: sentido do tempo, 1

afresco, pintura, 1

Ahriman, 1

Allard, H.A., 1

almas

 e memória, 1-2

 migração, 1-2

amnésia, 1-2, 3-4

Anamnesis, 1

anãs brancas, 1, 2

aprendizado, processo de, 1, 2-3

Aristóteles, 1

Arquimedes, 1

Asmundson, S.J., 1

atenção, 1-2, 3-4

aves migratórias, 1-2

babilônios, 1, 2, 3, 4

Bacon, Francis, 1

barata, 1-2

baratinha de areia, 1

Barrow, J.D., 1
Barrows, Isaac, 1, 2-3, 4
Bartlett, Frederic, 1
Becquerel, Henri, 1
Berdyayev, Nicolas, 1
Bergson, Henri, 1
Bernardo de Chartres, 1
Blum, Harold F., 1
bola de fogo primordial, 1, 2
Boltwood, B.B., 1
Boltzmann, Ludwig, 1
Boyle, Robert, 1
Brahe, Tycho, 1
Brazier, Mary A.B., 1
Broad, C.D., 1
Buffon, Georges-Louis Leclerc de, 1
Bünning, Erwin, 1-2, 3
buracos negros, 1-2, 3, 4

cabeça, relógio da, 1
cachorros, 1, 2
caldeus, 1
calendário
 eclesiástico, 1-2
 egípcio, 1
 gregoriano, 1, 2
 maia, 1-2
campo gravitacional, 1-2, 3-4, 5-6, 7-8
Capela Sistina, 1
caranguejos, 1
carbono-1, 2-3
Cartas persas (Montesquieu), 1
causalidade, 1, 2
caverna experimental, 1

cérebro,
 atividade elétrica, 1, 2
 estimulação do córtex, ou cortical, 1
 extirpações, 1
 hipocampo, 1, 2
 lobos pré-frontais, 1
 relógio da cabeça, 1
 ritmo alfa, 1
césio, relógio de, 1-2, 3
cheias do rio Nilo, 1
chimpanzés, 1, 2-3
ciclóide, 1, 2-3
clepsidra, *ver* relógio de água
Clerk Maxwell, James, 1-2
colapso gravitacional, 1-2
collapsar, 1
cometa de 1680, 1
compactação do tempo, 1
comportamento animal, 1-2, 3, 4-5
comportamento das plantas, 1, 2, 3-4
conceito de ego, 1-2, 3-4
constante de Hubble, 1-2
Constantino, imperador, 1
corpos que caem, lei dos, 1
Correspondence of Isaac Newton, The (Turnbull), 1 n.1
córtex,
 estimulação elétrica, 1
 extirpações, 1
covariância, 1, 2-3, 4-5
Cristo, 1, 2, 3
crono, 1
cronologia bíblica, 1, 2
cronômetro marinho, 1

Darwin, Charles, 1, 2, 3
datação, 1-2, 3, 4-5
datação, seqüência de, 1-2
David Copperfield (Dickens), 1
de Sitter, Universo de, 1
de Sitter, Willem, 1
déjà vu, 1-2
Deranged Memory (Talland), 1
Descartes, René, 1, 2
desvio gravitacional para o vermelho, 1
dia sideral, 1
Dicke, R.H., 1
Dickens, Charles, 1, 2
Diderot, Denis, 1, 2
dinheiro, economia de, 1
discriminação temporal, 1, 2, 3-4, 5-6
Discursos geométricos (Barrow, Isaac), 1-2
Discursos sobre duas novas ciências (Galileu), 1
disritmia, 1
dualismo, 1
Dunne, J.W., 1
duração, 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10
duração do dia, 1-2

eclipses, 1
Eddington, Arthur S., 1, 2
efeito Doppler, 1-2, 3
efeitos do envelhecimento, 1-2
efeitos emocionais, 1-2
egípcio, calendário, 1
Ehret, C.F., 1 n.1
Einstein, Albert *ver* relatividade, 1-2, 3-4
eletroencefalograma, 1
elevador, experimento do, 1

engrama, 1

Ensaio sobre o entendimento humano

(Locke), 1, 2, 3, 4

entropia, 1-2, 3 n.2

Epístola aos hebreus, 1

Epithalamion (Spenser), 1

Epsilon Aurigae, 1

equação do tempo, 1-2, 3

equações de campo, 1-2, 3-4

equações de campo de Einstein, 1, 2-3, 4, 5

equilíbrio termodinâmico, 1

equinócios, precessão dos, 1

equivalência, princípio da, 1, 2-3, 4, 5

escalas de tempo, 1, 2-3

escape, 1, 2, 3, 4, 5, 6

escape em âncora, 1, 2

escape em haste, 1, 2, 3,

espaço-tempo, 1-2, 3-4, 5-6

esquecimento *ver* amnésia, 1, 2, 3-4

esquilo, 1-2

Essen, L., 1

estado inicial, 1

estóicos, sua teoria do tempo, 1-2

estorninhos, 1, 2

Estrasburgo, relógio de, 1

estratificação das rochas, 1-2

estrelas *ver* estrelas anãs; estrelas binárias; estrelas de nêutrons; estrelas variáveis; supernova

estrelas de nêutrons, 1-2, 3

estrelas anãs, 1, 2

estrelas binárias, 1

estrelas variáveis, 1

éter, 1, 2, 3

eterno retorno, 1, 2-3

evolução

biológica, 1, 2-3

cósmica, 1-2

irreversibilidade, 1-2

Experiment with Time, An (Dunne), 1

extra-sensorial, percepção, 1-2

fadiga de fuso horário, 1-2

Fisher, K.C., 1

Fitzgerald-Lorenz, contração de, 1, 2

Flamsteed, John, 1

flashback, 1-2, 3

florescimento, efeito da luz, 1, 2

flutuações termodinâmicas, 1

Forel, Auguste, 1

fósseis, 1, 2, 3, 4

fotoperiodismo, 1, 2-3

Fraisse, Paul, 1

Fraser, J.T., 1, 2

freqüência, medida de, 1-2

Freud, Sigmund, 1

fricção das marés, 1, 2

Frisch, Karl von, 1-2, 3-4

Frost, Robert, 1

furões, 1

fusos horários, 1-2, 3

futuro *ver* passado, presente e futuro

galáxias, 1, 2-3, 4, 5-6, 7

Galileu Galilei, 1, 2, 3, 4, 5

Garner, W.W., 1

Genèse de l'idée du temps, La (Guyau), 1, 2 n.1

geodésica, 1

GMT *ver* hora de Greenwich

Grande Ano, 1

gravitação, 1, 2, 3, 4-5
 constância da, 1-2
 teoria de Einstein *ver* relatividade, teoria geral
 teoria de Newton, 1, 2-3, 4-5, 6-7, 8-9, 10
gregoriano, calendário, 1, 2
Gregório XIII, papa, 1
gregos, 1, 2-3, 4, 5, 6, 7
guilda de relojoeiros, 1
Guyau, M., 1-2, 3
Gwinner, Eberhard, 1

Halley, Edmund, 1-2
Harker, Janet, 1
harmonia preestabelecida, 1, 2, 3
Harrison, John, 1
hebreus, 1, 2, 3
Helmholtz, H.L.F. von, 1, 2
Henrique IV (Shakespeare), 1, 2
Heráclito, 1
Hertz, Heinrich, 1
hibernação, 1, 2
Hieatt, A. Kent, 1, 2 n.2
hinduísmo, visão do tempo no, 1
hipnose, 1, 2, 3
hipocampo, 1, 2
História universal e teoria dos céus (Kant), 1
Hoffmann, B., 1
Hoffmann, K., 1
homem de Neanderthal, 1, 2
Homero, 1
Hooke, Robert, 1, 2-3
hora
 divisão, 1-2, 3, 4
 equinocial, 1

- igual, 1
- temporal, 1
- hora de Greenwich, 1, 2, 3, 4
- horário de verão, 1
- horas temporais, 1
- horizonte de criação, 1-2
- horizonte de evento, 1-2
- horizontes temporais, 1-2
- Hubble, Edwin P., 1, 2-3
- Hutton, James, 1
- Huygens, Christiaan, 1, 2, 3, **4**, 5

- Ilíada* (Homero), 1
- inerciais, estruturas de referência, 1, 2
- Infeld, L., 1
- informação, 1
- interações nucleares, 1-2
- interferômetro, 1-2, **3**
- irreversibilidade
 - evolução biológica, 1-2
 - radiação solar, 1
 - tempo, 1, 2-3, 4-5
- isocronismo, 1, 2
- isotropia, 1-2, 3, 4

- James, William, 1
- Janet, Pierre, 1, 2
- Joly, John, 1
- Jorge IV, 1
- judeus *ver* hebreus
- juízo final*, *O* (Michelangelo), 1
- julianos, dias, 1

- Kant, Immanuel, 1, 2, 3, 4-5, 6, 7
- Kelvin, lorde, 1, 2, 3

Kepler, Johannes, 1, 2
Köhler, Wolfgang, 1-2
Korsakoff, síndrome de, 1
Kramer, Gustav, 1
KronoScope: Journal for the Study of Time, 1
Laplace, Pierre Simon, 1
Lashley, K.S., 1
Layzer, David, 1-2
lei do domingo, 1, 2-3
Leibniz, Gottfried Wilhelm von, 1, 2-3, 4, 5
leis naturais
 invariância da reversão do tempo, 1
 uniformidade, 1
liberadores, 1-2
linear, tempo, 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10
Lineus, Carl, 1
linhas de Universo, 1, 2-3, 4, 5
Livro de Daniel, 1, 2
lobos pré-frontais, 1
Locke, John, 1, 2, 3, 4, 5
longitude: determinação da, 1-2, **3**
Lorentz, fórmulas de, 1-2 Lorentz, H.A. ver Fitzgerald-Lorentz, contradição de; fórmula de Lorentz
Lua, 1, 2, 3, 4
Lutero, Martinho, 1
luz do dia,
 efeito do movimento da folha, 1-2
 efeito sobre a brotação das plantas, 1-2
 efeito sobre a procriação, 1-2, 3-4
 fotoperiodismo, 1-2, 3-4
luz ver luz do dia
 deflexão, 1-2
velocidade, 1, 2-3, 4-5, 6, 7, 8, **9**, 10, 11

maçarico de pernas amarelas, 1

Macey, Samuel L., 1
Mach, Ernst, 1
maias, 1-2
Mairan, Jean Baptiste de, 1
Mann, Thomas, 1-2
manuscritos do mar Morto, 1
Marduk, 1
Marshak, Samuel, 1
massa: efeito relativístico, 1, 2-3
Maxwell, James Clerk, 1-2
McTaggart, J.M.E., 1-2
mecânicos, relógios, 1, 2-3, 4
medição do tempo, 1-2, 3-4, 5, 6, 7-8, 9-10
medida do tempo, 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9, 10
meia-vida, 1, 2, 3
memória, 1, 2-3
memória nos animais, 1-2, 3, 4-5
Mending wall (Frost), 1, 2 n.5
Mentality of Apes, The (Köhler), 1
Mercúrio, 1
meridiano, 1
Merton, Robert K., 1 n.2
metabólico, relógio, 1-2, 3
metempsicose, 1
Michelangelo Buonarotti, 1
Michelson, A.A., 1-2
Michelson-Morley, experimento de, 1-2, 3
Milne, E.A., 1, 2, 3
Minkowski, Hermann, 1-2, 3, 4
“Misticismo e lógica” (B. Russell), 1
mitraísmo, 1, 2
modelos de Universo, 1-2, 3-4
em de Sitter, 1-2
em Milne, 1, 2

montanha mágica, A (Thomas Mann), 1
Montesquieu, Charles de Secondat, 1
moscas, metabolismo, 1
Mössbauer, efeito de, 1
movimento, leis do *ver* Newton, Isaac
mu-mésons, 1
Mumford, Lewis, 1

Nascimento masculino do tempo, O (Bacon), 1
Natal, 1
navegação das aves, 1-2, 3
nebulosa, 1
Nemésio, bispo de Emesa, 1
Neugebauer, Otto, 1
neutrinos, 1
Newton, Isaac, 1, 2, 3, 4, 5-6
 leis do movimento, 1-2, 3, 4, 5, 6-7, 8-9
 tempo absoluto, 1-2, 3, 4-5, 6, 7
 teoria da gravitação, 1, 2-3, 4, 5-6, 7-8, 9-10

O livro das revelações, 1
observadores fundamentais, 1-2, 3, 4-5, 6, 7, 8
Observatório Real de Greenwich, 1, 2
oceanos,
 marés, 1, 2, 3
 salinidade, 1-2
Ohrmazd, 1
Oldenburg, Henry, 1
Olimpíadas, 1
“On the Universe” (Heráclito), 1 n.4
ordem temporal *ver* passado, presente e futuro

Pai da Igreja *ver* santo Agostinho
Pai Tempo, 1, 2
palolo, verme, 1

Panofsky, Erwin, 1
paradoxo do relógio, 1
Parmênides, 1
Páscoa, 1-2, 3
passado, presente e futuro, 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9, 10, 11-12, 13-14
pássaros canoros, 1, 2
Pavlov, Ivan Petrovich, 1
pêndulo, relógios de, 1, 2, 3, 4, 5, 6
Penfield, Wilder, 1-2
Pengelley, E.T., 1-2
Pentreath, Guy, 1
Pitágoras, 1, 2
pitu, 1
planária, 1
Platão, 1, 2, 3, 4-5, 6
Poincaré, Henri, 1-2
pombos: instinto de voltar para casa, 1-2
ponto de Universo, 1-2
Pound, R.V., 1
Power of Movement in Plants, The (Darwin), 1
precessão dos equinócios, 1, 2
pré-conhecimento, 1-2
presente *ver* passado, presente e futuro
previsão do tempo, 1-2
Principia (Newton), 1-2, 3
princípio de covariância geral, 1, 2, 3
princípio de equivalência, 1, 2-3, 4, 5
procriação: efeito da luz sobre, 1-2, 3-4
progresso histórico, 1, 2-3, 4
pulsares, 1-2, 3-4
pulso, 1, 2

quasars, 1

radiação de microonda, 1-2

radioativo, decaimento, 1-2, 3, 4
radioativos, depósitos, 1
radioativos, relógios, 1-2, 3-4
rádio-carbono, datação, 1-2
raios cósmicos, 1
rapto de Lucrecia, O (Shakespeare), 1
Rayleigh, lorde, 1
Rebka, G.A., 1
relatividade
 princípio, 1, 2-3
 teoria especial, 1, 2-3, 4-5, 6-7, 8-9, 10-11, 12-13, 14, 15-16
 teoria geral, 1, 2-3, 4, 5, 6-7, 8
Religion and the Decline of Magic (Thomas), 1
relógio atômico, 1-2, 3-4
relógio de acumulação, 1, 2-3
relógio de degeneração, 1-2
relógios *ver* relógios de água; relógios de sol; relógios de areia
 atômicos, 1-2, 3-4
 biológicos, 1-2, 3
 coral, 1
 de césio, 1-2, 3-4
 de sódio, 1
 mecânicos, 1, 2-3, 4
 radioativos, 1-2, 3-4
relógios biológicos, 1-2, 3
relógios celulares, 1
relógios de água, 1, 2-3, 4, 5
relógios de areia, 1, 2-3
relógios de coral, 1
relógios de sol, 1, 2, 3-4
relógios-mestres, 1-2
Remembering (Bartlett), 1
“Report on the Literature of Time, 1900-1980” (Fraser), 1-2
República, A (Platão), 1

reversão do tempo, invariância da, 1
Richter, C.P., 1
riemania, geometria, 1, 2
Riemann, G.F.B., 1
ritmo *ver* alfa, circadiano, circanual, das marés, lunar
 como é sentido pelo homem, 1
 nas doenças, 1
 no movimento das folhas, 1-2
ritmo alfa, 1
ritmo circadiano, 1-2, 3-4, 5
ritmo circanual, 1-2
ritmo da maré, 1
ritmo lunar, 1
ritual, 1-2, 3
rochas: estratificação, 1-2
romanos, 1-2, 3, 4
Rousseau, Jean-Jacques, 1
Rowan, William, 1, 2
Russell, Bertrand, 1, 2
Rutherford, lorde, 1, 2, 3, 4
Rutherford-Soddy, lei de, 1, 2, 3

Sandage, Allan, 1
santo Agostinho, 1, 2
Sauer, E.F.G., 1
Scaliger, J.J., 1
Schwarzschild, raio, 1-2
Scienza nuova (Vico), 1
segunda lei da termodinâmica, 1-2, 3-4
segundo: definição de, 1-2
seleção natural, 1, 2
semana de sete dias, 1, 2-3
semana planetária, 1
sepultamento, costumes, 1-2

série antes-e-depois, 1-2
Shakespeare, William, 1-2, 3, 4
Short Time's Endless Monument (Hieatt), 1 n.2
simultaneidade, 1, 2-3, 4-5, 6, 7-8
sinais eletromagnéticos, 1, 2
sinal da memória, 1-2
singularidades, 1-2, 3, 4
sinos, 1-2
Sirius, 1
sistema sexagesimal, 1
Sitter, Willem de, 1
Sketches by Boz (Dickens), 1, 2 n.2
Sobre os ombros de gigantes (Merton), 1 n.2
Sociedade Internacional para Estudo do Tempo, 1
Sócrates, 1, 2-3
Soddy, Frederick, 1, 2, 3
sódio, relógio de, 1
Sol,
 calor, 1, 2
 campo gravitacional, 1-2
 eclipses, 1, 2
 dia solar médio, 1-2
 idade, 1-2
 massa, 1
 movimento, 1, 2-3, 4 n.8
 radiação, 1-2, 3
 raio (medida), 1
Spencer, Herbert, 1
Spenser, Edmund, 1-2
Studies in Iconology, Humanistic Themes in the Art of the Renaissance
 (Panofsky), 1 n.1
Study of Time, The, 1
Su Sung, 1, 2
supernova de 1572, 1

Swendenborg, Emanuel, 1

Talland, George, 1-2

técnicas de datação, 1-2

Teeteto (Platão), 1

tempo *ver* absoluto; astronômico; atômico; cíclico; coordenado; cósmico;
finito; geológico; horizontes de tempo; infinito, linear; matemático;
medida de tempo; próprio; relacional

atomicidade, 1-2

continuidade, 1-2, 3, 4, 5-6, 7, 8-9

dilatação, 1-2, 3, 4-5, 6

dimensionalidade, 1-2

duração, 1-2, 3-4, 5, 6, 7-8, 9-10

e o Universo, 1, 2, 3, 4-5, 6-7, 8, 9-10

estimativa, 1-2

experiência, 1, 2-3, 4-5

homogeneidade, 1, 2, 3, 4-5

irreversibilidade, 1, 2-3, 4-5

literatura, 1-2

origem, 1, 2

passagem *ver* passado, presente e futuro

percepção, 1-2, 3-4, 5-6

representação simbólica, 1

sentido do, 1-2, 3-4, 5-6

seu simbolismo na literatura, 1

uniformidade, 1-2, 3-4

visão cristã, 1-2, 3, 4

visão dos estóicos, 1-2

visão grega, 1, 2, 3, 4

visão hindu, 1-2

visão iraniana, 1

visão maia, 1-2

tempo absoluto, 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9

tempo astronômico, 1-2, 3-4, 5, 6-7

tempo atômico, 1, 2-3

tempo cíclico, 1, 2-3, 4-5, 6-7
tempo coordenado, 1
tempo cósmico, 1-2, 3, 4, 5-6, 7
tempo ephemeris, 1
tempo finito, 1
tempo geológico, 1-2, 3, 4-5, 6
tempo infinito, 1-2
tempo matemático, 1-2
tempo próprio, 1, 2
tempo relacional, 1, 2-3, 4, 5-6
tempo solar, 1-2, 3, 4-5, 6
tempo solar médio, 1-2, 3-4
Tempo Universal (UT), 1
tempo zero, 1, 2-3, 4-5
teoria copernicana, 1
teoria eletromagnética, 1
teoria iraniana do tempo, 1
termodinâmica: segunda lei da, 1, 2-3
Terra,
 aquecimento, 1-2, 3-4
 campo gravitacional, 1-2
 idade, 1, 2-3
 movimento, 1, 2-3
 rotação, 1, 2-3, 4, 5, 6-7
Theories of Everything (Barrow, J.D.), 1 n.3
Theory of the Earth (Hutton), 1
Thomas, Keith, 1
Time: A Bibliographic Guide (Macey), 1
Timeu (Platão), 1
Timeu, 1-2
Towneley, Richard, 1
transformação, 1
transformações nucleares, 1
trópico, ano, 1

Turnbull, W.H., 1 n.1

Universo *ver também* tempo e Universo

cíclico, 1, 2

contração, 1, 2

em bloco, 1, 2, 3

evolução, 1-2, 3

expansão, 1-2, 3-4

idade, 1-2, 3-4

isotropia, 1-2, 3, 4

modelos *ver* modelos de Universo

radiação de microondas, 1-2

Universo cíclico, 1-2, 3-4

Universo em bloco, 1, 2, 3-4

Universo em expansão, 1-2, 3-4

urânio-chumbo, datação, 1

urânio-hélio, datação, 1

Ussher, James, arcebispo, 1

veados, crescimento dos chifres, 1

velocidade da luz *ver* luz

velocidade de escape, 1-2, 3

verme de areia, 1

vermelho, desvios para o,

extragalácticos, 1-2, 3-4, 5

gravitacionais, 1

vermes chatos (planárias), 1-2, 3

Via Láctea, 1, 2

Vico, Giovanni Battista, 1

Virgem, constelação, 1

visão cristã do tempo, 1-2, 3, 4-5

Vitrúvio, 1

Wells, G.P., 1

Wells, J.W., 1

Weyl, Hermann, 1-2

Whitehead, A.N., 1

Whithrow, G.J., 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

Zodíaco, 1, 2

zoroastrismo, 1, 2

Zurvan, 1, 2

Título original:
What is Time?
(*The Classic Account of the Nature of Time*)

Tradução autorizada da edição em brochura publicada em 2003
por Oxford University Press, de Oxford, Inglaterra

Originalmente publicado em inglês em 1972.

Copyright © 1972, G.J. Whitrow
Copyright da Introdução, © 2003, J.T. Fraser
Copyright do Ensaio bibliográfico, © 2003, J.T. Fraser e M.P. Soulsby

What Is Time? Was originally Publisher in English in 1972.
This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

Copyright da edição brasileira © 2005:
Jorge Zahar Editor Ltda.
rua Marquês de S. Vicente 99 - 1º andar
22451-041 Rio de Janeiro, RJ
tel (21) 2529-4750/ fax: (21) 2529-4787
email: editora@zahar.com.br
site: www.zahar.com.br

Todos os direitos reservados.
A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo
ou em parte, constitui violação de direitos autorais. (Lei 9.610/98)

Capa: Sérgio Campante

Produção Digital: Hondana
Edição digital: Setembro de 2013
ISBN: 978-85-378-0407-0



Your gateway to knowledge and culture. Accessible for everyone.



z-library.se

singlelogin.re

go-to-zlibrary.se

single-login.ru



[Official Telegram channel](#)



[Z-Access](#)



<https://wikipedia.org/wiki/Z-Library>