

---

# O tempo na física

Henrique Fleming



**HENRIQUE FLEMING** é professor do Instituto de Física da USP, no departamento de Física Matemática.

Neste artigo, destinado a leitores não-especialistas, mas afeitos ao pensamento teórico, pretendemos descrever as contribuições da física, em especial da física deste século, à elucidação da natureza do tempo e de suas relações com outros conceitos fundamentais usados na ciência. O tempo de que vamos falar não é nenhuma construção especial da física moderna, mas é o tempo mesmo, de domínio público, e sobre o qual se manifestaram muitos filósofos importantes, dois dos quais, Santo Agostinho e Kant, exerceram e exercem grande influência sobre os físicos mais indagadores. Kant, por sua origem, nos está mais próximo, em suas considerações sobre o tempo (nas Antinomias, por exemplo). Mas mesmo filósofos deliberadamente distantes da ciência, como Benedetto Croce, influem sobre a conceituação do tempo na física, ou iluminam a interpretação daquilo que a estrutura formal das teorias nos propõe ou impõe. Pois o que é um resultado importante na física? A resposta esperada, de que importante é o resultado que encontra aplicação na vida prática, é correta, mas aborda só um lado da questão e nem mesmo o mais importante. Em 1957, Chen Ning Yang e Tsung Dao Lee receberam o prêmio Nobel de física pela descoberta de que a natureza permite que se defina a mão esquerda de maneira absoluta (ou seja, sem ser por comparação com uma mão direita). Nenhum prêmio Nobel de física foi considerado tão importante quanto este, desde então. As aplicações práticas (dentro da física) da descoberta de Yang e Lee foram surgindo com o tempo, na teoria dos neutrinos, nas modernas teorias de grande unificação, etc. Mas o seu grande impacto se deve ao fato de que ensinou algo sobre um problema de antiga tradição na filosofia, tema dos debates Leibnitz-Clarke, e que ainda não se esgotou até hoje. Vale dizer, um problema que está na raiz mesma do nosso conhecimento do Universo, ou do conhecimento *tout court*. Enfim, um resultado é tanto mais importante na física quanto mais nobre o *pedigree* do problema ao qual ele se refere. Uma ocasião, foi perguntado a Einstein por que, tendo ele estudado em uma escola mais forte em matemática do que em física, tinha escolhido esta última como carreira. "Porque, respondeu, na física sou capaz de discernir os problemas importantes, enquanto que na matemática não." Não há dúvida de que ele se referia ao critério de importância a que nos referimos acima. Pois bem, a física moderna obteve resultados que nos parecem importantes sobre o conceito de tempo e suas relações, algumas totalmente inesperadas, com outros conceitos fundamentais na descrição da realidade. Apresentaremos uma descrição das relações entre tempo e espaço (teoria da relatividade restrita) e entre tempo, espaço e massa (teoria da relatividade geral) que transcendem a província da física e são do interesse de todos.

Existe um único conceito de tempo, ou uma profusão de homônimos pouco aparentados espalhados pelas várias áreas do conhecimento teórico e prático? O tempo que, conquanto idéia clara, não cabia nas palavras de Santo Agostinho, tem algo a ver com o conceito para cujo estudo Einstein lançou as bases em 1916? Até que ponto as propostas da física moderna satisfariam o grande pensador de Tegesta? É difícil dizer. Às vezes o que para um físico é um grande progresso pode, para um filósofo, parecer um detalhe irrelevante. Contudo, há descobertas novas sobre temas que já preocupavam antigos pensadores. Muito do que se fez pode ser pensado como formalização de idéias desses filósofos proféticos, mas não tudo. O alto grau de abstração da

---

física teórica moderna permitiu a escalada de patamares dificilmente concebíveis para mentes desaparelhadas do instrumental matemático adequado.

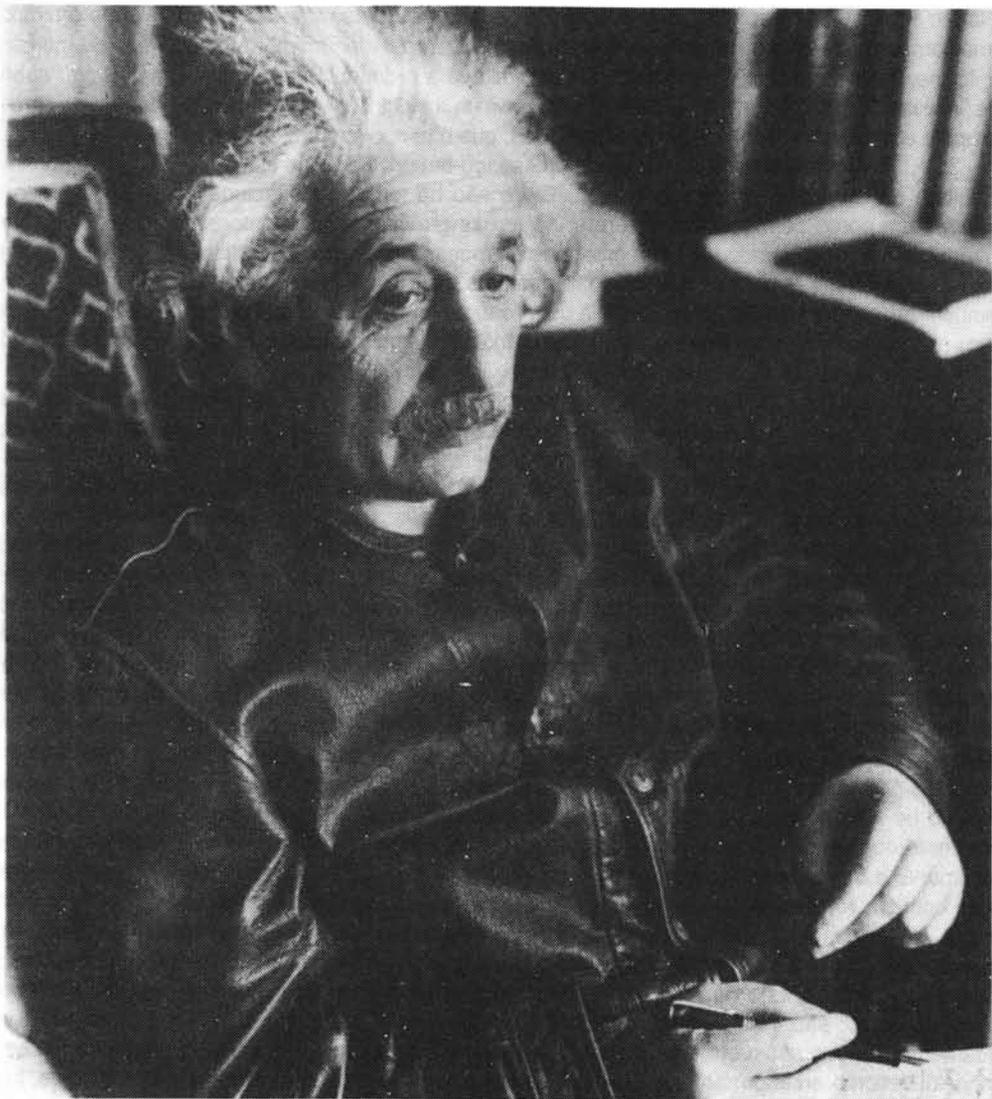
### Três problemas

O tempo flui em um sentido bem definido, cuja manifestação mais dramática é o nosso envelhecimento biológico. Surpreendentemente, a inclusão deste dado da realidade (a "flecha do tempo") no ideário da física teórica constituiu um dos grandes problemas dos últimos cem anos. Se deixarmos de lado as ínfimas forças ligadas ao decaimento beta dos núcleos, as teorias fundamentais da física colocam passado e futuro em situações simétricas: se uma sucessão de fenômenos ocorre, a sucessão inversa, como um filme passado ao contrário, também ocorre. De acordo com as leis da física, um ancião pode, com o passar dos anos, evoluir para uma criança! Ludwig Boltzmann, numa das maiores realizações da história da física, mostrou que a flecha do tempo é um fenômeno estatístico. A probabilidade de o ancião rejuvenescer é essencialmente zero, enquanto que a de um jovem envelhecer é essencialmente 1. Mas, levando o reducionismo físico ao extremo, ambos os processos são permitidos pelas leis. Debates furiosos subsistem até hoje sobre isso, mas, em minha opinião, há só alguns detalhes a acrescentar à obra de Boltzmann. O primeiro problema dos três que vou citar consiste em digerir esse surpreendente resultado, cabendo aos físicos recuperar, dentro do seu formalismo, a naturalidade das concepções intuitivas de passado e futuro. É uma tarefa muito técnica e por isso não será tratada aqui, bastando esta menção: só para sistemas com um grande número de constituintes existe, nítido (mas probabilístico), o sentido do tempo. Para sistemas constituídos por um pequeno número de elementos, perde-se a sua flecha.

O segundo problema diz respeito à individualidade (e objetividade) do conceito de tempo. Em 1908, após ter estudado a teoria da relatividade, o grande matemático Hermann Minkowski iniciou sua célebre conferência dizendo: "As visões do espaço e do tempo que eu desejo expor diante dos senhores brotaram do solo da física experimental, e aí está a sua força. São radicais. De agora em diante o espaço em si mesmo, e o tempo em si mesmo, estão destinados a dissolver-se em meras sombras, e somente em uma espécie de união dos dois subsistirá uma realidade independente". Esta união é o espaço-tempo, e aprendemos com a teoria da relatividade que a sua decomposição em espaço e tempo separados depende do observador, isto é, é subjetiva. Eis o segundo problema. Mais surpreendente ainda é o terceiro, fruto da relatividade geral, lançada por Einstein em 1916. Aqui aprenderemos que é possível agir sobre o espaço-tempo, e, portanto, sobre o tempo. Deixa o espaço-tempo seu papel passivo de palco dos acontecimentos para tornar-se, ele mesmo, um sistema físico, e atinge-se, finalmente, a possibilidade de estudar o sistema físico por excelência: o Universo como um todo. A história do Universo é a história do tempo, como bem a designou S.W. Hawking, grande físico teórico inglês contemporâneo.

### A relatividade restrita

Como foi dito acima, o conceito objetivo, independente do observador, é o de espaço-tempo, e se trata de uma "superfície" quadridimensional. Como não somos capazes de visualizar um objeto assim, temos que nos valer, nos nossos trabalhos acadêmicos, dos métodos da matemática, para a qual essa extensão dimensional é simples e bem conhecida. O leitor poderá usar a imagem de uma superfície usual, bidimensional, considerando que uma dessas duas dimensões é o tempo. O espaço-tempo é o conjunto de todos os pontos e todos os instantes. O movimento de um corpo puntiforme é nele representado por uma curva chamada de linha de universo da partícula. Uma propriedade básica dessa curva é que, conhecido um de seus pontos e a velocidade do móvel naquele ponto, todo o resto da curva está determinado, ou seja, para um ser hipotético que vivesse além do espaço e do tempo e contemplasse o espaço-tempo, a linha de universo de cada partícula estaria completamente desenhada, representando o movimento em sua totalidade (passado, presente e futuro). Em imagens simples, a inclusão do tempo na geometria do movimento transforma o "filme" do movimento numa fotografia estática de idêntico conteúdo. O ingrediente revolucionário que injeta física nessa representação (até aqui) formal é a descoberta de Einstein de que existe uma distância bem definida nesse espaço-tempo. As conseqüências disso têm direito ao adjetivo extraordinárias. Cito aqui só duas, as duas de interesse mais geral. A simultaneidade de dois acontecimentos é relativa, depende de quem está observando os fenômenos. Diante de mim, e em repouso em relação a mim, duas luzes piscam "simultaneamente". Por essa ocasião, passava por mim a grande velocidade outro observador. Ele as verá como não-simultâneas, e, se não estiver familiarizado com a teoria da relatividade, se surpreenderá com a minha insistência na simultaneidade. A diferença só é perceptível quando a velocidade relativa entre os observadores for enorme, próxima da velocidade da luz, o que explica que esse fato seja



Letravia

Albert Einstein fotografado por Lotte Jacobi (1938)

antiintuitivo. Por fim, teremos alguma novidade sobre a independência da ordenação temporal dos acontecimentos em relação a quem os observa. Este é um problema caro a Hume. A causa deve preceder o efeito, e a discriminação do que é causa e do que é efeito deve ser, se serve para alguma coisa, independente do observador. Informa a teoria da relatividade o seguinte: suponhamos que, para um determinado par de acontecimentos, exista um observador para o qual eles são simultâneos. Então haverá um observador que os verá numa certa ordem causal, e outro que os verá na ordem inversa. Conseqüentemente, acontecimentos que são simultâneos para alguém não podem ter qualquer relação causal um com o outro. Ao contrário, consideremos agora dois pares de acontecimentos que, para um observador, acontecem em um mesmo lugar, e um depois do outro. Mostra a teoria da relatividade que a ordenação temporal determinada por este observador privilegiado (seu privilégio está em ver os dois acontecimentos no mesmo ponto espacial) se mantém para qualquer outro observador. Para essa classe de acontecimentos, então, existe uma ordenação que pode ser chamada de causal.

Várias outras manifestações da relatividade da simultaneidade, de caráter mais ou menos circense, existem, como a dilatação do tempo, e o exemplo associado a ela denominado "paradoxo dos gêmeos". Mas são bem conhecidos e amplamente tratados.

### Relatividade geral

A idéia de espaço-tempo só desenvolve sua potencialidade nos trabalhos de Einstein de 1916 e 1917, sobre a Relatividade Geral e a aplicação desta à descrição do Universo como um todo, isto é, à Cosmologia. Já na relatividade restrita o conceito de tempo sofrera modificações profundas, advindas da descoberta de seu caráter subjetivo. A simultaneidade passou a depender do observador; qualquer relógio tem o seu ritmo modificado, para um observador que se move em

---

relação a ele. Com o advento da relatividade geral as surpresas serão ainda maiores: o tempo, amalgamado ao espaço no espaço-tempo, passa a ser um fenômeno. Não flui mais de maneira uniforme, indiferente aos fenômenos, que se limitava a ordenar. Passa a ser possível agir sobre ele. A evolução da matéria do Universo não se limita a exibir a ordem no tempo, mas atua sobre o tempo e estabelece, dentro de certas condições, que o tempo tem um começo e pode ter um fim.

A relatividade geral é a teoria do espaço-tempo. Segundo ela, as forças gravitacionais resultam da curvatura do espaço-tempo. Onde não há forças gravitacionais o espaço-tempo é plano, e um corpo se move em linha reta. As forças gravitacionais são conseqüências do encurvamento do espaço-tempo devido à presença de massas. Os corpos continuam a percorrer, entre dois pontos desse espaço-tempo curvo, o caminho mais curto, mas numa superfície curva o caminho mais curto entre dois pontos não é uma reta, e sim uma curva que depende dos detalhes do espaço-tempo. Por causa dos nossos hábitos tridimensionais, preferimos interpretar essa trajetória como causada por forças, no caso gravitacionais.

A relatividade geral abriu o caminho para a cosmologia quantitativa, pois as equações de Einstein podem ser aplicadas ao Universo como um todo. O tecido do Universo é o espaço-tempo: onde o espaço-tempo acaba, acaba o Universo, e acaba o tempo.

As equações de Einstein não possuem uma solução única para o Universo: apresentam um catálogo de possibilidades, e cabe às observações experimentais determinar qual delas descreve o Universo que efetivamente se realizou. No nosso estágio atual de conhecimento a escolha se resume a três possibilidades, que são os universos de Friedmann aberto, chato e fechado. O preferido de Einstein, e também o mais fácil de descrever para não-especialistas, é o fechado. Todos são universos em expansão, no sentido de que, para a imensa maioria das galáxias, a distância entre duas galáxias cresce continuamente. Um modelo que descreve bem as principais propriedades do Universo de Friedmann fechado é o de uma bexiga de borracha que, inflada, expande-se mantendo a forma esférica. A superfície da bexiga, que está ela mesma crescendo, seria o espaço em expansão. O espaço é finito e se fecha sobre si mesmo (forma esférica), mas é ilimitado, já que nunca se chega ao seu fim, como descobriu, em outras circunstâncias, Fernão de Magalhães. A descrição dinâmica deste universo é a seguinte: no estado inicial está concentrado em um ponto, e expandindo-se vertiginosamente. A taxa de expansão diminui gradualmente e chega um momento em que o Universo cessa de se expandir para, depois, começar a se contrair, refazendo, ao contrário, a primeira parte da evolução, e retornando ao ponto singular inicial. Nesta descrição temos, então, o início do tempo, quando se inicia a expansão, e o seu fim, quando se conclui a contração. Fora deste intervalo não existe Universo, ou espaço, ou tempo. Como disse acima, esta não é a única possibilidade. As duas outras, os universos de Friedmann aberto e chato, são, neste nível de descrição, muito semelhantes e podem ser tratados simultaneamente. Ambos possuem uma singularidade inicial (reduzem-se, no início, a um ponto), como o modelo descrito anteriormente, ou seja, possuem um início do tempo. Mas, à diferença dele, não possuem um fim do tempo. São universos de vida infinita e são infinitos também espacialmente, ou seja, não são circunavegáveis. Na presente situação experimental o candidato mais forte é o modelo de Friedmann aberto, mas não é possível, com segurança, excluir os outros dois.

Resumindo, a aplicação da relatividade geral ao Universo sugere fortemente a existência de um início para o tempo, e abre a possibilidade para que também exista um fim para ele. Uma belíssima crônica da evolução do Universo é apresentada por S.W. Hawking em seu famoso livro, apropriadamente intitulado *Uma breve história do tempo*.

Como era de se esperar, não há nenhuma luz lançada sobre a antinomia de Kant relativa à duração do Universo na *Crítica da razão pura*. O dilema ali apontado, alegadamente inerente ao pensamento humano, não pode ser resolvido "por uma conta". Há sempre uma sensação de perda, quando a física apresenta um tratamento quantitativo de um problema que anteriormente era abordado sob outra forma, com ênfase nos "porquês", e não nos "comos". Mesmo que, inequivocamente, se chegue a saber que o tempo teve um começo, não se poderá eliminar a pergunta "e antes?". Como disse Ezra Pound no *Guide to Kulchur*, "In our time Al Einstein scandalized the professing philosophers by saying, with truth, that his theories of relativity had no philosophic bearing".

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- KANT, I. "*Crítica da razão pura*", tradução de Valério Rohden, São Paulo, 1981.  
HAWKING, S.W. "*Uma breve história do tempo*", Rio de Janeiro, 1988.  
POUND, E. "*Guide to Kulchur*", 3<sup>rd</sup> impressão, London, 1960.