

GEORGE GAMOW

As Aventuras do Sr. Tompkins

APRESENTAÇÃO, ANOTAÇÕES, TRADUÇÃO E REVISÃO DE

A. M. NUNES DOS SANTOS

E

CHRISTOPHER AURETTA

Ilustrações do autor e de John Hookham

gradiva

Introdução

Desde a infância que crescemos acostumados ao mundo que nos rodeia, tal como dele nos apercebemos através dos nossos cinco sentidos; neste estágio de desenvolvimento são formadas as noções fundamentais de espaço, tempo e movimento. A nossa mente habitua-se rapidamente a estas noções e, mais tarde, temos tendência para acreditar que o nosso conceito de mundo exterior baseado nelas é o único-possível, parecendo-nos paradoxal toda a ideia da sua transformação. Contudo, o desenvolvimento dos métodos físicos de observação é uma análise mais profunda das relações formuladas têm levado a ciência moderna à conclusão decisiva de que este fundamento «clássico» falha completamente quando utilizado na descrição pormenorizada dos fenómenos ordinariamente inacessíveis à nossa observação diária e que algumas modificações nos conceitos fundamentais de espaço, tempo e movimento são absolutamente necessárias para a descrição correcta e consistente de uma nova experiência clarificada.

As divergências entre as noções comuns e as que foram introduzidas pela física moderna são, contudo, tão pequenas que podem ser desprezadas sempre que a experiência se refira à vida quotidiana. Porém, se imaginarmos outros universos, com as mesmas leis físicas que as do nosso, mas com valores numéricos diferentes para as constantes físicas que

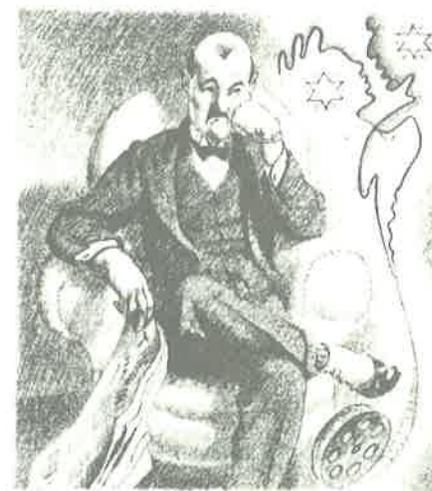
determinam os limites de aplicabilidade dos antigos conceitos, os novos e correctos conceitos de espaço, tempo e movimento, que a ciência moderna elaborou após longas e laboriosas investigações, tornar-se-ão matéria de conhecimento comum. Pode dizer-se que mesmo um ser primitivo em tal universo se familiarizaria com os princípios da relatividade e da teoria quântica e os usaria na caça e na satisfação das suas necessidades diárias.

O herói destes contos é transportado, nos seus sonhos, para vários universos em que os fenómenos, geralmente inacessíveis aos nossos sentidos, são tão fortemente exagerados que poderiam com facilidade ser observados como acontecimentos do dia-a-dia. Este herói foi ajudado no seu sonho fantástico, embora cientificamente correcto, por um antigo professor de Física (com cuja filha, Maud, acabou por se casar), que lhe explicou, numa linguagem simples, os acontecimentos estranhos que observava nos mundos da teoria da relatividade, da cosmologia, da teoria quântica, da estrutura atómica e nuclear, das partículas elementares, etc.

Esperamos que as insólitas experiências do Sr. Tompkins ajudarão o leitor a formar uma ideia mais clara do actual mundo físico em que vivemos.

Velocidade-limite na cidade¹

Era feriado² e o Sr. Tompkins, o humilde empregado de um grande banco da cidade, dormiu até tarde e tomou vagarosamente o pequeno-almoço. Tentando planear o seu dia,



Oh, só coisas de Hollywood!

¹ Neste conto, para explicar os efeitos da relatividade einsteiniana, Gamow utiliza uma cidade imaginária, onde a velocidade máxima de circulação permitida é muito mais pequena do que a velocidade da luz. (*N. dos R.*)

² Mais precisamente, trata-se de um feriado bancário, designado por *bank holiday*, sempre a uma segunda-feira. (*N. dos R.*)

pensou primeiro em ir a uma *matinée* e, abrindo o jornal da manhã, leu a página dos espectáculos. Nenhum dos filmes lhe despertou a curiosidade. Ele detestava todas essas coisas de Hollywood, com infundáveis romances entre as estrelas de cinema mais conhecidas.

Se, pelo menos, houvesse um filme com alguma autêntica aventura, ou com algum acontecimento invulgar e até mesmo algo de fantástico! Mas não, não havia nada. Inesperadamente, os seus olhos pousaram numa pequena notícia no canto da página. A universidade anunciava uma série de conferências acerca dos problemas da física moderna, e a dessa tarde tinha como tema a teoria da relatividade de EINSTEIN³. Bem, isto parecia ser promissor! Ouvira frequentemente a afirmação de que apenas uma dúzia de pessoas⁴ no mundo conseguia entender realmente a teoria de Einstein. Talvez viesse a ser o décimo terceiro! Sim, iria assistir à conferência; aquilo era o que realmente precisava.

Chegou ao grande auditório da universidade já depois de a conferência ter começado. A sala estava cheia de alunos, jovens na sua maioria, a ouvirem com grande atenção um

³ Albert Einstein (1879-1955), sem dúvida o cientista mais famoso deste século. Figura pública, como cientista formulou as teorias da relatividade restrita (1905) e generalizada (1916) e foi galardoado com o Prémio Nobel da Física em 1921 pelo seu trabalho sobre o efeito foteléctrico. A sua contribuição para o desenvolvimento da teoria quântica é notável. Foi professor em Zurique (ETH), Praga, Berlim e no Advanced Institute de Princeton, depois de ter iniciado a sua carreira profissional numa simples Repartição de Patentes, em Berna. (*N. dos R.*)

⁴ Leopold Infeld relata-nos, no seu livro *Albert Einstein*, que, em 1917, um físico (supõe-se que seja Ludwick Silberstein), ao interperlar Sir Arthur Eddington, o astrónomo que confirmou experimentalmente as ilações da teoria da relatividade generalizada, fez a seguinte observação: «O senhor é um dos três homens que compreendem a teoria da relatividade.» Como surgisse na face de Eddington uma expressão de aflição, o físico continuou: «Professor Eddington, não fique embaraçado. O senhor é deveras honesto.» Sir Arthur respondeu-lhe: «Não estou nada embaraçado. Apenas me pergunto quem será o terceiro...» (*N. dos R.*)

homem de barba branca que, junto ao quadro negro, tentava explicar à audiência as ideias básicas da teoria da relatividade. Mas o Sr. Tompkins apenas conseguiu compreender que o ponto fulcral da teoria de Einstein declarava que havia uma velocidade máxima, a velocidade da luz, que não podia ser ultrapassada por nenhum corpo material em movimento, e que tal facto conduz a consequências inesperadas e pouco vulgares. Todavia, o professor adicionou que, como a velocidade da luz é de 300 000 km por segundo⁵, o efeito da relatividade dificilmente poderia ser observado nos acontecimentos da vida quotidiana. Mas a natureza destes efeitos pouco frequentes era bastante mais difícil de entender, e pareceu ao Sr. Tompkins que tudo isto era contrário ao senso comum. Estava a tentar imaginar a contracção do metro, o padrão que é utilizado para medir, e o comportamento estranho dos relógios — fenómenos que se verificariam se eles se movessem com uma velocidade próxima da da luz —, quando a cabeça lhe pendeu lentamente sobre o ombro.

Quando abriu novamente os olhos, encontrou-se sentado, não num banco da sala de conferências, mas num dos bancos instalados na paragem de autocarro para melhor conforto dos passageiros que esperam esse meio de transporte⁶. Era uma cidade velha, linda, com edifícios universitários medievais ao longo da rua. Julgou que estava a sonhar, mas, para sua surpresa, nada de estranho se passava à sua volta; mesmo um polícia que se encontrava na esquina do lado oposto tinha ar de ser um polícia típico. Os ponteiros do grande relógio da torre, ao fundo da rua, marcavam quase 5 horas e as ruas estavam praticamente vazias. Um único ciclista circulava devagar rua abaixo e, à medida que se aproximava, os olhos do Sr. Tompkins arregalavam-se de espanto. A bicicleta e

⁵ No original, «186 000 milhas por segundo». (*N. dos R.*)

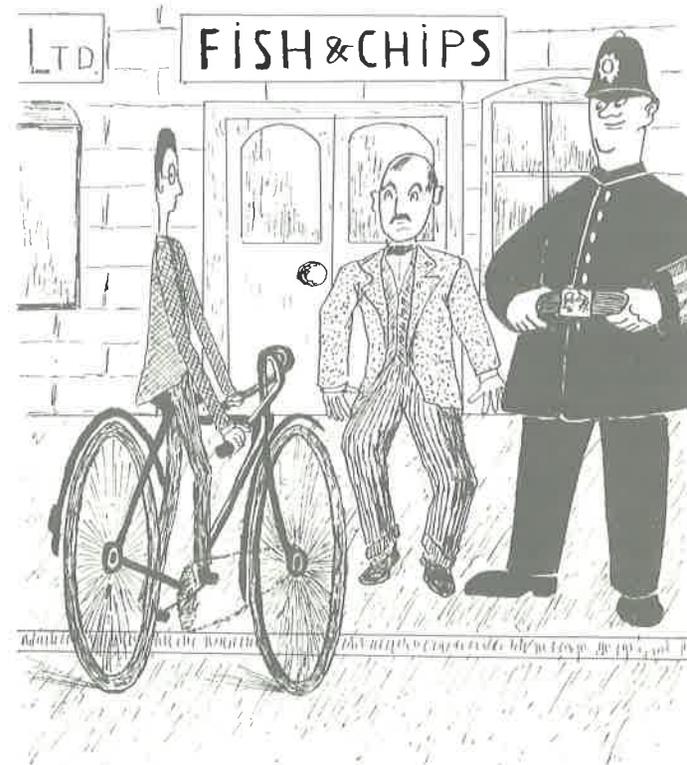
⁶ É bastante usual, na Grã-Bretanha, as paragens dos autocarros, geralmente envidraçadas, conterem bancos no seu interior. (*N. dos R.*)

o jovem estavam incrivelmente adelgaçados na direcção do movimento, como se estivessem a ser observados através de uma lente cilíndrica. O relógio da torre bateu as 5 horas e o ciclista, evidentemente com certa pressa, pedalava agora com mais força. O Sr. Tompkins notou que ele não adquiriu maior velocidade, mas sim que, como resultado do seu esforço, se adelgaçou ainda mais e ia pela rua abaixo parecendo uma figura recortada em cartão. Então o Sr. Tompkins sentiu-se muito orgulhoso por poder perceber que o que se passava com o ciclista era simplesmente a contracção dos corpos em movimento⁷, assunto que acabara de ouvir na conferência.

«A velocidade-limite da natureza é, evidentemente, menor aqui», conclui ele. «Isto explica a razão pela qual o polícia ali da esquina tem um ar de preguiçoso; ele não precisa de se preocupar com os ‘fangios’.»

De facto, um táxi que nesse momento passava pela rua, e que fazia um barulho infernal, não circulava a maior velocidade do que o ciclista, e lá ia como que a rastejar. O Sr. Tompkins decidiu alcançar o ciclista, que lhe parecera à primeira vista um rapaz simpático, e perguntar-lhe o que estava a acontecer. Certificando-se de que o polícia olhava no sentido contrário, pegou numa bicicleta que se encontrava abandonada junto ao passeio e pedalou estrada abaixo. Esperava ficar imediatamente adelgado, ideia que lhe agradou muito, pois ultimamente preocupava-se com o seu aumento de peso. Para sua grande surpresa, aparentemente nada aconteceu, nem a ele nem à sua bicicleta. Por outro lado, a pai-

⁷ Os físicos acreditaram durante muito tempo que esta contracção dos corpos em movimento poderia ser directamente observada. Mais recentemente verificou-se que a observação visual era bastante diferente e que os corpos com velocidades muito próximas da velocidade da luz, se se considerarem todos os efeitos da relatividade einsteiniana, parecem estar sujeitos não a uma contracção, mas a uma simples rotação. [Trabalhos de Terrel e Penrose (1958-59)]. (N. dos R.)



Incrivelmente adelgaçados

sagem à sua volta alterou-se completamente. As ruas tornaram-se mais curtas, as janelas das lojas começaram a parecer frestas estreitas e o polícia na esquina tornou-se o homem mais delgado que alguma vez vira.

— Caramba! — exclamou o Sr. Tompkins entusiasmado. — Agora percebo o truque. É aqui que entra a palavra *relatividade*. Tudo aquilo que se move relativamente a mim me parece mais encurtado, quer eu esteja a pedalar quer não.

Ele era um bom ciclista e estava a fazer o seu melhor para alcançar o rapaz. Mas verificou que não era fácil aumentar



Os quarteirões pareciam bem mais estreitos

a velocidade com aquela bicicleta. Muito embora pedalasse com a força máxima que lhe era possível, o aumento da velocidade não deixava de ser insignificante. As suas pernas começaram a doer e não conseguia ainda ultrapassar o candeeiro da esquina com muito maior velocidade do que quando começara. Parecia-lhe que todos os seus esforços para andar mais rapidamente não produziam nenhum efeito. Percebia agora muito bem porque o ciclista e o táxi que vira anteriormente não podiam fazer melhor e lembrou-se das palavras do professor acerca da impossibilidade de se ultrapassar a velocidade-limite da luz. Notou, no entanto, que os quarteirões da rua se tornavam ainda mais curtos e que o ciclista à sua frente lhe parecia mais próximo. Alcançou-o ao dobrar a segunda esquina e, depois de andarem lado a lado por uns momentos, reparou, surpreendido, que o ciclista era, na realidade, um jovem com ar desportista. «Oh, isto deve ser assim porque não nos movemos em relação um ao outro», concluiu.

— Desculpe-me — disse, dirigindo-se ao jovem. — Não acha incómodo viver numa cidade com uma velocidade-limite tão pequena?

— Velocidade-limite? — replicou o rapaz com surpresa. — Nós não temos aqui nenhuma velocidade-limite. Posso chegar a qualquer lugar tão depressa quanto queira, ou, pelo menos, poderia, se tivesse uma motocicleta em vez desta sucata.

— Mas ia muito devagar quando passou por mim há pouco — disse o Sr. Tompkins. — Reparei bem em si.

— Oh, então reparou? — disse o jovem, com um tom de ofendido. — Suponho que ainda não reparou que, desde que começou a falar comigo, já passámos cinco quarteirões. Não é suficientemente rápido para si?

— Mas as ruas ficaram tão curtas! — argumentou o Sr. Tompkins.

— Que diferença faz se andarmos mais rapidamente ou se as ruas se encurtarem? Eu tenho de percorrer dez quarteirões para chegar aos correios, e, se pedalar mais depressa, os quarteirões tornam-se mais curtos e eu chego lá em menos tempo. Chegámos, enfim! — disse o jovem, apeando-se da bicicleta.

O Sr. Tompkins olhou para o relógio do correio. Marcava cinco e meia.

— Olhe que demorou meia hora a percorrer dez quarteirões — disse com ar triunfante. — Quando o vi pela primeira vez, eram 5 horas em ponto!

— Com que então *acha* que foi meia hora? — exclamou o seu companheiro.

O Sr. Tompkins teve de concordar que realmente lhe pareceu terem passado apenas alguns minutos. Olhou em seguida o seu relógio de pulso e viu que marcava 5 horas e 5 minutos.

— Oh! — disse ele. — O relógio do correio estará adiantando?

— Claro que está, ou talvez o seu esteja atrasado exactamente porque veio rápido de mais. Afinal o que se passa consigo? Caiu da Lua? — e o jovem entrou na estação do correio.

Depois desta conversa, o Sr. Tompkins apercebeu-se do seu azar por não ter ao pé dele o velho professor para lhe explicar todos estes acontecimentos estranhos. O jovem era com certeza natural dali e estava acostumado a este género de coisas, mesmo antes de ter aprendido a andar. O Sr. Tompkins viu-se então obrigado a explorar sozinho este estranho mundo. Acertou o seu relógio pelo do correio, e, para se certificar de que os relógios funcionavam bem, esperou dez minutos. O seu relógio não se atrasou. Prosseguiu depois rua abaixo até ver a estação do caminho-de-ferro e decidiu verificar novamente o relógio. Para sua grande surpresa, ele estava de novo um pouco atrasado.

— Bem, deve ser algum efeito relativista! — concluiu o Sr. Tompkins, que decidiu perguntar o que realmente se passava a alguém mais inteligente do que o jovem ciclista.

A oportunidade surgiu logo em seguida. Um cavalheiro, aí na casa dos 40, apeou-se de uma carruagem de comboio e dirigiu-se para a saída. Ia ao seu encontro uma senhora muito idosa, que, para grande surpresa do Sr. Tompkins, ao cumprimentar o cavalheiro lhe disse:

— Querido avô!

Isto foi de mais para o Sr. Tompkins. Com o pretexto de ajudar a transportar a bagagem, meteu conversa:

— Desculpe-me se estou a intrometer-me nos seus assuntos familiares — disse o Sr. Tompkins com ar curioso —, mas é realmente o avô desta simpática senhora? Bem vê, sou um estranho aqui e nunca...!

— Oh, bem vejo! — disse o cavalheiro sorrindo. — Suponho que me está a tomar pelo Judeu Errante ou qualquer coisa do género. Mas isto explica-se muito facilmente. O meu emprego obriga-me a viajar muito e, como passo a maior

parte da minha vida no comboio, envelheço naturalmente mais devagar do que os meus parentes que vivem na cidade. Estou tão contente por ter voltado a tempo de ainda ver a minha querida netinha viva! Mas desculpe-me, pois tenho de a acompanhar no táxi — e desapareceu rapidamente, deixando o Sr. Tompkins sozinho com os seus problemas.

O Sr. Tompkins decidiu então entrar no bar da estação. Pediu algumas sanduíches para fortalecer um pouco as suas capacidades de raciocínio e, posteriormente, tanto pensou que julgou que tinha descoberto a contradição do famoso princípio da relatividade.

«Sim, claro!», pensou ele, tomando uns golinhos de café. «Se tudo fosse relativo, o viajante deveria parecer muito velho aos seus parentes e estes parecer-lhe-iam igualmente idosos, muito embora todos fossem de facto bastante jovens. Mas o que acabo de dizer não tem lógica nenhuma. Não é possível ter cabelo cinzento relativo!...»

Decidiu então fazer uma última tentativa para descobrir como as coisas são na realidade, e, virando-se para um empregado vestido com a farda dos caminhos-de-ferro que estava sentado sozinho no bar, perguntou:

— Desculpe-me — começou ele —, quer ter a gentileza de me dizer quem é o responsável pelo facto de os passageiros do comboio envelhecerem muito mais devagar do que as pessoas que não viajam?

— Sou eu o responsável — disse o homem com muita calma.

— Ah! — exclamou o Sr. Tompkins. — Vejo que resolveu o problema da pedra filosofal dos antigos alquimistas. Deve ser um homem bastante famoso. Ocupa alguma cátedra de Medicina?

— Não — respondeu o homem, muito espantando com esta pergunta. — Sou apenas guarda-freios dos caminhos-de-ferro.

— Guarda-freios? Quer dizer, guarda-freios!... — exclamou o Sr. Tompkins completamente desorientado. — Quer dizer que apenas põe em funcionamento os freios quando o comboio chega à estação?

— Sim, é o que faço; e, sempre que o comboio abrandar, os passageiros envelhecem relativamente às outras pessoas. É evidente — acrescentou modestamente — que o maquinista que acelera o comboio também tem a sua parte nesta operação.

— Mas o que tem isso a ver com o facto de se conservarem jovens? — perguntou o Sr. Tompkins, perplexo.

— Bem, isso não sei exactamente — respondeu o guarda-freios —, mas assim é. Um dia fiz essa mesma pergunta a um professor universitário que viajava no meu comboio. Para dizer a verdade, ele proferiu um longo e incompreensível discurso, e no final disse que era algo semelhante ao desvio para vermelho no Sol⁸. Penso que foi isto que lhe chamou! Já ouviu falar nisso?

— Não... — disse o Sr. Tompkins, um pouco hesitante.

O guarda-freios afastou-se abanando a cabeça.

De repente, uma mão pesada sacudiu-lhe o ombro e o Sr. Tompkins encontrou-se sentado, não num café da estação, mas na cadeira do auditório onde tinha estado a ouvir a conferência. As luzes estavam meio apagadas e a sala encontrava-se vazia. O porteiro que o despertou disse-lhe:

— Senhor, estamos a fechar; se quiser dormir, é melhor ir para casa.

O Sr. Tompkins levantou-se e dirigiu-se à saída.

⁸ E. Hubble observou este fenómeno no espectro dos elementos constitutivos das galáxias (ver nota 6 do cap. 3), o que deu origem à teoria de expansão do universo. (N. dos R.)

A conferência sobre relatividade que inspirou o sonho do Sr. Tompkins

Senhoras e senhores:

Num estado muito primitivo do desenvolvimento, o espírito humano elaborou noções definidas de espaço e de tempo e com elas formou o referencial onde ocorrem os diversos acontecimentos.

Estas noções, sem grandes mudanças significativas, têm sido transmitidas de geração em geração e, desde o desenvolvimento das ciências exactas, constituíram os fundamentos da descrição matemática do universo. O grande NEWTON deu talvez a primeira formulação concisa das noções clássicas de espaço e de tempo, escrevendo nos seus *Principia*¹:

O espaço absoluto, na sua própria natureza, sem nenhuma relação com o que lhe é exterior, permanece sempre igual e imutável; o tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e pela sua própria natureza, flui igualmente sem nenhuma relação com o que é exterior.

¹ Os *Principia (Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica)*, apresentados à Royal Society em Junho de 1686, são os famosos volumes onde Newton (1642-1727) formula a gravitação universal e estabelece o programa da chamada interpretação mecanística de todos os fenómenos físicos, um ponto de vista que dominou a física desde então até ao princípio deste século e apenas sucumbiu sob o impacto da teoria da relatividade e, posteriormente, da teoria quântica. Ao prosseguir no seu objectivo — deduzir os fenómenos da natureza a partir dos princípios mecânicos —, Newton desenvolveu um tratamento matemático dos fenómenos mecânicos tão claro e preciso

Tão forte era a crença na exactidão absoluta destas ideias clássicas sobre o espaço e o tempo que frequentemente os filósofos as consideravam como dados *a priori* e nenhum cientista pensou sequer na possibilidade de duvidar delas.

Contudo, no princípio deste século tornou-se evidente que certo número de resultados, obtidos pelos métodos mais refinados da física experimental, conduziram a óbvias contradições se se interpretassem tais resultados na perspectiva clássica do tempo e do espaço. Este facto suscitou a um dos maiores físicos contemporâneos, ALBERT EINSTEIN, a ideia revolucionária de que não existe nenhuma justificação, excepto a da tradição², para considerar as noções clássicas respeitantes ao espaço e ao tempo como absolutamente verdadeiras e que estas poderiam e deveriam ser modificadas para se ajustarem aos resultados experimentais mais recentes e mais precisos. De facto, dado que as noções clássicas de espaço e de tempo foram formuladas com base na experiência humana da vida quotidiana, não deve surpreender-nos que os novos métodos de observação mais rigorosos, baseados numa técnica experimental altamente desenvolvida, indiquem que estas velhas noções são bastante grosseiras e inexactas e que só puderam ser utilizadas na vida vulgar e nos primórdios de desenvolvimento da física apenas porque os seus desvios das percepções correctas são suficientemente pequenos. Não nos deve surpreender também que o alargamento do campo de exploração da ciência moderna nos

que ainda hoje pode ser usado sem qualquer alteração num livro moderno de mecânica clássica. Newton exerceu uma enorme influência no pensamento do século XVIII através da aplicação de um método científico e de filosofia da ciência («*Queries*», no seu livro *Opticks*). (N. dos R.)

² Sobre a tradição científica há um texto notável de Werner Heisenberg intitulado «*Tradition in Science*», que foi publicado pela primeira vez em 1973, no *Science and Public Affairs* (29, n.º 10 M, 4-10), e que se encontra traduzido no opúsculo de Werner Heisenberg *Páginas de Reflexão e de Auto-Retrato*, Gradiva, cof. «Panfletos». (N. dos R.)

leve a regiões onde esses desvios se tornam tão grandes que as noções clássicas não podem, de modo algum, ser utilizadas.

O resultado experimental mais importante que conduziu à crítica fundamental das nossas noções clássicas foi a descoberta do facto de a luz no vácuo representar o limite superior de todas as velocidades físicas possíveis. Esta conclusão importante e inesperada resultou sobretudo das experiências do físico americano, MICHELSON³, que no fim do século XIX tentou observar o efeito do movimento da Terra sobre a velocidade de propagação da luz e, para grande surpresa sua e da comunidade científica, verificou que não existe tal efeito e que a velocidade da luz no vácuo se mantém sempre constante, independentemente do sistema a partir do qual é medida ou do movimento da fonte que a emite. Não é necessário explicar que tal resultado é bastante estranho e contradiz os nossos conceitos fundamentais acerca do movimento. De facto, se um objecto se mover rapidamente

³ Estas experiências, idealizadas por A. A. Michelson (1852-1931) em colaboração com Edward Morley (1838-1923), resultaram do facto de se admitir a existência de um suporte — o éter — que permitia a propagação das ondas electromagnéticas no vácuo. Se a Terra se movesse igualmente através desse suporte, então um observador terrestre deveria aperceber-se da existência de um «vento de éter» que retarde ou acelere as ondas luminosas, conforme o seu sentido, como o previsto pela mecânica clássica. O resultado da experiência levada a efeito por meio de um interferómetro foi negativo, e, pelos seus trabalhos, Michelson tornou-se o primeiro americano a receber o Prémio Nobel da Física (1907). Os positivistas sempre indicaram que a teoria einsteiniana dependeu inteiramente do resultado dessa experiência realizada em 1887, contrapondo-se assim à opinião de Einstein, que declarava que essa experiência não teve qualquer papel, ou, pelo menos, um papel decisivo, na elaboração da sua teoria. Robert Shankland dá-nos o testemunho de Einstein: «Quando lhe perguntei», cita Shankland, «como ele [Einstein] tivera conhecimento da experiência de Michelson, disse-me que o soubera através dos escritos de H. A. Lorentz, mas que não lhe prestara grande atenção antes de 1905. Doutra modo, tê-la-ia mencionado no meu artigo — palavras do próprio Einstein.» (N. dos R.)

através do espaço e nós nos deslocarmos ao seu encontro, o objecto colidirá connosco com uma velocidade relativa maior, igual à soma da velocidade do objecto e do observador. Por outro lado, se nos afastamos dele, seremos atingidos por esse objecto móvel com uma velocidade menor, igual à diferença das duas velocidades.

Também, se nos deslocarmos de carro, por exemplo, ao encontro de um som que se propaga através do ar, a velocidade do som, se a medirmos dentro do carro, é acrescida da velocidade deste, ou é diminuída desse mesmo valor se o som nos persegue. Este facto designa-se por *teorema da adição das velocidades*, que foi sempre aceite como algo evidente.

Contudo, as experiências mais cuidadosas mostram-nos que, no caso da luz, isso já não é verdade; a velocidade da luz no vácuo permanece sempre a mesma e igual a 300 000 km por segundo (geralmente representada pelo símbolo c), independentemente da velocidade do observador em movimento.

«Sim», perguntarão, «mas não é possível construir uma supervelocidade da luz adicionando várias velocidades pequenas que podem ser obtidas fisicamente?»

Por exemplo, poderíamos imaginar um comboio que se move muito rapidamente, digamos com três quartos da velocidade da luz, e um vagabundo a correr sobre o tejadilho com uma velocidade igual à do comboio.

De acordo com o teorema da adição, a velocidade total seria vez e meia a da luz e, conseqüentemente, o vagabundo deveria ultrapassar a velocidade de um raio de luz emitida por um posto de sinalização⁴. A verdade, contudo, é a seguinte: dado que a constância da velocidade da luz é um

⁴ A experiência descrita é o que Einstein designava por «experiência conceptual» — Gedankenexperiment —, em que somente se visualiza uma situação e se tenta concluir o que acontece na base dos resultados conhecidos da experiência. (N. dos R.)

facto experimental, a velocidade resultante, neste caso, deverá ser menor do que a esperada — não pode ultrapassar o valor crítico c ; e, assim, chegaremos à conclusão de que, mesmo para menores velocidades, o clássico teorema da adição deve estar errado.

O tratamento matemático do problema, que não desejo abordar aqui, conduz a uma fórmula muito simples para o cálculo da velocidade resultante de dois movimentos sobrepostos.

Se v_1 e v_2 são duas velocidades a serem adicionadas, a velocidade resultante será

$$V = \frac{v_1 \pm v_2}{1 \pm \frac{v_1 v_2}{c^2}} \quad (1)$$

Desta fórmula pode concluir-se que, se ambas as velocidades originais forem pequenas, ou seja, pequenas em relação à velocidade da luz, o segundo termo no denominador de (1) pode ser desprezado quando comparado com a unidade e obtemos o teorema clássico da adição das velocidades. Se, no entanto, as velocidades v_1 e v_2 não forem pequenas, o resultado será sempre um pouco inferior à sua soma aritmética. Por exemplo, no caso do nosso hipotético vagabundo a correr sobre o tecto do comboio, $v_1 = (3/4)c$ e $v_2 = (3/4)c$, e a fórmula mencionada dá-nos como velocidade resultante $V = (24/25)c$, que ainda é menor que a velocidade da luz.

Num caso particular, quando uma das velocidades originais é c , a fórmula (1) determina para velocidade resultante o valor de c , independentemente do valor da segunda velocidade. Assim, sobrepondo qualquer número de n velocidades, nunca poderemos ultrapassar a velocidade da luz.

Talvez seja de interesse saber que esta fórmula já foi testada experimentalmente e foi confirmado que a resultante de duas velocidades é sempre menor que a sua soma aritmética.

Se se reconhecer a existência de uma velocidade-limite (máxima), poderemos formular uma crítica às ideias clássicas de espaço e tempo e dirigir o primeiro ataque contra a noção de *simultaneidade*, que tem como base essas ideias.

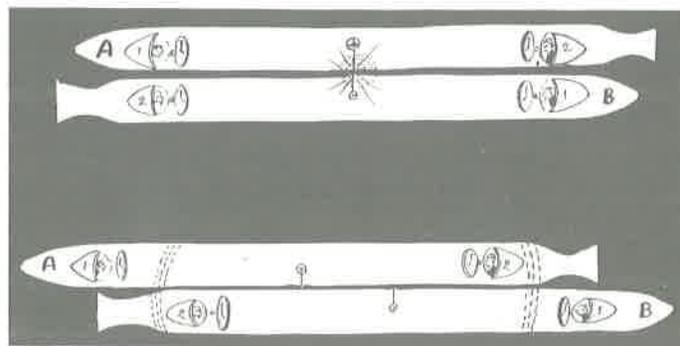
Quando me dizem: «A explosão nas minas perto de Capetown aconteceu exactamente no mesmo momento em que serviam o presunto e os ovos num dado apartamento de Londres», talvez pensem que se sabe o que se está a dizer. Vou mostrar-lhe, porém, que, na realidade, não se sabe e que, estritamente falando, esta afirmação não possui um significado exacto. Ora vejamos que método se utilizaria para verificar se dois acontecimentos ocorridos em lugares diferentes são ou não simultâneos. Dirão que os relógios em ambos os lugares onde ocorrem os fenómenos indicam a mesma hora; mas, neste caso, surge o problema de como acertar os relógios tão distantes um do outro de modo a darem sempre a mesma hora simultaneamente, e regressamos ao problema original.

Dado que a velocidade da luz no vácuo é independente do movimento da fonte que a emite e do sistema em que é medida, um dos factos experimentais estabelecidos com maior precisão, o método, que irei descrever, para medir as distâncias e para acertar correctamente o relógio em vários postos de observação deverá ser reconhecido como o mais racional e, depois de pensarem um pouco mais acerca deste assunto, concordarão que será o único razoável.

Um sinal luminoso é emitido de *A* e, logo que é recebido em *B*, é enviado de novo para *A*. Se multiplicarmos o valor da metade do tempo contado em *A*, entre os momentos de emissão e de recepção do sinal, pela constante velocidade da luz, obtemos a distância entre *A* e *B*.

Dizemos que os relógios em *A* e *B* estão correctamente ajustados se, no momento da recepção do sinal em *B*, o relógio local mostrar apenas a média dos dois tempos registados em *A* nos momentos de emissão e recepção do sinal. Ao

utilizar este método entre diferentes locais de observação fixados num corpo rígido, chegamos finalmente ao quadro de referência (referencial) desejado, e só agora poderemos responder a perguntas sobre a simultaneidade ou o intervalo de tempo entre dois acontecimentos ocorridos em lugares diferentes.



Duas longas plataformas movendo-se em sentidos opostos

Mas serão estes resultados reconhecidos pelos observadores noutros sistemas? Para responder a esta questão, suponhamos que tais quadros de referência foram estabelecidos em dois corpos rígidos diferentes, por exemplo, em dois foguetões espaciais que se movem com uma velocidade constante em sentido oposto, e vejamos agora como estes dois referenciais se comportam um em relação ao outro.

Suponhamos que há quatro observadores localizados nos extremos de cada foguetão e que querem, antes de mais, acertar correctamente os seus relógios. Cada par de observadores pode usar no seu foguetão uma modificação do método mencionado anteriormente emitindo um sinal luminoso do centro do foguetão (medido com um metro) e marcando o zero nos seus relógios quando o sinal proveniente do centro do foguetão chega a cada extremo. Assim, cada par dos nossos observadores estabeleceu, de acordo com a definição pré-

via, o critério de simultaneidade no seu próprio sistema e acertou os seus relógios «correctamente», tendo em conta, claro está, o seu ponto de vista.

A seguir decidiram ver se as contagens do tempo no seu foguetão correspondem com as do outro. Por exemplo, marcarão a mesma hora os relógios de dois observadores de foguetões diferentes quando passam um pelo outro? Isto pode ser testado pelo método seguinte: no centro geométrico de cada foguetão instalam-se dois condutores eléctricos carregados de tal modo que, quando os foguetões se cruzam, uma faísca salta entre os condutores e os sinais luminosos partem simultaneamente do centro para cada um dos extremos. No instante em que os sinais luminosos que viajam com uma velocidade finita se aproximam dos observadores, os foguetões terão mudado de posição e os observadores 2A e 2B estarão mais próximos da fonte luminosa do que os observadores 1A e 1B.

É evidente que, quando o sinal de luz chega ao observador 2A, o observador 1B se encontrará bastante mais atrás e, assim, o sinal demorará mais tempo a atingi-lo. Assim, se o relógio do observador 1B está acertado de tal modo que marca zero à recepção do sinal, o observador 2B afirmará que esse relógio se atrasou em relação à hora correcta.

Do mesmo modo, o outro observador, 1A, chegará à conclusão de que o relógio do observador 2B, que recebe o sinal antes dele, está adiantado. Dado que, de acordo com a definição de simultaneidade previamente estabelecida, os seus próprios relógios estão correctamente certos, os observadores do foguetão A concordarão que existe uma diferença entre os relógios dos observadores no foguetão B. Não devemos esquecer, porém, que os observadores do foguetão B, por razões idênticas, irão considerar que os seus próprios relógios estão correctamente certos e afirmarão que existe uma diferença de acerto entre os relógios dos observadores do foguetão A.

Uma vez que os foguetões são equivalentes, esta disputa entre os dois grupos de observadores pode ser resolvida apenas dizendo que ambos os grupos estão correctos segundo o seu próprio ponto de vista, mas que a questão de saber quem está «absolutamente» correcto não tem sentido físico.

Receio ter cansado a minha assistência com estas longas considerações, mas, se as seguirem cuidadosamente, será evidente que, uma vez adoptado o nosso método de medir o espaço e o tempo, *desaparece a noção de simultaneidade absoluta, e dois acontecimentos em dois lugares diferentes, considerados como simultâneos quando observados num sistema de referência, serão separados por um intervalo de tempo definido quando observados de um outro sistema.*

Esta proposição, inicialmente, pode parecer bastante estranha, mas que pensarão se lhes disser que, quando jantamos num comboio, comemos a sopa e a sobremesa no mesmo ponto da carruagem-restaurant, mas em pontos da via férrea muito separados? Contudo, esta declaração acerca do jantar na carruagem-restaurant pode ser formulada dizendo que dois acontecimentos ocorrendo em instantes diferentes no mesmo ponto de um sistema de referência serão separados por um intervalo de espaço se observados de um outro sistema.

Se comparar então esta proposição «trivial» com a «paradoxal» anterior, verá que elas são absolutamente simétricas e podem ser transformadas uma na outra pela simples troca das palavras «tempo» e «espaço».

Aqui está todo o ponto de vista de Einstein: se, por um lado, na física clássica, o tempo era considerado como algo absolutamente independente do espaço e do movimento «fluindo igualmente independente a tudo o que é exterior» (Newton), na nova física, o espaço e o tempo estão intimamente ligados e apenas representam duas secções perpendiculares de um «contínuo espaço-tempo» homogéneo, em que têm lugar todos os acontecimentos observáveis. A par-

tição deste contínuo quadridimensional, em espaço a três dimensões e tempo a uma dimensão, é puramente arbitrária e depende do sistema onde se realizam as observações.

Dois acontecimentos, separados no espaço pela distância l e no tempo pelo intervalo t , quando observados de um sistema, serão separados por outra distância l' e outro tempo t' quando visualizados de um outro sistema; assim, de algum modo, é possível falar da transformação do espaço em tempo e vice-versa. Também não é difícil ver que a transformação do tempo em espaço, como no exemplo do jantar no comboio, é para nós uma noção bastante comum, ao passo que a transformação do espaço em tempo, da qual resulta a relatividade da simultaneidade, nos parece muito estranha. A questão é que, se medirmos distâncias, por exemplo, em «centímetros», a unidade correspondente de tempo não deveria ser o «segundo» convencional, mas uma «unidade de tempo racional» representada pelo intervalo de tempo necessário para que o sinal luminoso percorra a distância de 1 cm, ou seja, 0,000 000 000 03 de segundo.

Portanto, no âmbito da nossa experiência quotidiana, a transformação de intervalos de espaço em intervalos de tempo conduz a resultados praticamente não observáveis, o que parece apoiar o ponto de vista clássico que preconiza o carácter independente e imutável do tempo.

Contudo, quando investigamos movimentos com velocidades muito elevadas, como, por exemplo, o movimento dos electrões emitidos pelos corpos radioactivos ou o movimento de electrões no átomo, onde as distâncias percorridas num certo intervalo de tempo são da mesma ordem de magnitude que a do tempo expresso em unidades racionais, não é de estranhar que sejamos confrontados com ambos os efeitos anteriormente mencionados, e a teoria da relatividade torna-se então de grande importância. Mesmo numa gama de velocidades relativamente menores, como, por exemplo, o movi-

mento dos planetas no nosso sistema solar, os efeitos relativistas podem ser observados devido à extrema precisão das medidas astronómicas⁵; porém, a observação de tais efeitos exige medidas das variações do movimento planetário até uma fracção de um segundo angular por ano.

Conforme procurei explicar, uma análise crítica das noções de espaço e tempo induz à conclusão de que os intervalos de espaço podem ser parcialmente convertidos em intervalos de tempo e inversamente; isto explica que o valor numérico de uma dada distância ou período de tempo será diferente quando medido de diferentes sistemas em movimento.

Uma análise matemática simples deste teorema, e que eu não quero abordar nesta série de conferências, dá-nos uma fórmula exacta para a transformação destes valores⁶. A fór-

⁵ Uma das consequências observáveis da teoria da relatividade einsteiniana foi denominada «precessão do periélio do mercúrio». Da teoria newtoniana sabia-se que as órbitas dos planetas eram trajectórias fechadas, elípticas, estacionárias completamente definidas no espaço. Qualquer perturbação da órbita seria devida a interacções gravitacionais adicionais que podiam ser calculadas pelas leis de Newton, e foi nessa base que se descobriu, em 1846, o planeta Neptuno, como resultado da «perturbação» da órbita de Úrano. Uma consequência mais geral das interacções interplanetárias é que, na realidade, as elipses keplerianas não são fixas no espaço, mas sim animadas de um movimento de rotação, muito lento, no plano do sistema solar, e é possível descrever essa rotação («precessão do periélio») como uma variação progressiva da direcção definida pelo linha que une o Sol ao extremo do eixo maior elipse que está mais próximo do Sol. Estudos teóricos previam por século uma precessão do periélio do planeta Mercúrio de 8,85 minutos e o valor observado foi de 9,95 minutos, o que equivale a uma diferença de 42 segundos de arco por século. Este facto apenas pôde ser explicado à luz da teoria de Einstein que fazia intervir modificações na escala do tempo e da distância radial no campo de gravitação. Compreende-se facilmente a exaltação de Einstein quando soube da concordância, em 1915, entre a sua teoria e o resultado experimental. (*N. dos R.*)

⁶ O factor $\sqrt{1-(v^2/c^2)}$ designa-se por «contração de Fitzgerald» e as expressões (2) e (3) são designadas por «transformadas de Lorentz». Estas indicam-nos como as medidas de espaço estão ligadas às medidas de tempo,

mula mostra que qualquer objecto de comprimento l , movendo-se relativamente ao observador com velocidade v , se contrairá um comprimento que depende da sua velocidade, e a sua medida de comprimento será

$$l' = l\sqrt{1-(v^2/c^2)} \quad (2)$$

Analogamente, qualquer fenómeno que dura o tempo t será observado de um sistema em movimento como levando mais tempo t' , dado por

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} \quad (3)$$

Esta é a famosa «contração do espaço» e «dilatação do tempo» na teoria da relatividade.

Vulgarmente, quando v é muito menor do que c , os efeitos são muito pequenos, mas, para velocidades suficientemente grandes, os comprimentos, quando observados de um sistema em movimento, poderão ser arbitrariamente pequenos e os intervalos de tempo arbitrariamente grandes.

Não se esqueçam que estes dois efeitos são sistemas absolutamente simétricos, e daí que, enquanto os passageiros de um comboio rápido se admirarão que as pessoas dum comboio parado sejam tão magras e se movam tão devagar, os passageiros de um comboio parado pensarão o mesmo dos do comboio rápido.

Uma outra consequência importante sobre a existência de uma velocidade máxima tem a ver com a *massa* dos corpos em movimento. De acordo com o fundamento geral da mecânica, a massa do corpo determina a dificuldade de lhe imprimir movimento ou acelerar aquele de que já está animado;

podendo-se assim extrapolar as regras da geometria de Euclides inerentes às medidas de espaço e incluir o tempo. Herman Minkowski (que foi professor de Einstein na ETH) mostrou, em 1905, como isso pode ser feito e como se pode falar da «geometria espaço-tempo». (N. dos R.)

quanto maior for a massa, mais difícil será aumentar a velocidade.

O facto de nenhum corpo, em nenhuma circunstância, conseguir exceder a velocidade da luz leva-nos directamente à conclusão de que a sua resistência a uma maior aceleração, ou, por outras palavras, a sua massa, deverá aumentar indefinidamente quando a sua velocidade se aproxima da velocidade da luz. Uma análise matemática fornece-nos a fórmula sobre esta dependência, que é análoga às fórmulas (2) e (3)⁷. Se m_0 é a massa para velocidades muito pequenas⁸, a massa m à velocidade v é dada por

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} \quad (4)$$

e a resistência a uma aceleração adicional torna-se infinita quando v se aproxima de c .

Este efeito da variação relativista da massa pode ser facilmente observado experimentalmente em partículas que se movem muito rapidamente. Por exemplo, a massa dos electrões emitidos por corpos radiactivos (com uma velocidade de 99 % da da luz) é muitas vezes maior do que a sua massa quando se encontram num estado de repouso, e as massas dos electrões que formam os chamados raios cósmicos — que se movem frequentemente com uma velocidade de valor igual a 99,98 % da velocidade da luz — são 100 vezes maiores. Para tais velocidades, a mecânica clássica torna-se absolutamente inaplicável e entramos no domínio da relatividade pura.

⁷ O factor que afecta a massa de corpos em movimento é o mesmo que afecta a «contração do espaço» e a «dilatação do tempo», o factor $\sqrt{1-(v^2/c^2)}$. (N. dos R.)

⁸ Mais propriamente a *rest mass*, a massa em repouso, ou seja a resistência de inércia à força que tende a mover a partícula inicialmente em repouso. (N. dos R.)