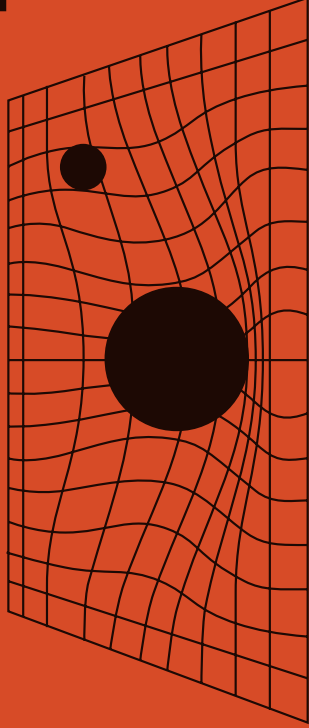


LF-02/001

RELATIVIDADE & CAUSALIDADE TEMPORAL



Rubens Machado



LF-02/001 2017

RELATIVIDADE & CAUSALIDADE TEMPORAL

Rubens Machado

SUMÁRIO

1 2 3 4

5 6 7 8

BIBLIOGRAFIA

Governo do Estado de São Paulo e
Secretaria da Cultura apresentam

“RELATIVIDADE &
CAUSALIDADE TEMPORAL”
Rubens Machado
LF-02/001

Composto em Aperçu e impresso no
Museu da Imagem e do Som, em São
Paulo, sobre papel Chambril Avena
90 g m² e FCard 150-240 g/m², com
tiragem de 500 exemplares.

São Paulo, 2017.

PDF disponível para download
gratuito no site.

livros-fantasma.com

Rubens Machado

SUMÁRIO

1 2 3 4

5 6 7 8

BIBLIOGRAFIA



APOIO



Rubens Machado é astrofísico. Graduou-se em física pela Universidade de São Paulo, onde também fez mestrado, doutorado e pós-doutorado na área de astrofísica extragaláctica. Atualmente é professor na Universidade Tecnológica Federal do Paraná e desenvolve pesquisas sobre galáxias.

Rubens Machado

SUMÁRIO

1 2 3 4

5 6 7 8

BIBLIOGRAFIA

1	NATUREZA DO TEMPO, 11
2	TEORIA DA RELATIVIDADE, 15
3	SIMULTANEIDADE, 27
4	CAUSALIDADE, 31
5	O PRESENTE, 43
6	EXPERIÊNCIA, 47
7	MATEMÁTICA, 49
8	CONCLUSÃO, 55

SUMÁRIO

1 2 3 4

5 6 7 8

BIBLIOGRAFIA

- 1 NATUREZA DO TEMPO, 11
- 2 TEORIA DA RELATIVIDADE, 15
- 3 SIMULTANEIDADE, 27
- 4 CAUSALIDADE, 31

1 2 3 4

5 6 7 8

BIBLIOGRAFIA

Definir o que é o tempo é uma tarefa sabidamente árdua e talvez desnecessária. Santo Agostinho, nas *Confissões* (século V), já enunciou esta dificuldade numa formulação com a qual podemos certamente concordar: todos sabemos o que é o tempo, desde que ninguém nos pergunte qual a definição.

Como nossa linguagem e pensamento estão impregnados de tempo, qualquer frase que tente oferecer uma definição acabará empregando termos que supõem conhecido o conceito que se pretendia definir. Eis um exemplo em vão: “Tempo é uma coisa que flui a uma taxa constante em direção ao futuro”. Pois bem: “fluir” sugere algo que se move ao longo do tempo; “taxa constante” significa algo que não varia em função do tempo; e “futuro” é o tempo do porvir. Além disso, a imagem do tempo como o escoamento da água de um rio, apesar de ser uma metáfora venerável, introduz dificuldades. A água flui com relação às margens do rio. O tempo flui com relação a quê?

Na falta de definições muito sérias, temos frases como aquela atribuída ao físico americano John Archibald Wheeler, que diz que o tempo serve pra evitar que as coisas aconteçam todas de uma só vez. Pode parecer um chiste, mas nunca se sabe. Às vezes na física interpretações profundas emergem de constatações óbvias.

Caso sirvam de guia, nossas noções intuitivas do tempo sugerem algumas características aparentemente irrefutáveis.

Por exemplo, parece claro que o futuro difere do passado. Nós nos lembramos do passado, mas não nos lembramos do futuro. Em *Através do espelho* (Lewis Carroll, 1871), a Rainha Vermelha acha curioso que Alice tenha uma memória que só funciona “para trás” — *“It’s a poor sort of memory that only works backwards”*. Ela conversa com Alice sobre um prisioneiro que está sendo punido por um crime que ainda não cometeu, enquanto aplica um curativo em seu dedo para um machucado que ainda vai acontecer. Veremos mais adiante o que a física pode nos dizer sobre causas e efeitos.

Atualmente entendemos que há, de fato, uma direção preferencial para a passagem do tempo na física. É o que se chama de “seta do tempo” na termodinâmica, que está relacionada com a irreversibilidade de fenômenos e com o aumento da desordem (ou entropia), mas não vamos tratar deste aspecto aqui.

Em termos astronômicos, sabemos também que o passado difere do futuro pela seguinte assimetria: tudo indica que o tempo deve se estender indefinidamente em direção ao futuro, mas não em direção ao passado. O entendimento atual na cosmologia é de que o tempo começou a existir há cerca de 14 bilhões de anos (note mais esta frase transbordando de tempo). Seria concebível imaginar outras cosmologias; por exemplo, um universo infinitamente velho, sem começo. No entanto, as observações astronômicas indicam que nosso universo teve um início.

Em um artigo de 1898 intitulado “La Mesure du Temps”¹, o físico e matemático francês Henri Poincaré apontou alguns dos problemas na nossa compreensão do tempo enquanto

¹ Posteriormente publicado no livro *La Valeur de la Science* (1905), que lida com diversas questões essenciais da filosofia da ciência do começo do século XX.

entidade fundamental na física. Por exemplo, ele nota que nossa sensação intuitiva do tempo parece clara, mas na verdade não dispomos nem sequer de uma intuição direta (confiável) da igualdade entre dois intervalos de tempo. A perspectiva de Poincaré é historicamente instrutiva, pois ele foi — juntamente com outros, como o físico holandês Hendrik Lorentz — um dos precursores do que viria a ser a teoria da relatividade. Às vésperas do advento da relatividade, Poincaré também notou os problemas nos conceitos de simultaneidade, de sucessão temporal de eventos, entre diversas outras questões em aberto da física de seu tempo.

Vamos aqui explorar a natureza do tempo discutindo alguns aspectos de como o tempo se comporta na teoria da relatividade especial de Einstein. Esta teoria dá margem a alguns fenômenos bizarros, revelando uma concepção sobre o tempo diferente daquela com a qual estamos acostumados na vida cotidiana. Os fenômenos contraintuitivos da relatividade dizem respeito a distorções do espaço e do tempo que são surpreendentes mas são também plenamente reais. Vamos discutir em especial as noções de simultaneidade e de causalidade, e veremos que tipos de viagens no tempo são possíveis. Mas antes é preciso introduzir os conceitos fundamentais da relatividade.

—

Em seu ensaio “História da Eternidade” (1936), o escritor argentino Jorge Luis Borges coloca uma das questões relativas ao tempo:

“Outras dificuldades propõe o tempo. Uma, talvez a maior; a de sincronizar o tempo individual de cada pessoa com o tempo geral da matemática [...]”

Veremos a seguir que o problema é ainda pior, pois não existe tal coisa como um “tempo geral”.

2 TEORIA DA RELATIVIDADE

2.1 VELOCIDADE DA LUZ

A teoria da relatividade restrita foi formulada por Albert Einstein em 1905. Ela é chamada de relatividade restrita, ou relatividade especial, porque existe uma outra teoria, a da relatividade geral (de 1915), em que Einstein incorporou também a explicação para a gravidade.

Há uma concepção equivocada bastante difundida, que consiste em resumir a essência da teoria na frase “tudo é relativo”.

Ora, que as coisas sejam relativas parece evidente. A novidade que a relatividade introduz vem justamente da questão oposta: será que existe algo que não é relativo, algo absoluto? A resposta é que existe, sim, algo absoluto: a velocidade da luz. Surpreendentemente, a velocidade da luz no vácuo é constante, é a mesma para todos os observadores e independe do movimento da fonte.

A constância da velocidade da luz é uma propriedade inescapável e para entender seu significado profundo precisamos falar sobre referenciais² e observadores. Na física, referen-

² Como aqui nos limitamos à relatividade restrita, fica subentendido que todos referenciais são referenciais inerciais: têm sempre velocidades cons-

cial é aquilo com relação ao qual se medem velocidades, por exemplo.

Podemos entender um referencial quase como sendo um ponto de vista — não como sinônimo de “opinião”, mas no sentido literal e portanto original da expressão: o lugar a partir da qual se observa algo.

Por exemplo, se você está em um avião e caminha pelo corredor para ir ao banheiro, sua velocidade será de cerca de 1 metro por segundo (equivalente a 3,6 km/h) com relação ao chão do avião. Mas o avião, por sua vez, está se deslocando a 1000 km/h com relação ao solo. Portanto, do ponto de vista de um observador no referencial do avião (um outro passageiro sentado, por exemplo), sua velocidade é de 1 m/s. Mas do ponto de vista de um observador no solo (alguém parado no aeroporto), sua velocidade é a soma das duas velocidades: 1003,6 km/h. Nestes termos, fica fácil ver que as velocidades dos corpos dependem do referencial. Sempre que expressamos qualquer velocidade, é necessário especificar com relação a qual referencial.

De fato, esta relatividade das velocidades não é uma novidade e já era um conceito bem compreendido classicamente. No século XVII, Galileu Galilei ofereceu argumentos contra a imobilidade da Terra no *Diálogo sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo*, discutindo movimentos de corpos em referenciais com velocidades relativas. Na antiguidade, prevalecia a noção intuitiva de que a Terra seria imóvel. A seu favor, havia diversos argumentos de caráter físico ou astronômico e não era tarefa fácil refutá-los no contexto da física aristotélica. Um dos argumentos a favor da imobilidade da Terra era o seguinte: quando soltamos uma pedra do alto de uma torre, ela cai verticalmente ao pé da torre, sem desvio horizontal. Isto é

tantes com relação uns aos outros.

compreensível no caso de uma Terra parada. Mas se a Terra se movesse, o chão e a torre avançariam e a pedra ficaria para trás. Galileu ilustra o problema com a seguinte comparação: se soltamos uma pedra do alto do mastro de um navio, a pedra cai ao pé do mastro, mesmo se o navio estiver se movendo com velocidade constante. Um observador no referencial do porto veria que o navio, o mastro e a pedra têm, todos, a mesma velocidade horizontal. Mas para um observador no referencial no navio, é indiferente que este esteja ancorado ou navegando com velocidade constante: os fenômenos físicos têm os mesmos resultados em ambos os casos. Portanto, este experimento não revela nada conclusivo sobre o movimento do navio. Similarmente, o fato de que pedras soltas do alto de torres em terra firme caíam verticalmente também não permite concluir que a Terra esteja parada. Com Isaac Newton, a mecânica clássica naturalmente incorpora as transformações de velocidade entre referenciais e nenhum problema grave se manifestou nesse aspecto durante alguns séculos.

Na segunda metade do século XIX, outra teoria física extremamente poderosa também se estabeleceu solidamente: o eletromagnetismo. Além de explicar a totalidade dos fenômenos elétricos e magnéticos, as chamadas equações de Maxwell proporcionaram uma revelação estupenda: o entendimento de que a luz se propaga como uma onda eletromagnética. Além disso, as equações do eletromagnetismo forneciam a velocidade da luz, que vale aproximadamente $c = 300.000$ km/s no vácuo.

Já sabemos que toda velocidade na física precisa ser dada com relação a algum referencial. Mas qual o referencial no qual a velocidade da luz vale c ? As equações não diziam. Estranhamente, as equações de Maxwell pareciam sugerir que c deveria ser uma constante fundamental da natureza. Como uma velocidade pode ser uma constante universal, se velocidades dependem do referencial? O grande enigma era: será que existe algum referencial especial no universo? Um referencial que está em repouso absoluto, no qual a luz teria

a velocidade c ? E em outros referenciais, a velocidade da luz seria maior? Por exemplo, acendendo uma lanterna a bordo de um avião, a velocidade seria a soma das duas velocidades? Aliás, acender uma lanterna na superfície da Terra traz a mesma questão, afinal, o planeta Terra está se movendo ao redor do Sol e não temos motivos para suspeitar que nosso planeta ou nossa estrela fossem o referencial privilegiado do universo. Portanto, fazendo experimentos com raios de luz, deveria ser possível detectar a velocidade da Terra com relação ao referencial absoluto do universo.

No século XIX de Maxwell, este suposto referencial absoluto era chamado de referencial do éter, uma misteriosa substância hipotética que serviria de meio material para a propagação da luz. Assim como as ondas do mar se propagam pela água, e as ondas de som se propagam através do ar, imaginava-se que a luz precisaria de algum tipo de suporte material. (Hoje sabemos que a luz se propaga através do vácuo.) O desafio era detectar a velocidade da Terra com relação ao suposto éter.

Um experimento crucial na história da física (conhecido como experimento de Michelson-Morley) mostrou que a velocidade da luz independe do movimento da Terra. A consequência grave deste resultado é que não existe nenhum referencial privilegiado. Não existe um referencial de repouso absoluto no universo. Não existe éter. E mais: a velocidade da luz deveria então ser a mesma, c , em qualquer referencial. Em todos os referenciais.

Para perceber o quanto isto é estranho, voltemos ao exemplo do avião. Quando você caminha pelo corredor, sua velocidade soma-se à do avião, do ponto de vista de um observador externo.

Mas se você acende uma lanterna a bordo do avião, a velocidade da luz não se soma à velocidade do avião! A luz que sai da lanterna tem velocidade c no referencial do avião, e inacreditavelmente também tem velocidade c quando vista por um observador no referencial do chão. Como isso é possível?

Note que a bordo do avião, a luz da lanterna só precisa percorrer alguns poucos metros para chegar à parede da cabine. Mas vista do solo, essa mesma luz deveria ter percorrido uma distância bem maior, por estar sendo carregada pelo avião. Bom, para manter c constante, é necessário deformar o espaço e o tempo, como veremos adiante.

A relatividade lida com transformações de velocidades. E é neste contexto que “tudo é relativo” parece uma obviedade, pois claro que velocidades dependem do referencial. Ao contrário, a inesperada revelação trazida pela teoria da relatividade restrita de Einstein vem a ser a existência de uma velocidade absoluta.

De fato, os dois postulados da teoria podem ser expressos da seguinte forma:

1. *As leis da física são as mesmas em todos os referenciais.*
2. *A velocidade da luz é a mesma em todos os referenciais.*

O primeiro postulado indica que não há no universo nenhum referencial privilegiado: todos os referenciais são igualmente válidos e experimentos mecânicos, eletromagnéticos, etc, terão sempre os mesmos resultados.

Um breve comentário sobre postulados: nas ciências naturais os princípios básicos de uma teoria às vezes são formalmente enunciadas em termos de postulados (ou axiomas). São proposições que não foram logicamente deduzidas; são oferecidas inicialmente sem prova. Supondo que sejam válidas, calculamos quais seriam suas consequências. Estas previsões teóricas podem ser então confrontadas com os resultados dos experimentos.

Se a experiências concordam com as previsões teóricas, então ganhamos confiança na validade dos postulados originais (até que se prove o contrário). Esta breve descrição esquemática soa simples em retrospecto, mas é claro que o desenvolvimento histórico das teorias físicas é bem mais tortuoso.

Na prática, o caminho é sempre repleto de becos sem saída, especulações infrutíferas, experimentos inconclusivos. No caso da teoria da relatividade (tanto a restrita quanto a geral), faz mais de um século que as previsões teóricas de Einstein vêm sendo cotidianamente confirmadas através de experimentos rigorosos e de altíssima precisão. É por isso que temos confiança na validade da teoria.

É curioso notar duas características dos postulados da relatividade restrita: a ênfase no absoluto e a simplicidade. Ironicamente, a teoria da relatividade, apesar do nome, está baseada em absolutos. Ou seja, ao estabelecer com clareza quais são as entidades que não variam nunca, a teoria nos permite calcular detalhadamente as relações entre as coisas que são relativas. Outra característica que salta aos olhos é a aparente simplicidade dos postulados em que se baseia a relatividade restrita. Simplicidade é uma propriedade frequente — mas não necessária — das ideias geniais. São aquelas ideias que, depois de propostas, nos parecem óbvias, embora não tivéssemos pensado nelas antes.

Um exemplo famoso disso é a reação de T. H. Huxley, diante da explicação que Charles Darwin ofereceu sobre a evolução por meio da seleção natural: *“How extremely stupid not to have thought of that!”*. Além disso, na ciência simplicidade é sempre desejável. Economia conceitual é sintoma de uma boa teoria; esperamos que as teorias científicas sejam capazes de explicar uma vasta gama de fenômenos, partindo de poucos princípios básicos.

Pode parecer que a teoria da relatividade é uma teoria sobre a luz. Afinal, falamos o tempo todo sobre a velocidade da luz. Entretanto a natureza física da luz — suas propriedades básicas, propagação, interação com a matéria, etc — é um tópico para outras áreas, como o eletromagnetismo. A relatividade restrita é fundamentalmente uma teoria sobre o espaço e o tempo. Mesmo se, de algum modo, pudéssemos imaginar um universo desprovido de luz, ainda assim uma

teoria do espaço-tempo poderia descrever consistentemente tal universo vazio. O espaço e o tempo estariam amarrados entre si pela noção de uma velocidade que independe do referencial, mesmo se não houvesse nada para efetivamente viajar a essa velocidade.

Apesar da reverência inspirada pela fama da teoria e pelo vulto histórico de Einstein, na verdade basta matemática elementar para demonstrar os principais efeitos da relatividade restrita. (Infelizmente, o mesmo não se pode dizer da teoria da relatividade geral, que exige ferramentas matemáticas avançadas e notoriamente indóceis.) Mas na relatividade restrita, praticamente todos os efeitos podem ser expostos didaticamente usando a matemática no nível do ensino médio. A seguir, vamos enunciar e discutir alguns destes efeitos.

2.2 DISTORÇÕES DO TEMPO E DO ESPAÇO

Os postulados de Einstein, inofensivos à primeira vista, levam a conclusões surpreendentes. Deduzidas as suas consequências, somos obrigados a reconhecer que nosso entendimento clássico sobre o tempo e o espaço estava errado.

Os efeitos relativísticos descritos a seguir são reais e já foram exaustivamente verificados através de experimentos. No entanto, eles só se manifestam notavelmente quando as velocidades dos corpos são altíssimas, próximas à velocidade da luz.

Para as baixas velocidade com que lidamos na vida, os efeitos são minúsculos e muito difíceis de medir. A velocidade da luz ($c = 300.000 \text{ km/s}$) expressa em unidades mais familiares equivale a aproximadamente 1 bilhão de km/h. As velocidades típicas de automóveis ($\approx 100 \text{ km/h}$) ou mesmo de aviões ($\approx 1.000 \text{ km/h}$) são muito baixas e mal chegam a alcançar um milionésimo da velocidade da luz. É justamente por isso que

a descrição da física clássica aparentava ser suficientemente correta para lidar com os fenômenos cotidianos. De fato, para velocidades muito baixas, todas as previsões da relatividade voltam a se reduzir às da física clássica. Por outro lado, é possível fazer experimentos com partículas subatômicas que são muito leves e podem ter velocidades de, digamos, metade da velocidade da luz. Neste caso, os efeitos relativísticos são muito relevantes.

Para explorar as consequências contraintuitivas da relatividade, é comum lançar mão de experimentos conceituais, isto é, construções imaginárias que não se pode criar em laboratório.

É o que se chama de *Gedankenexperiment*, palavra alemã que significa “experimento mental”. Geralmente estas experiências “pensadas” consistem em imaginar alguma configuração de observadores e referenciais e então deduzir as consequências lógicas aplicando os postulados da teoria da relatividade. Mas atenção: o caráter imaginário dos experimentos mentais não significa que a teoria da relatividade careça de comprovação experimental real. Muito pelo contrário, a teoria da relatividade é abundantemente verificada em laboratório. Os experimentos mentais são um recurso didático que serve para explorar teoricamente os efeitos — geralmente inusitados — da teoria.

Um típico experimento mental consiste em imaginar um trem que se move a uma velocidade próxima à da luz. Na época de Einstein, trens eram as máquinas mais velozes que existiam e ainda são o principal meio de transporte usado em experimentos mentais relativísticos. Este trem imaginário é útil para ilustrar o primeiro resultado espantoso da relatividade, que se chama dilatação do tempo. Se considerarmos dois observadores — um a bordo do trem e outro parado na estação — a relatividade nos mostra que seus relógios medem tempos diferentes.

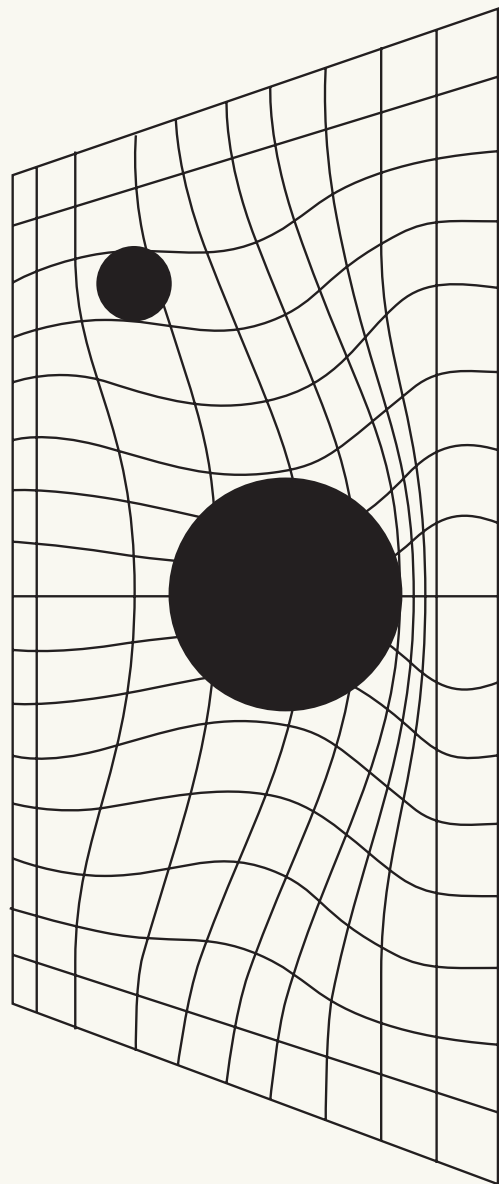
Mas veja: não é que seus relógios simplesmente marcam

horários diferentes, como no caso trivial de fusos horários. É o próprio fluxo do tempo que não é o mesmo! O tempo flui em ritmos diferentes. Do ponto de vista do observador na estação, o relógio a bordo do trem mede um tempo dilatado, isto é, um tempo que flui mais devagar. Mas quem está dentro do trem não nota nada anormal (afinal, nenhum dos dois referenciais é “especial” pois nenhum está mais “parado” que o outro; ambos são igualmente legítimos). Para quem está a bordo do trem, é o relógio da estação que está se movendo e portanto medindo um tempo dilatado. É difícil enfatizar o quanto este resultado é estrondoso: ele provoca o desmoronamento de um pilar da física clássica: **a noção de que existiria um tempo absoluto no universo.**

Vale a pena aqui insistir na realidade dos efeitos relativísticos. Por serem tão contrários às nossas intuições, podem parecer inacreditáveis à primeira vista. Mas ocorre que a dilatação do tempo é real. Não se trata de relógios com defeito. Não é uma ilusão de ótica. Não é uma impressão subjetiva do observador ou de sua consciência. Não é um erro de medida. Não é um mero efeito aparente. É a natureza intrínseca de como o tempo funciona no nosso universo.

O segundo resultado espantoso diz respeito ao espaço. Assim como o tempo se distorce, descobrimos que o próprio espaço também é maleável. Usando o mesmo trem imaginário, é possível mostrar que o observador no referencial da estação verá o comprimento do trem contraído. Isto é, do ponto de vista do observador da estação, o trem é menor, por estar em movimento.

Este efeito chama-se **contração do espaço**. Aqui também é importante enfatizar que não são os corpos — os objetos sólidos do mundo — que estão a sofrer deformações elásticas. Pelo contrário, **é o próprio tecido do espaço que se deforma**. Novamente, não são réguas com defeito, nem erros de medida, nem ilusões, nem efeitos aparentes ou subjetivos. É a natureza intrínseca de como o espaço funciona no nosso universo.



Antes da relatividade, o tempo da física era absoluto. E o espaço era um pano de fundo imutável. Era como se existisse um palco — rígido — onde se desenrolavam os eventos, e um relógio universal marcando um único tempo que fluía eternamente no mesmo ritmo constante. Esta noção de tempo absoluto era mais do que uma mera suposição tácita e Newton tomou o cuidado de enunciá-la explicitamente no *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687):

“O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por sua própria natureza, flui igualmente sem depender de nenhuma coisa externa [...]”

A relatividade traz então estas mudanças drásticas: o tempo não é absoluto e o espaço não é rígido. **O ritmo do tempo e os comprimentos espaciais se deformam dependendo do movimento relativo dos observadores. O tempo e o espaço são ambos maleáveis e na verdade estão atrelados entre si.** Antes de Einstein, espaço e tempo eram duas entidades separadas. **Com a relatividade, entendemos que são diferentes facetas de uma entidade mais fundamental: o chamado espaço-tempo, que tem quatro dimensões, pois reúne três coordenadas espaciais e uma coordenada temporal.** Hermann Minkowski, que fez importantes contribuições matemáticas à teoria, expôs eloquentemente este novo amálgama entre espaço e tempo em uma conferência em 1908:

“A visão do espaço e do tempo que pretendo lhes apresentar nasce do solo da física experimental e daí provém sua força. É uma visão radical. De agora em diante, o espaço por si só, e o tempo por si só estão fadados a sumir nas sombras e apenas um tipo de união entre os dois preservará uma realidade independente.”

Agora chegamos às consequências estranhas sobre simultaneidade. O próprio Einstein ilustrou a importância da noção familiar de simultaneidade, apontando que todos os nossos julgamentos sobre tempo são julgamentos sobre simultaneidade de eventos. Eis o exemplo citado logo no início de seu artigo histórico de 1905, publicado nos *Annalen der Physik*: dizer que um trem chega às 7 horas equivale a dizer que são simultâneos o evento “chegada do trem” e o evento “ponteiros do relógio marcando 7 horas”. Quando se trata de eventos ocorrendo na mesma posição (ou muito próximos) não há ambiguidade no conceito de simultaneidade.

Voltemos à estação de trem dos experimentos mentais. Considere uma pessoa parada na plataforma observando a passagem de um trem relativístico. O trem carrega um explosivo na sua extremidade dianteira e outro explosivo na sua extremidade traseira, que são detonados quando o ponto médio do trem cruza a posição do observador na estação. A luz proveniente de cada explosão alcança ao mesmo tempo seus olhos.

Então ele pode concluir — corretamente — que os dois eventos foram simultâneos. Por outro lado, um observador a bordo do trem, no vagão do meio, receberá primeiro a luz proveniente da explosão dianteira e só depois a luz proveniente da explosão traseira. Portanto ele concluirá — corretamente

— que as duas explosões não foram simultâneas; ou seja, que a explosão dianteira aconteceu antes da explosão traseira.

Temos então este resultado assombroso: para um dado observador, dois eventos A e B são simultâneos; para um outro observador, podem não ser simultâneos. Note a aparente insensatez da situação: um observador afirma “Primeiro aconteceu uma explosão e depois a segunda”, enquanto o outro diz “Não, as duas explosões aconteceram ao mesmo tempo”. Novamente, cabe ressaltar que este efeito é plenamente real e nenhum dos observadores está equivocado. Talvez você esteja pensando que estes observadores desatentos estão confusos. Que deve haver um modo de decidir, de uma vez por todas, quando as explosões ocorreram. Que, vendo a cena do alto, algum árbitro imparcial saberá julgar qual a resposta correta afinal. Mas não.

Não existe um observador mais correto que outros, pois todos os referenciais são igualmente válidos³. As conclusões a que cada observador chega em seu respectivo referencial são ambas perfeitamente verídicas e consistentes com a realidade. Esta é a chamada relatividade da simultaneidade: ao conceito de simultaneidade não se pode mais atribuir significado absoluto.

Outra consequência é que o conceito de presente absoluto também não tem sentido. **Não existe um “agora” — um momento presente — que se aplique simultaneamente a todo o universo.**

Note que observadores podem discordar legitimamente

³ Atenção ao escopo da teoria da relatividade: dizer que todos os observadores estão corretos e que todos os referenciais são igualmente válidos não são afirmações aplicáveis a outros empreendimentos humanos em geral. Não significa que, em outras esferas da vida, todas as opiniões são igualmente verdadeiras. Aqui estamos lidando com afirmações quantitativas muito específicas sobre como calcular as coordenadas de posição e de tempo (bem como as regras de composição de velocidades).

sobre quando eventos ocorreram, mas nunca discordarão que os eventos ocorreram. É por isso, aliás, que os experimentos mentais costumam envolver explosivos ou raios, para que deixem um rastro de destruição inequívoco.

Vimos que dois eventos podem ser simultâneos em nosso referencial e não-simultâneos em outros. Equivalentemente, eventos não-simultâneos no nosso referencial poderão ser legitimamente simultâneos em outro referencial. Agora veremos que a relatividade da simultaneidade abre a porta para outro efeito contraintuitivo.

No experimento anterior, vimos que as duas explosões A e B eram simultâneas na estação, mas no referencial do trem, primeiro acontece A e depois acontece B. Ora, como o experimento é mental, não custa imaginar um trem adicional, que se move em sentido oposto num trilho paralelo. Como a configuração é simétrica, para este novo observador, primeiro ocorre a explosão B e só depois a explosão A.

Chegamos em uma situação ainda mais desconcertante (e talvez perigosa): **a sequência temporal de eventos é relativa!** Eventos que ocorrem na ordem AB em um referencial podem ocorrer na ordem BA em outro referencial. Mais uma vez, convém reforçar a linguagem: eventos realmente acontecem em ordem inversa em diferentes referenciais. Não existe uma ordem “correta”, que seria meramente vista sob diferentes perspectivas. As ordenações temporais são reais em cada referencial.

4.1 O PASSADO É INVOLÁVEL

Se até mesmo a sucessão temporal está em jogo, pode-se colocar uma circunstância temerária. Por exemplo, se você joga uma pedra e quebra uma vidraça, estes dois eventos ocorrem na seguinte ordem em seu referencial: primeiro o arremesso da pedra (A), e só depois a quebra do vidro (B). Pois bem, a questão arriscada é: pode existir um referencial em movimento relativo no qual a ordem destes dois eventos se inverte? Existe um referencial no qual primeiro a janela se quebra e só depois a pedra é arremessada? Não. A resposta é categoricamente negativa neste caso pelo seguinte motivo: aqui existe uma relação de causa e efeito entre os dois eventos (A é a causa de B). Observadores em outros referenciais poderão medir um intervalo de tempo diferente entre A e B, mas a ordem não pode ser invertida quando existe relação de causalidade entre os eventos. (Nos experimentos dos trens, estávamos supondo implicitamente que as explosões eram independentes entre si, isto é, uma não era provocada pela outra.) **A causalidade — ou seja, a noção de que as causas antecedem os efeitos — nunca pode ser violada.** A alternativa é inconcebível.

Não saberíamos sequer imaginar como seria um universo surrealista onde as causas acontecem depois dos efeitos. É de se esperar portanto que as teorias físicas excluam explicitamente esta possibilidade absurda. A ideia de causalidade talvez deva ser entendida como uma necessidade lógica, algo autoevidente.

Por outro lado, alguns físicos fazem a ressalva de que este conceito não é tão bem definido nem totalmente livre de ambiguidade, pois nem sempre é claro como associar uma única causa a um dado efeito na natureza. Os fenômenos do mundo são resultado de inúmeras interações mútuas.

Mesmo assim, é reconfortante saber que certas ocorrências inconsistentes são terminantemente proibidas pela relatividade.

Matematicamente, é possível calcular uma grandeza que é um tipo de “distância” quadridimensional entre dois eventos,

mesclando as coordenadas espaciais e temporais. Assim, pode-se determinar se a inversão de ordem é permitida ou proibida.

Caso a ordenação temporal seja imutável em uma dada situação, então pode existir relação de causalidade entre os dois eventos. Mas se a ordem puder ser invertida, é porque um evento não é causa do outro.

Em última análise, é o fator c que regula o que é possível ou impossível na relatividade. De fato, a velocidade da luz desempenha este outro papel fundamental: o de velocidade máxima.

A velocidade da luz é um limite universal de velocidade, que não pode ser ultrapassado (e nem sequer atingido) por corpos materiais⁴. Mais do que isso, nenhum tipo de sinal ou informação (nenhuma influência causal) pode se propagar com velocidade superior a c . É curioso notar que no formalismo da relatividade, a proteção à causalidade decorre do fato de c ser a velocidade limite do universo.

Se a causalidade não estivesse protegida pela velocidade da luz, o que poderia acontecer? Poderíamos enviar mensagens para o passado. Imagine que você envie uma mensagem de texto pelo celular. O evento A (o envio) sempre antecede o evento B (o recebimento), mesmo que por um breve instante.

Evidentemente existe uma relação de causa e efeito que, se invertida, resultaria na seguinte situação absurda: seu amigo recebe hoje uma mensagem que você enviará amanhã. O presente estaria sendo afetado por eventos futuros. Ou em

⁴ Os corpos que têm massa estão sujeitos ao limite de velocidade. De fato, quanto mais massa um corpo tem, mais difícil é aumentar sua velocidade. Por outro lado, o fóton — que é entendido como sendo a partícula de luz — não tem massa. Uma partícula de massa nula não tem opção a não ser viajar na velocidade da luz. Fótons podem ter diferentes energias (ultravioleta, visível, infravermelho, etc). Mas se todos os fótons têm a mesma massa (zero) e a mesma velocidade (c), como podem ter energias diferentes? A resposta a essa pergunta é um assunto para outra teoria, a física quântica.

outros termos: informação estaria sendo enviada em direção ao passado. Isso **nunca** acontece no universo.

A relatividade então nos garante que o passado é intocável. Se um dado evento aconteceu no passado, então nenhuma ação presente ou futura poderá modificá-lo. Étienne Klein, físico e filósofo contemporâneo, formula uma frase contundente:

“Se algo aconteceu, então será eternamente verdade que aquilo aconteceu.”

A inviolabilidade do passado é curiosamente tratada por Jorge Luis Borges no seu ensaio “Uma nova refutação do tempo”⁵, cujo título irônico (“novo” pressupõe sucessão temporal, cuja existência o texto pretende refutar) prefigura o tom do texto, que soa grave mas é ao mesmo tempo divertido, pois o autor admite logo de início não acreditar na tese que vai demonstrar.

No prefácio, Borges aponta a ironia do título e acrescenta:

“Ademais, tão saturada e animada de tempo é nossa linguagem, que é muito possível que não haja nestas folhas uma sentença que de algum modo não o exija ou o evoque.”

Borges começa com citações dos apologistas do idealismo,

“[...] para que meu leitor vá penetrando neste instável mundo mental. Um mundo de impressões evanescentes; um mundo sem matéria nem espírito, nem objetivo nem subjetivo; um mundo sem a arquitetura ideal do espaço; um mundo feito de tempo, do

⁵ Texto publicado originalmente na revista *Sur* (número 115). Consiste de dois ensaios escritos entre 1944 e 1946. Em edições recentes, costuma fazer parte do livro *Outras Inquisições*.

absoluto tempo uniforme do Principia; um labirinto incansável, um caos, um sonho.”

Abrindo mão do *Principia* e substituindo-o pelo tempo relativo de Einstein, esta perplexidade que Borges descreve também serve para caracterizar o assombro de quem se aproxima da teoria da relatividade. A seu modo, Borges toca também na dificuldade de aceitar a simultaneidade. Cita um exemplo concreto: em agosto de 1824 um capitão argentino venceu uma batalha; em agosto de 1824 um escritor inglês publicou um livro:

“[...] tais feitos não foram contemporâneos (agora o são), já que os dois homens morreram, aquele em Montevidéu, este em Edimburgo, sem saber nada um do outro... Cada instante é autônomo.”

O objetivo de Borges é sugerir que as cronologias não passam de ficções; apenas o instante seria real. Especificamente sobre o passado, diz ele:

“Nem a vingança, nem o perdão, nem o cárcere, nem mesmo o esquecimento podem modificar o invulnerável passado.”

Em seguida, Borges afirma que lhe parecem igualmente vão a esperança e o medo, que se aplicam ao futuro. Na relatividade, o passado é sem dúvida imune a modificações. Com relação ao futuro, a relatividade em princípio não nos interdita a esperança nem o medo. Se a física como um todo nos dá margem ao livre-arbítrio é todo um outro problema. A conclusão do ensaio sobre a refutação do tempo é um trecho célebre com a percepção de Borges sobre a natureza do tempo:

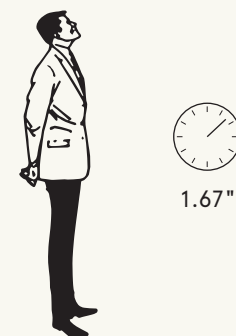
“And yet, and yet... Negar a sucessão temporal, negar o eu, negar o universo astronômico são desesperos aparentes e consolos secretos. Nosso destino [...] não é assustador por ser irreal; é

assustador porque é irreversível e blindado. O tempo é a substância de que sou feito. O tempo é um rio que me arrebatou, mas eu sou o rio; é um tigre que me devora, mas eu sou o tigre; é um fogo que me consome, mas eu sou o fogo. O mundo, infelizmente, é real; eu, infelizmente, sou Borges."

4.2 VIAGENS NO TEMPO

Vimos que é proibido influenciar o passado. É um tipo de viagem no tempo que a relatividade não autoriza. Por outro lado, a relatividade permite viagens em direção ao futuro. Estas não são perigosas, pois não colocam em risco a inviolabilidade do passado. É claro que a viagem ao futuro mais trivial é esta da qual estamos participando e chamamos de vida. Basta não fazer nada, que o tempo de nosso referencial segue fluindo no mesmo ritmo em direção ao futuro. É possível, no entanto, ir para o futuro mais rapidamente. Basta embarcar em um trem relativístico ou em uma nave espacial que viaje a velocidades próximas à da luz. Já vimos que observadores externos à nave verão o tempo do astronauta fluir mais lentamente. Isso significa que enquanto ele vive 1 ano dentro da nave, passam-se 10 na Terra, por exemplo. Quando ele desembarcar, as pessoas que ficaram na Terra estarão de fato 9 anos mais velhas que o astronauta. Este cenário só é ficção científica porque não conseguimos construir naves que possam ser aceleradas a velocidades altíssimas (no exemplo citado, a velocidade necessária seria maior que 90% da velocidade da luz). Exceto por este impedimento tecnológico, viajar no tempo em direção ao futuro é perfeitamente permitido pelas leis da física.

De fato, tais viagens no tempo podem ser medidas na prática (e já o foram) usando aviões. Como vimos, as velocidades de aviões mal chegam a um milionésimo da velocidade da luz. Ocorre que temos relógios atômicos que são capazes



de marcar o tempo com a precisão necessária para detectar diferenças de bilionésimos de segundo. Um experimento⁶ foi feito na década de 1970 e consistia essencialmente do seguinte arranjo:

Usando dois relógios atômicos idênticos, um permaneceu no solo e outro foi colocado a bordo de um avião que viajou a meros 500 km/h durante um total de 75 horas. Quando os relógios foram novamente colocados lado a lado, constatou-se que apresentavam uma discrepância mensurável de alguns nanossegundos no horário marcado, consistente com a previsão da teoria da relatividade. Desde então, este tipo de experimento foi repetido com precisões ainda mais excelentes, configurando uma sensacional confirmação experimental de que o tempo pode realmente fluir em ritmos diferentes. São pequeninas viagens no tempo, mas são sem dúvida reais.

Tanto nos experimentos imaginários quanto nos verdadeiros, o tempo que flui dilatadamente não parece anômalo para quem está em repouso naquele referencial. A bordo dos trens, naves ou aviões, todos os relógios, bem como os batimentos cardíacos, todos os fenômenos físicos, todas as reações químicas (e portanto a sensação de consciência) fluem no seu ritmo costumeiro.

Só quando comparados com outros referenciais é que se notam as distorções relativas.

Em um conto intitulado “O Outro”, o primeiro em *O livro de areia*, temos uma aparente situação de viagem no tempo que violaria a causalidade. Nesse conto, o velho Borges, lecionando em Cambridge, ao norte de Boston, encontra o jovem Borges, estudante em Genebra. Sentados em um banco diante de um rio (a imagem do rio sempre evoca o fluxo do tempo),

6 Hafele & Keating, 1972, *Science*, 177, 168.

tentam decifrar se o encontro seria real ou se estariam sonhando. O fato de que cada um sabe detalhes da vida do outro é inconclusivo, pois o autor do sonho também os saberia. A principal dificuldade é que se o encontro fosse real, o velho Borges deveria se lembrar do peculiar dia de sua juventude em que teve um encontro com uma versão mais velha de si mesmo.

5 O PRESENTE, 43

6 EXPERIÊNCIA, 47

7 MATEMÁTICA, 49

8 CONCLUSÃO, 55

5 O PRESENTE

Eis uma formulação curiosa (expressa por Werner Heisenberg em outro contexto) sobre a distinção entre passado e futuro: o passado é aquilo sobre o qual podemos obter informações; já o futuro é aquilo que ainda podemos influenciar. Os corolários são, respectivamente: **não há como obter informação vinda do futuro e não há nada que se possa fazer para afetar o passado.**

Heisenberg também comenta em seu *Física e Filosofia* (1958) que, na teoria clássica newtoniana, o passado estava separado do futuro pelo presente, que era um instante — um intervalo de duração infinitamente curta. Já na relatividade, o presente local é mais largo, pois dura o intervalo necessário para que a velocidade da luz transporte influências causais entre o observador e as distâncias em questão. Seria um presente menos efêmero.

Com a ideal propagação instantânea de efeitos, o futuro chegava imediatamente. A finitude da velocidade da luz nos faz esperar um pouco.

Já vimos que não faz sentido falar em um “agora” que seja compartilhado por todos os observadores. Mas mesmo em um único referencial, sem considerar outros em movimento relativo, o presente é um pouco mal definido. O que chamamos de presente na verdade é uma mistura de informações proveniente de diferentes distâncias e portanto de diferentes épocas. A finitude da velocidade da luz provoca atrasos incontornáveis em todas as observações astronômicas. (A rigor, literalmente toda observação do mundo é atrasada, mas as

distâncias astronômicas acentuam o efeito.) Por exemplo, a luz que parte do Sol leva 8 minutos para alcançar a Terra. Então estamos vendo o Sol como ele era 8 minutos atrás. Na exploração do sistema solar, este atraso tem que ser rotineiramente levado em conta nas comunicações da Terra com as sondas que viajam aos planetas.

Por exemplo, no caso de Marte, o envio de um sinal de rádio pode levar desde 4 minutos até cerca de meia hora, dependendo da configuração orbital dos planetas num dado momento.

Um exemplo comumente citado consiste em imaginar que o Sol se apagasse. O que aconteceria? Só ficaríamos sabendo depois de 8 minutos. Mas imagine que o Sol se apagasse enquanto você observa o céu noturno numa noite estrelada de lua cheia.

O que aconteceria? Primeiro, nada mudaria durante 8 minutos. Aí a Lua ficaria escura. Em seguida, os planetas iriam se apagando, primeiro os mais próximos, depois os mais afastados. Em cerca de 2 horas, Saturno ficaria escuro. As estrelas, claro, emitem sua própria luz. E estão a distâncias imensas, de tal modo que sua luz leva alguns anos para chegar à Terra, no caso das mais próximas. Algumas das estrelas mais distantes que podemos enxergar a olho nu estão a cerca de 10.000 anos-luz de distância. Já as outras galáxias estão a distâncias ainda mais inimagináveis. Mesmo nossa vizinha Andrômeda está a mais de 2 milhões de anos-luz. E observamos galáxias cuja luz viajou bilhões de anos até atingir nossos telescópios. É por isso que diz-se que observar o céu é olhar para o passado. Estamos literalmente vendo estrelas como elas eram há milênios. Algumas delas talvez já nem existam mais. E quanto mais distantes os astros, mais antigos ele nos parecem. No caso de uma galáxia muito longínqua, a luz que chega hoje aos telescópios começou sua viagem há muito tempo. É completamente impossível pretender observar as estrelas e galáxias tais como elas são hoje. Qual seria a aparência de Andrômeda agora? Só saberemos daqui 2 milhões de anos, quando a luz emitida lá hoje finalmente chegar aqui. Por isso não faz sentido insistir na noção de tempo presente para objetos astronômicos.

O único “agora” relevante para o observador é o instante de recebimento da luz.

A luz que chega a seus olhos proveniente de objetos mais próximos é sempre mais recente. A luz proveniente de objetos afastados está trazendo uma imagem um pouco mais velha.

Ao chegar aos olhos, a imagem do seu pé é 1 ou 2 nanossegundos mais antiga que a imagem da sua mão. Seu cérebro recebe estas informações provenientes de diferentes épocas, e leva pelo menos dezenas de milissegundos adicionais para processar as reações químicas necessárias. A sensação resultante é um imagem mental que você acredita ser uma representação do instante atual, do presente.

Já não conseguimos mais falar sobre tempo sem levar em conta as distâncias envolvidas. E o tempo está atado ao espaço **pela finitude da velocidade da luz**.

6 EXPERIÊNCIA

Afinal, este mundo estranho que estamos a descrever é real mesmo? Sim. É o nosso universo. É assim que ele funciona. Até onde conseguimos determinar experimentalmente, a teoria da relatividade vem sendo comprovada em cada um de seus mínimos detalhes.

A propósito, em 2016 foram detectadas pela primeira vez as chamadas ondas gravitacionais, uma descoberta histórica, que veio a comprovar uma das previsões da teoria da relatividade de Einstein (mas neste caso, da relatividade geral, não da restrita).

Ondas gravitacionais são um distúrbio que se propaga pelo tecido do espaço-tempo, e são geradas por eventos extremamente violentos, como uma colisão entre buracos negros.

Como tudo na física, as previsões teórica que testamos em laboratório não são apenas vagas ideias gerais. São previsões quantitativas muito específicas. Por exemplo, numa dada configuração, a teoria prevê que certas partículas elementares venham a ter uma velocidade específica, um valor numérico exato.

Ao fazer o experimento na prática, medimos as velocidades das partículas sem saber o resultado de antemão. Note que só existe um único resultado que concorda com a teoria, e infinitos resultados possíveis que a contrariariam. Caso as experiências dessem qualquer outro resultado, a teoria estaria em perigo. Com tanta oportunidade para falhar, é na verdade impressionante que as teorias físicas tenham o sucesso estrondoso que têm ao prever quantitativamente os fenômenos do mundo real.

Duas ressalvas sobre a relação entre previsão teórica e confirmação experimental. Primeiro, as teorias prevêm números exatos, mas as experiências medem valores aproximados dentro de intervalos de confiança, que dependem de imperfeições dos instrumentos de medida, entre outros fatores. Daí a importância de métodos estatísticos para tratar as incertezas na ciência.

Segundo, para que uma teoria bem estabelecida seja descartada (ou mesmo posta seriamente em dúvida), é claro que seria necessário acumular inúmeros indícios muito convincentes de que há algo errado. Na prática, falsos alarmes são geralmente esclarecidos em termos de erros de interpretação, erros de medida, etc. É bastante raro na história que uma teoria ampla e sólida (do porte da mecânica clássica newtoniana) venha a ser posta em dúvida como um todo. Mas acontece.

Um exemplo intrigante de alarme falso foi justamente a suposta detecção de uma anomalia envolvendo neutrinos mais velozes que a luz em 2011. Depois do susto inicial e de alguma confusão, descobriu-se que a origem do erro era um detalhe mundano: um cabo mal conectado no aparato experimental.

Mau contato... Na aventura da ciência, este tipo de ocorrência é muito comum, mas em retrospecto os tropeços são esquecidos e os livros-texto só narram relatos das realizações gloriosas.

Atualmente, diante da abundância de verificações experimentais positivas da teoria da relatividade (tanto restrita quanto geral) acumuladas ao longo de um século, temos grande confiança na sua validade. Não se trata de uma crença cega, nem de uma certeza permanente. Ocorre que até hoje ninguém conseguiu encontrar motivos convincentes para abandoná-la. Na ciência é sempre concebível que uma teoria atualmente aceita venha a ser revista ou rejeitada. Pode ser que um dia seja detectado algum fenômeno atualmente desconhecido, inconsistente com a teoria. Pode ser que alguém um dia tenha uma ideia inédita e mostre que a teoria atual, embora aproximadamente correta, era um aspecto particular de uma outra teoria mais ampla. Uma nova teoria precisaria dar conta de todos os fenômenos atualmente compreendidos, ou seja, teria que replicar a previsão teórica de todos os experimentos de altíssima precisão, e ainda explicar eventuais novos fenômenos.

Na seção anterior vimos que diante dos severos crivos experimentais, as teorias físicas têm muita oportunidade para falhar. E que portanto é impressionante o seu sucesso em explicar o mundo quantitativamente. Não menos misterioso é o fato de que todas as teorias físicas se constroem com a linguagem da matemática. É o que o físico Eugene Wigner chamou de “a implausível eficácia da matemática nas ciências naturais”. Abstrações matemáticas se adequam tão bem à descrição dos fenômenos da natureza que isso chega a deixar os físicos perplexos. O próprio Einstein mencionou esse estranhamento diante da Academia de Ciências da Prússia em 1921:

“Como é possível que a matemática, sendo afinal um produto do pensamento humano que independe da experiência, se encaixe tão bem aos objetos da realidade física?”

Este problema remete ao interessante e difícil debate sobre a natureza da matemática: seria a matemática descoberta ou inventada?

Um entendimento é o de que a matemática existe independentemente de nós. Afinal, o teorema de Pitágoras continuaria sendo verdade, mesmo se não existissem matemáticos? Qual seria o valor de π se não existisse vida na Terra? Os defensores desta visão costumam ser acusados de platonismo.

O outro entendimento é de que a matemática seria um produto da mente humana. Nesta visão, seu sucesso não deveria surpreender

tanto, pois a matemática seria feita sob medida para nossos propósitos. Considere os exemplos: números irracionais, números negativos, a noção de zero, números imaginários, etc. Todos estes conceitos, que hoje nos soam triviais, causaram incômodo quando foram introduzidos. Eles já existiam antes que os invocássemos? Talvez tenhamos a liberdade de criar entidades matemáticas que sejam convenientes para nossos fins. Alguns dirão que a matemática é uma linguagem e como tal não pode ter existência independente, assim como todos os idiomas, que são invenções.

A perplexidade diante da adequação da matemática é tanta, que Einstein chega a se perguntar se, de certo modo, os antigos estariam certos em seu sonho de que seria possível capturar a realidade através do pensamento. Wigner conclui resignadamente que a eficácia da matemática é uma espécie de dádiva que não entendemos nem fizemos por merecer.

Aqui precisamos notar as diferenças essenciais entre a matemática e as ciências naturais. Nas ciências, para que uma ideia venha a ser aceita, precisamos de verificação experimental. Temos que medir as propriedades físicas de objetos do mundo real. Por exemplo, para testar uma teoria sobre os anéis de Saturno, temos que construir telescópios e efetivamente observar as características do planeta. Se vivêssemos em uma caverna, seria impossível deduzir mentalmente a existência de Saturno e seus anéis, através de pensamento puro. Similarmente, não conseguiríamos deduzir que existem tigres ou que existe o continente antártico se não tivéssemos acesso ao mundo. A matemática, por outro lado, lida com relações lógicas entre conceitos abstratos e talvez prescindir de observações da natureza. Por exemplo, é concebível que para intuir os axiomas da geometria, alguma experiência com o mundo tenha sido inicialmente necessária.

Mas para prosseguir com as deduções de Euclides, em princípio bastaria o raciocínio. É desnecessário montar laboratórios para medir triângulos e assim testar a veracidade das conclusões.

Outra diferença importante: os teoremas da matemática são eternos, enquanto as teorias físicas são sempre provisórias.

Desde Galileu, estamos acostumados com a noção de que a

matemática é a linguagem da natureza. Não se sabe o porquê.

Esta notável adequação da matemática está presente em todos os campos da física, desde situações elementares da geometria até áreas recentes de investigação. Por exemplo, os senos e cossenos da trigonometria, que servem para calcular proporções em triângulos, também se encaixam na descrição de todo tipo de oscilações harmônicas. Os números imaginários (raízes quadradas de números negativos), que a primeira vista poderiam ter parecido uma brincadeira, encontram uma vasta aplicabilidade no tratamento de fenômenos físicos. Na mecânica quântica, a formalismo de Heisenberg em termos de matrizes se mostrou surpreendentemente frutífero. A lista de exemplos é interminável.

A curiosa dinâmica entre a matemática e a física pode se dar em ambas as direções. Às vezes os físicos se deparam com fenômenos que exigem ferramentas matemáticas que ainda não existiam e portanto precisam ser criadas. O oposto também ocorre: não é raro que abstrações matemáticas aparentemente desprovidas de aplicação se revelem úteis aos físicos anos mais tarde — às vezes séculos mais tarde.

Um exemplo clássico do primeiro caso é a formulação por Newton do cálculo diferencial e integral — a ideia de dividir funções em intervalos de tamanho infinitesimal⁷. Originalmente, Newton precisou do cálculo para seu propósito imediato de explicar as leis do movimento e da gravitação. Por outro lado, é ilustrativo que o cálculo tenha sido independentemente inventado/descoberto por Godfried Wilhelm Leibniz, quase ao mesmo tempo. Este tipo de ocorrência talvez indique uma inevitabilidade.

É difícil imaginar como Newton e Leibniz poderiam ter chegado a conclusões diferentes. Cada um inventou sua própria notação e nomenclatura, mas a essência do conteúdo coincide. Afinal, quando

⁷ A propósito, uma das coisas que o cálculo esclarece é como operar rigorosamente a soma de uma série infinita de termos infinitamente pequenos. Em última análise, era a falha nesse entendimento que levava ao aparente paradoxo de Zenão.

matemáticos provam um teorema, há espaço para liberdade criativa? Não há como “discordar” do resultado de um teorema. Debruçados sobre o mesmo problema, todos os outros matemáticos não teriam opção senão chegar necessariamente à mesma conclusão. Estas características apontariam na direção de uma matemática descoberta, e não inventada. Mas talvez aqui estejamos focados no detalhe da mecânica interna da demonstração de teoremas individuais e perdendo de vista a dinâmica da matemática como um todo.

Finalmente, cabe lembrar que em demonstrações matemáticas pode haver mais de um caminho que leva ao mesmo resultado.

É bastante comum no vocabulário de físicos e matemáticos referir-se à solução mais elegante para um problema. Isso pode parecer um detalhe tão superficial quanto a escolha de notação.

No entanto, o papel de considerações estéticas na matemática (e mesmo na física) é intrigante demais para ser descartado.

Existe uma longa tradição de matemáticos e cientistas falando sobre beleza de teorias e equações, e tentando entender que papel ela teria em guiar o rumo da pesquisa ou em avaliar os méritos de uma teoria. Por exemplo, uma demonstração matemática pode ser considerada elegante quando é sucinta, quando requer poucas suposições iniciais, quando leva a resultados de validade ampla. (Bertrand Russell diz que a beleza da matemática é uma beleza fria e austera, como a da escultura, e não exuberante como a da música ou a da pintura.)

A própria teoria da relatividade vem a ser um exemplo do caso em que a matemática necessária já estava essencialmente disponível antes de ter aplicação física. Quando Einstein precisou dar o salto da teoria restrita para a teoria geral, passou a lidar com a noção de espaços curvos. São espaços com propriedades estranhas: a soma dos ângulos internos dos triângulos já não é 180 graus, a menor distância entre dois pontos não é uma linha reta, etc. Curiosamente, os matemáticos já sabiam manipular tais geometrias não-euclidianas e já tinham ferramentas bem desenvolvidas para o tratamento matemático que a teoria da relatividade viria a exigir. Estas geometrias de espaços curvos poderiam parecer um tópico exótico e profundamente abstrato, mas vieram a ter uma aplicação inesperada e muito

palpável na teoria da relatividade geral. Com esse poderoso arsenal matemático, Einstein pôde descrever a relação entre a gravidade e o espaço-tempo. Além de todas as anomalias temporais devidas à relatividade restrita, a relatividade geral introduz novas distorções do tempo, pois resulta que a gravidade também é responsável por mudar o fluxo do tempo.

8 CONCLUSÃO

A teoria da relatividade restrita nos mostrou que nossa concepção comum do tempo estava equivocada. Nossa noção intuitiva sobre o fluxo do tempo aparenta se adequar bem à realidade, pois os efeitos relativísticos só se manifestam notavelmente quando as velocidades são muito altas. Durante todo o último século, experimentos de altíssima precisão vêm verificando todas as previsões da relatividade, inclusive os efeitos de dilatação do tempo.

Entendemos agora que o tempo flui em ritmos diferentes para observadores que tenham diferentes velocidades entre si. Não são seus relógios que marcam um tempo errado: trata-se da natureza intrínseca de como o tempo funciona em nosso universo. Já que o tempo é maleável, descobrimos que o conceito de simultaneidade não tem mais significado absoluto. Eventos podem ser simultâneos em um referencial e não-simultâneos em outro, sendo que ambos os observadores estarão corretos.

Ainda mais bizarra é a inversão da sucessão temporal. Isto é, eventos na ordem AB podem legitimamente ocorrer na ordem BA para outro observador. No entanto, esta inversão é terminantemente proibida caso haja uma relação causal entre A e B. Se a causalidade pudesse ser violada, teríamos viagens no tempo em direção ao passado. Na teoria da relatividade, a causalidade é protegida pela velocidade da luz. Como resultado, o passado é inviolável.

Depois de Einstein, passamos a enxergar a estrutura do universo de um modo completamente novo. Antes, o espaço era um palco

rígido, por onde se moviam os corpos. E o tempo era um relógio absoluto, eterno e universal, marchando no mesmo ritmo para todos. Agora, tempo e espaço já não existem separadamente.

E essa nova entidade, o espaço-tempo, é alguma coisa flexível, que se deforma conforme o movimento do observador.

Vimos que a velocidade da luz desempenha dois papéis centrais na teoria da relatividade. É um limite universal de velocidade, que nunca pode ser ultrapassado por nenhum corpo em movimento. Além disso, a velocidade da luz, sendo constante, é o que há de absoluto na teoria da relatividade. Tudo é relativo?

Velocidades são relativas, claro. Exceto a da luz, que é absoluta.

- Borges, J. L., *Otras Inquisiciones*, Buenos Aires: Emecé Editores, 2005.
- _____, *Historia de la eternidad*, Buenos Aires: Emecé Editores, 2005.
- _____, *El libro de arena*, Buenos Aires: Emecé Editores, 2005.
- Eisberg, R. M., *Fundamentals of Modern Physics*, John Wiley, 1967.
- Feynman, R., Leighton, R. & Sands, M. *Le Feynman Lectures on Physics*, vol. I, 2ª ed., Boston: Addison-Wesley, 1963.
- French, A. P., *Special Relativity*, W. W. Norton, 1968.
- Griffiths, D. J., *Introduction to Electrodynamics*, 3ª ed., Prentice Hall, 1999.
- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J., *Fundamentos de Física*, vol. 4, trad. Ronaldo Sérgio de Biasi, 10ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- Heisenberg, W., *Física e Filosofia*, trad. de Jorge Leal Ferreira, 4ª ed., Editora Universidade de Brasília, 1999.
- Nussenzveig, H. M., *Curso de Física Básica*, vol. 4, 1ª ed., São Paulo: Editora Blucher, 1998.
- Pais, A., *'Subtle is the Lord...': The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1983.
- Poincaré, H., *La Valeur de la Science*, Paris: Flammarion, 1914.
- Wigner, E., *The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences*, in *Communications in Pure and Applied Mathematics*, vol. 13, n.º. 1, 1960.