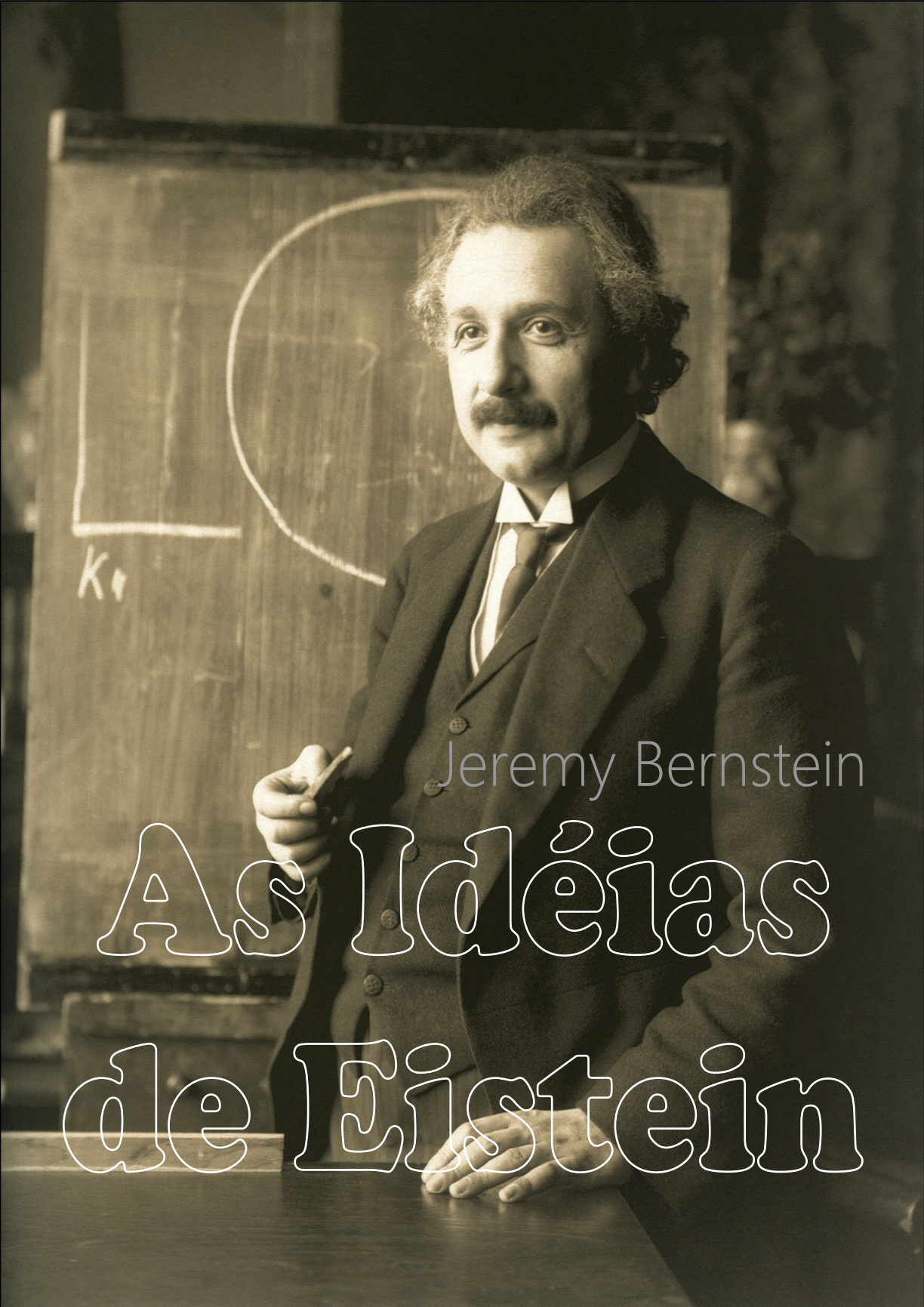




Jeremy Bernstein

As Idéias de Einstein

ATENÇÃO:

Este livro encontra-se esgotado, razão pela qual esta versão em PDF fica à disposição dos leitores, gratuitamente, sendo vedado seu uso comercial.

As Idéias de Einstein

Jeremy Bernstein

Editora Cultrix
Editora da Universidade de São Paulo
1975

“Não sei o que você quer dizer”, ponderou Alice.
“Claro que não sabe”, redarguiu o Chapeleiro, balançando desdenhosamente a cabeça. “Ouso afirmar que você jamais falou com o Tempo!”
“Talvez não”, replicou Alice cautelosamente, “mas sei que tenho de vencer o tempo, quando aprendo música”.
“Ah! aí está”, disse o Chapeleiro. “Ele não gosta de ser vencido. Se você se mantivesse em bons termos com o Tempo, ele obrigaria o relógio a fazer quase tudo que você desejasse. Suponha, por exemplo, que fossem nove horas da manhã, hora de começar a estudar; bastaria que você sussurrasse uma insinuação ao Tempo e o relógio avançaria num piscar de olhos. Treze e trinta: hora de refeição”.
“Como eu queria que fosse”, disse a Lebre Maluca a si mesma, em um murmúrio.

LEWIS CARROLL, *Alice's Adventures in Wonderland*, 1896.

Não creio que haja homem vivo capaz de afirmar com lealdade que pode conceber o tempo como função da velocidade ou que se disponha ao risco de defender a convicção de que o seu “presente” é o futuro de outro homem ou o “passado” de outro homem.

W. F. MAGIE, *Presidential Address to the American Association for the Advancement of Science*, 1911.

Concluímos, conseqüentemente, que, no equador, um relógio de pêndulo deve funcionar de maneira ligeiramente mais lenta que um relógio exatamente igual colocado em um dos pólos, caso permaneçam idênticas as demais condições.

ALBERT EINSTEIN, *On the Electrodynamics of Moving Bodies*, 1905.

PREFÁCIO

i. O homem e a obra	- 7 -
ii. Plano do livro	- 13 -
1. A Teoria da Relatividade	- 15 -
i. Primeiros anos.....	- 15 -
ii. Física Clássica.....	- 22 -
iii. Digressão a propósito do experimento Michelson-Morley	- 40 -
iv. Einstein e a relatividade do tempo	- 44 -
2. Relatividade, gravitação e cosmologia	- 53 -
v. Einstein quando era jovem	- 53 -
vi. Lorentz e Poincaré.....	- 60 -
vii. $E = mc^2$	- 68 -
viii. O espaço-tempo de quatro dimensões	- 77 -
ix. O princípio de Mach	- 83 -
x. A primeira guerra mundial e a deflexão da luz	- 98 -
xi. Geometria e cosmologia	- 103 -
3. A teoria quântica	- 112 -
xii. Preâmbulo: Einstein e Newton	- 112 -
xiii. O movimento Browniano	- 120 -
xiv. O Quantum	- 130 -
xv. Os anos intermediários	- 141 -
xvi. Os dados de Deus	- 146 -
xvii. O urânio e a rainha dos belgas	- 149 -
Principais obras de Einstein	- 156 -

PREFÁCIO

i. O homem e a obra

As amizades dão lugar a muitos incidentes e muitas ironias. Na vida de Einstein, foi o incidente de sua amizade com Albert e Elizabeth, rei e rainha dos belgas, que levou, de irônica maneira, aquele homem, amantíssimo da paz, a ligar-se à bomba atômica e ao surgimento da era nuclear.

A amizade entre Albert Einstein e Albert e Elizabeth, rei e rainha dos belgas, que se iniciou em 1927 e durou até a morte de Einstein, em 1955, tornou-se possível devido aos Congressos Solvay, que eram realizados em Bruxelas. Ernest Solvay, químico-industrial belga, que havia feito fortuna graças a um novo processo de fabricação de carbonato de sódio, tinha, como passatempo, o cultivo da Física e, em 1911, concebeu a idéia de, a suas expensas, reunir os mais eminentes físicos europeus para ouvir-lhes o parecer acerca de opiniões que tinha. Entregou a organização do congresso a seu amigo Walther Nernst, que ensinava em Berlim e era químico-físico de projeção. Ao tempo em que se distribuíram os convites para o primeiro Congresso Solvay, em 1911, Nernst havia conseguido ver ampliado o escopo da reunião, transformada em local de debate em torno dos problemas fundamentais da Física. O Congresso Solvay de 1911, que reuniu figuras do porte de H. A. Lorentz, Max Planck, Madame Curie, Ernest Rutherford e Einstein, constituiu-se em grande êxito e erigiu-se em organização que dura até nossos dias e atua periodicamente.

Foram essas reuniões que proporcionaram a Einstein a oportunidade de aprofundar a amizade com o par real belga, a que ele se referia usando a expressão “os reis”, como se se tratasse de um nome de família; à altura do Congresso Solvay de 1930, a amizade era suficientemente estreita para que Einstein os procurasse quando tinha tempo livre. Tal como ele escreveu à sua mulher Elsa:

Fui à estação... para telefonar aos reis. Foi aborrecido porque a linha estava sempre ocupada... As três horas, eu os procurei e fui recebido com tocante cordialidade. São pessoas de bondade e afabilidade raramente encontradas. Conversamos durante uma hora mais ou menos. Depois, chegou uma musicista inglesa e tocamos em quartetos e trios (uma dama de companhia, também musicista, estava presente). Assim passamos alegremente várias horas. Com o tempo, todos se retiraram e apenas eu fiquei para jantar com os reis — ao estilo vegetariano, sem criados. Espinafre, ovos quentes, batatas e nada mais.

(Não tinha sido previsto que eu ficaria.) Gostei muito e estou certo de que eles também gostaram.

Na primavera de 1933, Einstein se havia refugiado na estação balneária belga de Le Coq-sur-Mer. Sua casa de verão, nas cercanias de Berlim, havia sido saqueada pela Gestapo e seus bens confiscados, sob o pretexto de que iriam ser usados para financiar uma “rebelião comunista”. Alguns dos trabalhos de Einstein acerca da relatividade tinham sido queimados publicamente, na praça fronteira à ópera de Berlim, e Einstein se demitira da Academia Prussiana de Ciências, para a qual se vira eleito em 1913. Corriam boatos de que se tramava o assassinio de Einstein e tais boatos foram tomados a sério, a ponto de o governo belga fornecer-lhe guardacostas. Philipp Frank, que sucedeu a Einstein em Praga, retornando de uma viagem a Londres e tendo ouvido dizer que Einstein se encontrava na Bélgica, veio a localizá-lo, graças a indagações que fez na região, muito embora os habitantes de Le Coq houvessem recebido ordem de não prestar nenhuma informação a propósito de seu paradeiro. “O próprio Einstein”, escreveu o professor Frank, mais tarde, “muito se divertiu com a falha das medidas que a polícia adotara para sua segurança”.

Ao fim do verão de 1933, Einstein deixou a Bélgica, dirigindo-se aos Estados Unidos da América, onde chegou a 17 de outubro. Nunca voltaria à Europa. Havia aceito um cargo no recém-fundado Institute for Advanced Study, em Princeton — foi, em verdade, o primeiro professor da instituição. Abraham Flexner, primeiro diretor do Instituto, tivera a idéia de criar um centro onde jovens homens de ciência pudessem ter contato informal com um pequeno grupo de eminentes membros permanentes. Não haveria rígida programação de aulas, nem o Instituto outorgaria diplomas. Flexner empenhou-se em evitar, tanto quanto possível, que os membros permanentes tivessem preocupações financeiras. (Einstein julgou que seria razoável um salário anual de 3.000 dólares, elevado, por Flexner, para 16.000.) Decidiu este, ainda, que os primeiros membros seriam especialistas em Matemática e Física matemática, pois o trabalho nesses campos requeria apoio técnico pouco dispendioso — no máximo, uma pequena biblioteca — e as disciplinas eram fundamentais, além do que haveria concordância quase unânime em torno dos nomes de real projeção naquelas matérias. A fundação da entidade, em 1930, coincidiu com a ascensão de Hitler e isso tornou mais fácil para Flexner conseguir o concurso de Einstein e de alguns dentre os maiores matemáticos europeus, tais como Hermann Weyl e John von Neumann — a par do matemático norte-americano Oswald Veblen.

Em 1933, Einstein mudou-se para uma casa alugada em Princeton, distante cerca de um quilômetro do atual Fuld Hall desse Instituto, onde ele teve escritório a partir de 1940. No ano de 1935, Einstein passou a ocupar a modesta casa de Mercer Street 112, onde viveu e trabalhou até a

morte. (A casa, agora pertencente a Margot Einstein, enteada de Einstein, é partilhada por Helen Dukas, que foi secretária de Einstein desde 1928. Elsa Einstein, mãe de Margot e segunda mulher de Einstein, faleceu em 1936.) A casa foi arranjada de forma tal que Einstein dispunha de pequeno apartamento no andar superior, onde podia encerrar-se e trabalhar. O apartamento conserva muito do aspecto que tinha durante a vida de Einstein e a diferença, segundo a senhorita Dukas, é que existem, agora, algumas plantas mais. A sala de estudos, que se comunica diretamente com o quarto de dormir, contém algumas cadeiras de encosto rígido e a mesa de trabalho. Há uma grande janela dando para o jardim. Contra as paredes, há estantes de livros, uma das quais guarda a coleção de discos de Einstein. Não era ele um leitor onívoro. Seus gostos literários pendiam para os romancistas russos, como Dostoievski e Tolstoi. Admirava Gandhi e, em voz alta, leu para a família a biografia do hindu, bem como obras de Heródoto e o *Golden Bough* de Frazer. A maior parte dos livros, escritos em todas as línguas imagináveis, lhe era mandada por pessoas desejosas de que ele os lesse. Quase nunca lia livros que dele próprio falassem. Há uns poucos quadros e águas-fortes nas paredes, um desenho representando Gandhi e retratos da mãe e da única irmã de Einstein, Maja, que se mudou da Itália para Princeton em 1939 e ali viveu até a morte, em 1951. Einstein trouxe da Europa águas-fortes que retratam os três físicos por ele mais admirados — Michael Faraday, James Clerk Maxwell e, naturalmente, Newton. As águas-fortes de Faraday e Maxwell ainda se encontram nas mesmas condições de antes, mas a de Newton perdeu a moldura e foi substituída por um exemplar de arte moderna abstrata. Esses quadros, aliados à total simplicidade do restante, conferem ao apartamento um ar de recolhimento e serenidade. Como observou a senhorita Dukas, “Ele não apreciava enfeites”.

Quando chegou a Princeton, em 1933, Einstein tinha cinqüenta e quatro anos de idade e, conquanto haja continuado a trabalhar intensamente no campo da Física, procede dizer que sua grande obra, a obra que criou a Física moderna, já fora realizada. Enquanto envelhecia, fazia-se mais solitário, tanto em sua vida pessoal, como no caminho que escolhera trilhar na esfera da Física. O aspecto exterior de seu comportamento pouco variou de ano para ano. Durante o período letivo — de outubro a abril — freqüentava diariamente o escritório que tinha no Instituto, ali permanecendo por umas poucas horas — e assim procedeu mesmo após a aposentadoria, em 1945. Jamais teve automóvel — não há entrada para carro em Mercer Street 112 — e mesmo após os setenta anos, fosse o tempo qual fosse, cobria a pé o trajeto de ida ou o trajeto de volta, da casa para o Instituto ou do Instituto para casa (e o ônibus da instituição o transportava na outra parte do percurso). Durante os meses de verão, procurava, com freqüência, o mar, para dar vazão a sua grande paixão pelos barcos. Dispunha de vários assistentes, mas seu contato com professores de Física —

no Instituto e na Universidade — bem como com a comunidade de Princeton, era muito restrito. E isso correspondia, em grande parte, aos desejos de Einstein. Ele nunca se ligou intimamente a qualquer instituição, país ou pessoa, nem mesmo a membros de sua família. Tinha grande prazer na companhia de determinadas pessoas e manteve grande e contínua correspondência com as mais diferentes pessoas, mas sempre se pôde sentir que seu pensamento e mesmo o seu ser estavam alhures. Ele se dava conta disso e do paradoxo de sua absoluta necessidade de solidão produzir sensação de isolamento. Tinha também consciência, é claro, de sua celebridade, que constatava, mas não desejava, nem compreendia. Em setembro de 1952, escreveu a um amigo: “De minha parte, sempre me inclinei para o viver isolado, traço que habitualmente se torna mais acentuado com os anos. Surpreende ser tão amplamente conhecido e, apesar disso, tão solitário. O fato é que o tipo de popularidade de que gozo leva a pessoa a uma atitude defensiva, que a conduz ao isolamento”.

Nos vinte e dois anos que viveu em Princeton, Einstein manteve contínua correspondência com a rainha Elizabeth, da Bélgica. Nas cartas — algumas estão entre os mais belos escritos de Einstein — encontra-se referência à maioria dos assuntos pessoais e sociais que o preocuparam nos últimos anos de vida. Essas cartas começam um mês depois da chegada de Einstein a Princeton, em 1933, e cessam um mês antes de sua morte, em 1955. Eis alguma delas:

20 de novembro de 1933

Prezada Rainha

Há muito deveria eu ter-lhe escrito e, por certo, o teria feito, não fosse a senhora uma rainha. Não percebo claramente por que esse fato constitui um obstáculo. Contudo, problemas dessa ordem dizem mais respeito ao campo do psicólogo. A maioria de nós prefere olhar para fora e não para dentro de si próprio; e isso porque, na última hipótese, vê apenas uma cavidade sombria, ou seja, absolutamente nada.

Desde que deixei a Bélgica, tenho sido alvo, direta e indiretamente, de muitas atenções. Tanto quanto possível, tenho observado o sábio conselho dos que me recomendavam manter silêncio quanto a questões políticas e negócios públicos — e isso não devido ao fato de recear por mim, mas devido ao fato de não enxergar oportunidade de fazer bem... Princeton é um lugarzinho agradável, cidadezinha exótica e formal de insignificantes semideuses de pernas de pau. Não obstante, ignorando certas convenções sociais, pude criar, para mim, uma atmosfera favorável ao estudo e à margem de distrações. Aqui, as pessoas que compõem a chamada “sociedade” gozam de liberdade a-

inda menor que a de seus correspondentes na Europa. Aparentemente, não se dão conta dessa restrição, pois a maneira de vida adotada tende a inibir, desde a infância, o desenvolvimento da personalidade. Se a civilização entrasse em colapso na Europa, a desolação intelectual resultante seria tão profunda como a que se seguiu ao colapso da Grécia. Trágica ironia é que a mais importante qualidade, responsável pelo encanto e valor singulares da civilização européia — a auto-afirmação individual e dos vários grupos nacionalistas — pode conduzir à discórdia e à decadência.

No dia 17 de fevereiro de 1934, o rei Albert perdeu a vida em um acidente de alpinismo, sendo sucedido por seu filho, Leopoldo III. Einstein soube que a agora rainha-mãe encontrava alívio e consolação na arte e, em 16 de fevereiro de 1935, escreveu-lhe:

... Entre meus amigos europeus, sou conhecido como “o grande rosto de pedra” (*der grosse Schweiger* — toda correspondência de Einstein com Elizabeth e, em essência, tudo que escreveu está redigido em alemão), cognome que mereço por ter permanecido tão completamente silencioso. Os sombrios e dolorosos acontecimentos que se registram na Europa me afetaram a tal ponto que não parece possível que de minha pena voltem a sair palavras de feição pessoal. Encerrei-me em problemas científicos insolúveis — tanto mais que, envelhecido, tenho permanecido à margem da sociedade local.

E, fazendo referência aos trabalhos da rainha no campo artístico, prossegue:

Conheço, por meus próprios esforços no terreno da ciência, o efeito que esse tipo de trabalho tem sobre nós. Tensão e fadiga sucedem-se uma à outra, qual se dá quando alguém busca pertinazmente escalar montanha, sem ter como alcançar-lhe o pico. Preocupação intensa com coisas diferentes das coisas humanas torna a pessoa independente das vicissitudes do destino; é uma disciplina cruel que nos recorda continuamente a insuficiência de nossas capacidades.

Por vezes, lembro, com nostalgia, horas felizes do passado e sinto a tentação de visitar a Europa; tantos são, porém, os encargos que aí pesariam sobre mim que me parece impossível encontrar coragem para concretizar esse projeto.

Por volta de 1939, o destino da Europa e, acima de tudo, o de seus camaradas judeus oprimia tanto Einstein que ele não mais pôde escapar

para os recessos íntimos de seu trabalho. Embora tivesse sido um pacifista durante toda a vida, concluíra ele, em fins da década de 1930, que a resistência armada era o único modo de fazer frente a Hitler e que os Estados Unidos da América, a despeito da tradição isolacionista, seriam inevitavelmente conduzidos à guerra e deveriam começar a preparar-se. A um congresso pacifista, reunido em Nova Iorque, escreveu Einstein, aos 5 de abril de 1938:

Muitos norte-americanos, mesmo os pacifistas, estão pensando e dizendo: deixemos a Europa tombar, pois ela não merece melhor destino; permaneçamos alheios, sem qualquer participação. Creio que essa atitude é não somente indigna dos norte-americanos, como é também míope. É indigno de uma grande nação permanecer impassível enquanto pequenos países de grande cultura estão sendo destruídos com cínico desprezo pela justiça. Tal atitude é míope, até mesmo do ponto de vista de um auto-interesse esclarecido. O triunfo do bárbaro e do desumano só pode provocar, no mundo, situação que forçará a América do Norte a lutar e a forçará a lutar em condições muito mais desfavoráveis do que a maioria das pessoas hoje imagina.

No dia 9 de janeiro de 1939, Einstein escreveu à rainha Elizabeth, pedindo-lhe ajuda em favor de um primo idoso que se encontrava na Alemanha e desejava emigrar para a Bélgica; e acrescentou:

Tenho estado tão perturbado que não posso escrever com boa disposição. O declínio moral que nos vemos compelidos a testemunhar e o sofrimento que ele engendra são tão opressivos que não podemos ignorá-los nem sequer por um momento. Por mais profundamente que se mergulhe no trabalho, persiste opressante sensação de tragédia inevitável.

Não obstante, há momentos em que nos damos por livres da identificação com as limitações e insuficiências humanas. Nesses momentos, imaginamos estar em algum local de um pequeno planeta, contemplando, maravilhados, a beleza fria, mas fundamente tocante, do eterno, do insondável: a vida e a morte fazem-se uma e não há evolução, nem destino — é o puro ser.

Foi frutífero o trabalho no ano passado. Encontrei caminho promissor, que sigo penosa, mas inflexivelmente, em companhia de alguns jovens colaboradores. Se o caminho me conduzirá à verdade ou à falácia é algo que talvez eu não possa definir com certeza nos poucos anos que me restam. Sou, po-

rém, grato ao destino, que fez de minha vida uma experiência excitante, de sorte que a existência parece revestir-se de sentido.

No verão seguinte, Einstein foi a Peconic, Long Island, onde passou de barco e executou música de câmara com vizinhos. No dia 12 de agosto de 1939, escreveu a Elizabeth:

Não fossem os jornais e as inúmeras cartas e eu dificilmente me daria conta de que vivo num tempo em que o desajustamento e a crueldade humanos atingem proporções assustadoras. Talvez que algum dia a solidão venha a ser adequadamente reconhecida e apreciada como mestra da personalidade. Há muito que os orientais o sabem. O indivíduo que teve experiência da solidão não se torna vítima fácil da sugestão das massas.

E foi em sua casa de verão, em Old Grove Road, nas proximidades de Peconic, que Einstein assinou carta dirigida a Franklin Roosevelt, prevenindo-o das implicações trazidas pelo descobrimento da fissão nuclear. Essa carta, escrita no dia 2 de agosto, exatamente dez dias antes da carta endereçada a Elizabeth, marcou, sob muitos aspectos, o início solene da Era Nuclear.

Nenhum romancista seria capaz de imaginar confluência de circunstâncias mais inesperadas que as que levaram do nascimento de Einstein, no dia 14 de março de 1879, na cidade alemã de Ulm, até Peconic e a carta a Roosevelt; nem seria capaz de imaginar personagem de quem menos se pudesse esperar tal carta. Acompanhando os passos que conduziram de Ulm a Peconic, somos convidados a rever o processo de criação de praticamente toda a Física do século XX, pois, em quase todas as dobras desse caminho, sente-se a mão segura e orientadora de Einstein.

ii. Plano do livro

Embora atualmente se tenha tornado comum deplorar o papel desempenhado pela ciência e pela tecnologia na vida moderna, tem ocorrido nada menos que — tomada como evidência a publicação de novos livros — um ressurgimento de interesse em torno da vida e personalidade de Albert Einstein. Na medida em que esse interesse se faz preocupação por compreender o que Einstein acrescentou ao pensamento moderno, constitui, a meu ver, sinal positivo. É, com efeito, muito possível que as gerações futuras se refiram à primeira metade do século XX chamando-lhe Idade de Einstein — assim como os historiadores consideram a segunda metade do século XVII como a Idade de Newton. No caso de Newton, já dispomos de suficiente afastamento no tempo para perceber como seu pensamento penetrou todos os aspectos da vida intelectual de seus pósteros — desde o

campo da arte até o da filosofia e da política — durante um período de cem anos. Não se passou ainda um quarto de século a partir da morte de Einstein, em 1955, de sorte que é demasiado cedo para apreciar o impacto total de sua obra, não obstante se possa antecipar qual será essa apreciação. Irônico é que a obra de Einstein só seja compreendida por pequena porção das pessoas cuja vida e feição intelectual vêm sendo, freqüentes vezes de maneira inadvertida, influenciadas por ele.

É impossível, em estudo breve como o presente ou — na verdade — em qualquer estudo de cunho popular, esclarecer toda a riqueza da contribuição de Einstein para a ciência e o pensamento moderno. Cabe esperar que se deixe claro ao menos o sentido dessa obra e uma idéia acerca do homem que a criou, despertando, assim, no leitor, curiosidade por aprofundar-se no assunto ou, pelo menos, sentimento de simpatia pelos cientistas profissionais que devotam a vida a aprofundá-lo. Guiando-me por esse roteiro, estruturei este livro de maneira que se afasta da convencional. Em vez de acompanhar cronologicamente a vida e a obra de Einstein, fiz o livro girar em torno de três temas básicos a que se dedicou Einstein: teoria especial da relatividade; teoria geral da relatividade e gravitação; teoria quântica. Estendendo-se pelas três partes fundamentais do livro, o leitor encontrará o que acredito seja um coerente estudo biográfico. Espero que essa estrutura conduza o leitor a penetrar mais e mais profundamente na obra de Einstein e a mais e mais profundamente compreender as criações do homem — na medida em que eu próprio me sinto capaz de compreendê-las.

Estou em débito com muitas pessoas pelo auxílio que me deram para o preparo deste livro. Meu débito maior é para com o professor Philipp, falecido em 1966, aos oitenta e dois anos. Como o leitor verá, muitas das referências que se contêm nas páginas seguintes foram colhidas no livro de Frank, *Einstein: His Life and Times*, e boa parte do material anedótico incluído neste volume foi-me transmitido pelo mesmo professor, durante a década de 1950, quando nos encontrávamos freqüentemente. Muito lamento que, durante a maior parte desse período, eu me haja sentido demasiado acanhado para propor-lhe as numerosas indagações que me ocorriam enquanto redigia este livro. Gostaria, a par disso, de expressar agradecimentos a meus colegas, especialistas em Física, professores M. A. B. Beg, F. J. Dyson, G. Feinberg, G. Holton, M. J. Klein, A. Miller, A. Pais, S. Chandrasekhar, V. Singh e J. C. Taylor, por haverem lido e criticado partes do original, por me haverem fornecido material complementar e me haverem encorajado. Manifesto agradecimento à senhorita Helen Dukas, por haver lido o original e por me haver proporcionado uma visita à casa de Einstein, em Princeton; e à senhorita Elizabete Sifton, da Viking Press, por valiosos conselhos relativos à composição deste livro.

J. B.

1. A Teoria da Relatividade

i. Primeiros anos

Na história da família de Einstein, não se registrou caso anterior de qualquer particular realização de alcance intelectual ou científico. Tanto quanto ao próprio Einstein foi possível remontar na linhagem paterna ou materna, a família sempre reuniu comerciantes e artesãos característicos de estirpe judaica alemã e, em mais amplos termos, européia. O pai de Einstein, Hermann, foi um homem de negócios despreocupado e não muito bem sucedido. Quando Einstein tinha um ano de idade, o pai transferiu a família de Ulm para Munique, onde começou a trabalhar com um irmão, com o qual partilhava uma “casa dupla”. O irmão tinha algum conhecimento de engenharia e cuidava dos aspectos técnicos da empresa — uma fábrica de material elétrico. De sua mãe, Einstein herdou gosto por música clássica. Ela tocava piano e Einstein, aos seis anos, começou a acompanhar lições de violino. O Einstein menino não mostrou sinal de qualquer precocidade. Era uma criança sonhadora, que não apreciava esportes e jogos, que falava com alguma dificuldade (seus pais temeram que ele fosse anormal, pois só aos três anos pôde falar) e sua ama o chamava Pater Langweil — “papai amolante”. Um ano após a mudança da família para Munique, nasceu a irmã de Einstein, Maja. Os Einsteins não tiveram outros filhos.

Talvez porque sua infância haja sido solitária e introspectiva, Einstein, aparentemente, dela guardou, durante toda a vida, memória singularmente nítida. De maneira muito concreta, cabe dizer que lhe surgiram na infância os pressentimentos acerca da misteriosa ordem que parece esconder-se por trás do aparente caos dos acontecimentos naturais — a descoberta de que a natureza parece apresentar-se em termos de uma charada matemática, suscetível de admitir soluções surpreendentemente simples e elegantes. Com pouco mais de quarenta anos, em conversa com o crítico literário berlinense Alexander Moszkowski (debatendo as crenças religiosas de Newton), Einstein observou:

Em todo verdadeiro pesquisador da natureza mora uma espécie de reverência religiosa, pois ele se dá conta de que é impossível imaginar-se como sendo o primeiro a ter consciência da trama incomparavelmente delicada que une suas percepções. A manifestação de conhecimento que não havia ainda sido posta a nu produz no investigador sensação semelhante à

surgida na criança que procura alcançar o nível de domínio com que os adultos manipulam as coisas.

Embora sempre se haja mostrado agnóstico no que respeita a qualquer crença em um Deus preocupado com a orientação do destino humano, Einstein, ao longo de sua vida, fez referências constantes e penetradas de simpatia a Deus, a quem ele freqüentemente chamava “O Velho”. Neste sentido, “Deus” correspondia às conexões racionais, às leis que governam o comportamento do universo — tanto por tais leis parecerem existir, como pelo fato de se mostrarem, pelo menos até certo ponto, acessíveis à nossa compreensão. No ano de 1940, em um ensaio escrito para uma conferência a propósito de filosofia, ciência e religião, Einstein expressou seus sentimentos nos termos seguintes:

A principal fonte dos atuais conflitos entre as esferas da religião e da ciência está na concepção que se faz de um Deus pessoal. É objetivo da ciência estabelecer regras gerais que determinem as relações recíprocas dos objetos, no tempo e no espaço... É, acima de tudo, um programa e a confiança na possibilidade de, em princípio, concretizá-lo está fundada apenas no êxito parcial. Mas dificilmente se poderia encontrar alguém que negasse esses êxitos parciais e os atribuísse a uma auto-ilusão humana.

Quanto mais um homem percebe a ordenada regularidade de todos os acontecimentos, mais firme se faz sua convicção de que essa ordenada regularidade não admite causas de uma natureza diversa. Para aquele homem, nem a regra do humano nem a regra do divino subsistirão como causa independente de acontecimentos naturais. Certo é que a doutrina de um Deus pessoal a interferir nos acontecimentos naturais nunca poderia ser refutada positivamente pela ciência, pois que a doutrina sempre teria como encontrar refúgio em terrenos onde o conhecimento científico ainda não penetrou.

Situa-se na esfera religiosa a convicção de que os preceitos reguladores do mundo da existência são racionais, isto é, permeáveis á razão. Não posso imaginar que um cientista verdadeiro deixe de partilhar dessa profunda convicção. A situação pode traduzir-se em uma imagem: é aleijada a ciência que prescinde da religião e a religião sem a ciência é cega.

As duas mais vívidas impressões de caráter científico por Einstein conservadas de sua infância foram a descoberta do comportamento da bússola — o fato de que, por misteriosa atração, a agulha sempre apontava para determinado ponto — e, algum tempo depois, a apreensão do teore-

ma de Pitágoras, dentro do campo da geometria euclidiana. Essas duas revelações são ilustrações quase perfeitas de aspectos complementares dos fenômenos científicos. O comportamento do ponteiro da bússola é um fato empírico surpreendente, que se poderia tomar, querendo, como prova de existência de mágica. Faz-se necessária longa tradição de experiência científica para chegar a imaginar que tal fenômeno possa admitir uma explicação ou — se preferirmos expressão menos pesada que “explicação” — uma descrição em termos de leis físicas aplicáveis a casos gerais. De outra parte, as verdades da geometria euclidiana aparecem de maneira como que auto-evidente e exige-se também longa tradição de experiência científica para descobrir como se acomodam elas ao tipo de fenômeno empírico ilustrado pela bússola. Seja como for, Einstein, ao longo de toda a sua vida, fez referência à impressão “de maravilha” que a bússola nele produziu. Aos sessenta e sete anos, tentou explicar a gênese de suas concepções científicas:

Impressão de um assombro desse tipo experimentei eu, sendo criança de uns quatro ou cinco anos, quando meu pai me mostrou uma bússola. O fato de aquele ponteiro comportar-se de maneira tão determinada não se casava com a natureza dos acontecimentos possíveis de se localizarem no mundo inconsciente dos conceitos (efeito relacionado com o “contacto direto”). Lembro — ou, pelo menos, creio lembrar — que essa experiência produziu em mim uma impressão profunda e duradoura. Devia existir algo oculto por detrás das coisas. O que a pessoa vê desde sempre não causa impressão desse tipo: ela não se preocupa com a queda dos corpos, com o vento ou com a chuva, com a lua ou com o fato de a lua não tombar, nem com as diferenças entre matéria viva e não-viva.

Tanto na escola primária, como no Gymnasium Luitpold, em Munique, Einstein recebeu alguns ensinamentos religiosos formais. Era o único aluno judeu de uma escola católica de nível elementar e ali recebeu e, em verdade, com agrado, a mesma instrução religiosa proporcionada aos demais estudantes. Não experimentou sensação de anti-semitismo e não mostrava particular apego aos rituais judaicos. Sua família mantinha-se inteiramente alheia a práticas religiosas, embora conservasse uma versão própria do antigo costume do Sabbath — convidar um judeu pobre para partilhar de refeição. No caso dos Einsteins, isso ocorria às quintas-feiras à noite, quando a família tinha à mesa um estudante pobre, judeu originário da Rússia. Esse estudante, Max Talmey, forneceu ao jovem Einstein alguns livros de ciência popular, avidamente lidos. Ao mesmo tempo e como era habitual na época, Einstein começou a receber, no ginásio, em Munique, lições especiais acerca do Velho Testamento. Durante algum

tempo e com algum agrado para a família, Einstein passou a ter, da Bíblia, concepções quase fundamentalistas. Logo, entretanto, essas concepções se chocaram com os estudos de caráter científico. Einstein escreveu, em seu “necrológio”:

Através da leitura de livros de divulgação científica, logo me convenci de que muitas narrações da Bíblia não podiam ser verdadeiras. A consequência foi (uma orgia de) livre pensamento, marcado pelo fanatismo e associado à impressão de que o Estado, por meio de mentiras, iludia deliberadamente a juventude — impressão esmagadora. Dessa experiência resultou suspeita contra todo tipo de autoridade, atitude cética relativamente às convicções admitidas em qualquer ambiente social — impressão que nunca me abandonou, apesar de ter perdido, posteriormente, parte de sua agudeza original, em razão de eu melhor compreender suas conexões causais.

Por essa época, o tio engenheiro começou a dar a Einstein lições ocasionais de álgebra e geometria. Entre outras coisas, ensinou-lhe o teorema de Pitágoras que, depois de muito esforço, Einstein conseguiu demonstrar. Não obstante, só chegou a perceber a intrincada estrutura lógica da geometria euclidiana depois que o tio o presenteou com um manual relativo à matéria.

Aos doze anos de idade, experimentei uma segunda sensação de assombro, de natureza inteiramente diversa — deveu-se a um livrinho de geometria euclidiana plana, que me veio às mãos no começo de um ano letivo. Ali figuravam asserções como, por exemplo, as referentes às intersecções das três alturas de um triângulo em determinado ponto, que — embora de modo algum evidentes — podiam ser demonstradas com tal segurança que se colocavam para além de qualquer dúvida. Essa clareza e certeza causaram-me uma sensação indescritível. E não me perturbou o fato de o axioma ter de ser aceito sem prova. Bastava-me poder construir demonstrações a partir de proposições cuja validade não parecia discutível. Lembro que um tio me falou do teorema de Pitágoras, antes que o sagrado livrinho me caísse nas mãos. Depois de muito esforço, consegui “demonstrar” o teorema com base na similaridade de triângulos; ao fazê-lo, pareceu-me “evidente” que as relações entre os lados dos triângulos retângulos estariam completamente determinadas por um dos ângulos agudos. Só o que não se apresentava como igualmente evidente parecia-me exigir demonstração. Os objetos com que lida a geometria não se afiguravam di-

ferentes dos objetos da percepção sensorial, “que podem ser vistos e tocados”. Essa primitiva idéia — provavelmente presente na base da conhecida problemática levantada por Kant relativamente à possibilidade de “juízos sintéticos a priori” — apoiava-se, obviamente, no fato de que a relação dos conceitos geométricos para com os objetos da experiência direta (barras rígidas, intervalo finito, etc.) estava, inconscientemente, em mim.

Nessa passagem, Einstein alude ao segundo elemento da experiência científica, atrás mencionado: a relação entre o que se poderia chamar “verdades matemáticas” e as “verdades físicas” reveladas pelo exame dos fenômenos. Teremos ocasião de voltar a este ponto, em pormenor, quando apreciarmos a teoria “geral” da relatividade e a interpretação geométrica por ela proposta para o fenômeno da “gravidade”. É apropriado, a esta altura, um comentário acerca da significação da palavra “paradoxo”, pois freqüentemente se diz que é “paradoxal” a teoria da relatividade. Em lógica ou em matemática pura, um paradoxo equivale, essencialmente, a uma incoerência. Pretende significar que dada proposição não decorre, de maneira coerente, de um conjunto de axiomas e normalmente indica haver sido cometido um erro no processo de dedução lógica. Significa, por vezes, que não decorre de um conjunto de axiomas a conclusão que, intuitivamente, se imagina que dele deveria decorrer. Por outro lado, é difícil perceber qual seria a significação de paradoxo no campo da Física experimental. Se correto, o resultado de um experimento não corresponde a um paradoxo, mas a um fato. Contudo, alguns fatos, quando recém-descobertos, parecem contradizer o sentido intuitivo que se tem a propósito de como deveria ser o mundo. Conseqüentemente, ao dizer-se paradoxal a teoria da relatividade, quer-se dizer, as mais das vezes, que, a propósito do mundo, ela prediz coisas que divergem do que se imagina que o mundo ou a natureza deveriam oferecer. O ponto importante não é, entretanto, o de as previsões se adequarem às intuições — ponto que é falível — mas o de as previsões serem corretas, conduzindo a resultados suscetíveis de ensaio experimental e de comprovação através de ensaio desse tipo. Einstein diria — e, em verdade, disse — que pintar da situação esse quadro equivale a supersimplificá-la. Essa imagem esquece o fato de os princípios gerais da teoria física serem, na expressão de Einstein, “livres criações do espírito humano”. Apresentar, de forma rigorosa, essa noção é muito difícil — talvez seja impossível. E isso devido à circunstância de que os fenômenos não determinam, de maneira unívoca, a teoria. Várias teorias podem apresentar razoável concordância com a experiência. O que o cientista espera, o que ele presume e em que encontra motivação para o trabalho é a existência de uma teoria ou de teorias cuja harmonia interna e impositiva natureza de pressupostos permita melhor compreensão do

operar do universo — conduza, no dizer de Einstein, “para mais próximo dos segredos do Velho” — do que seria permitido por um simples catálogo de fatos observados. Teorias desse tipo só podem ser formuladas em termos de conceitos, que se prendem aos fatos observados através de longas cadeias de argumentos dedutivos; e porque esses conceitos são, até certo ponto, “livres criações do espírito humano”, ocorre, em certa medida, que impomos as formulações de nosso espírito aos processos da natureza. Tão freqüentemente fazemos experimentos que se conformem a nossas descrições da natureza quanto procedemos de modo oposto. São questões difíceis de enunciar com precisão e, tradicionalmente, as concepções dos cientistas têm-se estendido desde a do físico austríaco Ernst Mach (que, veremos, desempenhou importante papel no desenvolvimento intelectual de Einstein) para quem as teorias eram simplesmente descrições sintéticas do fato observado, até a do astrônomo inglês Sir Arthur Eddington, que escreveu: “Descobrimos estranha pegada nas praias do desconhecido. Concebemos, uma após outra, profundas teorias para explicar a origem daquele sinal. E conseguimos, por fim, reconstruir a entidade que o imprimiu. E eis que fomos nós próprios”.

A não ser pelo trabalho que pôde executar por iniciativa própria, Einstein detestou o Gymnasium. Desprezava o ensino maquinal e certa vez observou: “Os professores da escola primária pareciam-me sargentos e os do Gymnasium, tenentes”. Aos quinze anos de idade, sua vida sofreu alteração radical, pois os negócios paternos fracassaram e a família se transferiu para Milão, Itália. Einstein foi deixado em Munique, com outra família, para continuar freqüentando o Luitpold Gymnasium, mas, após seis meses, não mais suportou a escola e, como diz Phillip Frank, elaborou um plano que lhe permitiria abandonar as aulas por algum tempo. Conseguiu que um médico lhe fornecesse atestado declarando que, por motivo de uma depressão nervosa, impunha-se que ele deixasse a escola e se reunisse aos pais, na Itália. Obteve, a seguir, uma declaração do professor de matemática, afirmando que os avançados conhecimentos da matéria permitiam-lhe estudar na Universidade sem o diploma do Gymnasium.

O afastamento do ginásio foi, afinal, muito mais fácil do que ele havia antecipado. Certo dia, o professor o chamou e lhe disse ser desejável que ele deixasse a escola. Espantado com o que ocorria, o jovem Einstein perguntou de que crime era culpado. O professor respondeu: “Sua presença na classe destrói o respeito dos estudantes (por mim)”. Evidentemente, a íntima aversão de Einstein pelas constantes repetições havia-se manifestado, de alguma forma, no comportamento que adotava para com professores e colegas.

Livre do Gymnasium, Einstein juntou-se aos pais em Milão. Um de seus primeiros atos foi o de renunciar à cidadania alemã e, como não pôde

conseguir outra, permaneceu apátrida dos quinze aos vinte e um anos, o que, naquela época, não provocava problemas maiores. A semelhança de muitos outros que, antes e depois dele, abandonaram a escola secundária, Einstein decidiu empregar parte do tempo vagabundeando a pé. Diversamente da maioria dos que deixam a escola secundária, empenhou-se, sozinho, em um programa de estudo de matemática. Foi um período extraordinariamente feliz de sua vida, só interrompido quando os negócios do pai fracassaram novamente e pôs-se claro que Einstein deveria fazer algo para atender ao próprio sustento. Ao que tudo indica, o pai julgou que a carreira de engenheiro eletricitista seria adequada. Assim, decidiu-se que Einstein viajaria para Zurique, onde a Escola Politécnica Federal Suíça se constituía no mais renomado centro de estudos de ciência da Europa central — excluída a Alemanha. Tratava-se de algo que Einstein havia cogitado fazer, mesmo antes de deixar Munique; mas foi reprovado no exame de admissão para a Politécnica. Não obstante, tão bem se saiu na parte do exame relativa à matemática que o diretor da Politécnica sugeriu-lhe obtivesse diploma em uma escola cantonal suíça e voltasse a candidatar-se. Einstein matriculou-se em uma escola de Aarau, onde se adotava orientação progressista e se dava aos alunos oportunidade de trabalho independente; acima de tudo, havia ali bem equipados laboratórios que os estudantes podiam usar para, por si mesmos, aprenderem ciência. Após um ano, Einstein voltou a candidatar-se à Politécnica e, portador de um diploma, foi aceito, sem outro exame. Em Zurique, aos dezesseis anos, Einstein decidiu abandonar o estudo da Matemática pura — a que se vinha entregando por iniciativa própria — e dedicar-se à Física. Em seu “necrológio”, esclarece o motivo da decisão:

Percebi que a Matemática se abria em numerosas especialidades, cada uma das quais poderia facilmente absorver a curta vida que nos é dada. Encontrei-me, conseqüentemente, na posição do asno de Buridan, incapaz de decidir-se por este ou aquele molho de feno. Tal se devia obviamente ao fato de que minha visão no campo da Matemática não era suficientemente ampla para permitir-me diferenciar, com clareza, o fundamentalmente importante, o realmente básico do restante de uma erudição mais ou menos dispensável. Além disso, meu interesse pelo conhecimento da natureza era incomparavelmente maior; e, como estudante, eu não percebia que aprofundar o conhecimento dos princípios básicos da Física está ligado aos mais intrincados métodos matemáticos. A consciência desse fato só despertou em mim gradualmente, após anos de atividade científica independente. Certo é que também a Física se divide em campos diversos, cada qual capaz de devorar toda uma curta vida de trabalho, sem satisfazer a fome de um conhecimento

mais profundo. Também aqui era esmagadora a massa de dados experimentais insuficientemente relacionados uns com os outros. Aqui, entretanto, logo aprendi a discernir o que era suscetível de conduzir aos fundamentos, afastando-me de tudo mais, de toda a multiplicidade das coisas que atravancam o espírito e o desviam do essencial.

Foi por essa altura, registra Einstein, em seu “necrológio”, que ele começou a dar-se conta de que os fundamentos da Física, fundamentos que procurava dominar — principalmente estudando os textos originais — eram fundamentos defeituosos. Fizeram-se necessários dez anos de trabalho para que Einstein, em 1905, após elaborar idéias que a seus próprios olhos aparecessem como suficientemente claras, se capacitasse para escrever o primeiro trabalho acerca de teoria da relatividade.

ii. Física Clássica (RELEITURA)

Para compreender a concepção de Einstein, devemos recordar como a ele se apresentava a Física, ao fim do século passado. Em termos amplos, dois temas principais se punham no campo da matéria: de um lado, a mecânica newtoniana e, de outro, as equações de Maxwell, que explicavam a eletricidade e o magnetismo.

A versão inicial da ciência da mecânica, embora incorreta, tivera sua origem entre os gregos e fora sistematizada por Aristóteles. Segundo essa Física antropomórfica, a matéria terrena em movimento buscava o centro do planeta, pois que este era seu objeto natural. (O movimento dos objetos materiais, bem como o das entidades conscientes, era, nos termos da Física aristotélica, disciplinado por motivos e propósitos que variavam de acordo com a composição do objeto — dependendo, por exemplo, de ele ser “terra” ou “ar”.) Conseqüentemente, quanto maior massa tivesse um objeto, mais rapidamente tombaria ele, pois que maior sua tendência de buscar o centro da Terra. A colocação do assunto reflete, naturalmente, a observação comum, segundo a qual, ao ar, uma pedra cai mais rapidamente que uma pena. A insuficiência da Física dos gregos estava em ela não dar atenção adequada ao experimento quantitativo. (Alguns autores atribuíram esse fato à estrutura da sociedade grega, onde experimentos dessa ordem teriam sido considerados atividade vil, do tipo habitualmente atribuído a criados e escravos.) Com efeito, os experimentos teriam revelado ser falsa essa noção de relação da velocidade de queda de um objeto para com sua massa. Em circunstâncias similares, uma pedra que tenha a massa de dez gramas não cai com velocidade duas vezes maior que a da pedra com massa de, cinco gramas. (A lei da queda dos corpos torna-se complexa devido à presença do ar, que causa fricção pela qual a pena é mais afetada que a pedra.) A par dos elementos — ar, terra, água e fogo — que eram, para eles, os objetos dados pela experiência comum, os gregos

postulavam uma quinta essência — a “quintessência” — de que se dizia compostos os corpos celestes. Supunha-se que esses corpos, em razão de sua especial natureza, só se movessem em órbitas circulares perfeitas, a velocidade constante — o movimento circular uniforme.

Essa cosmologia logo se pôs em conflito com as observações relativas aos movimentos dos planetas. Tal como observado da Terra, em relação às estrelas “fixas”, é assaz complexo e não tem a característica de uniforme o movimento dos planetas. Em verdade, os planetas parecem inverter periodicamente o sentido da direção em que cumprem a órbita — fenômeno do “movimento retrógrado”. Para manter o princípio do movimento circular uniforme, os astrônomos gregos de época posterior viram-se obrigados a acomodar as órbitas observadas a complicadíssimas superposições de movimentos circulares. (Um cientista moderno daria a esse processo de acomodação o nome de expansão dos movimentos orbitais observados, segundo o traduzido em uma série de Fourier; a denominação lembraria o matemático francês de inícios do século XIX, J. B. Fourier, que demonstrou a possibilidade de reduzir qualquer movimento periódico regular a uma superposição de movimentos circulares uniformes, talvez em número infinito.) Essa acomodação das órbitas dos planetas foi elaborada em pormenores pelo astrônomo Ptolomeu, que viveu no Egito no século II da era cristã. A obra por ele realizada recebeu síntese em livro a que se dá o título de *Almagesto* (o maior) e que dominou a astronomia planetária européia até a Renascença.

O grande passo seguinte foi dado pelo padre polonês Copérnico, no início do século XVI. Descobriu ele que, se alterasse o referencial utilizado para descrição dos movimentos dos planetas, de sorte que o Sol se fizesse imóvel e os planetas girassem em torno dele, seria possível simplificar a descrição de movimentos que se fazia em termos de superposição de movimentos circulares. Copérnico acreditava firmemente no conceito grego segundo o qual importava apresentar os movimentos dos planetas sob forma de movimentos circulares uniformes, porém conseguiu reduzir as complexidades existentes (ou, usando expressões atuais, conseguiu simplificar a série de Fourier), através de uma mudança de referencial, passando para um referencial com centro no Sol. Só com Kepler, cerca de meio século mais tarde, foi afastado da astronomia, de uma vez para sempre, o princípio da descrição do movimento dos planetas em termos de movimentos circulares uniformes. Kepler, usando os dados precisos colhidos pelo astrônomo dinamarquês Tycho Brahe, demonstrou que a órbita de Marte correspondia exatamente a uma elipse, com o Sol em um dos focos. (É possível apresentar esse movimento elíptico sob a forma de uma série de Fourier, mas não convém fazê-lo porque a idéia de órbita elíptica é de visualização mais simples.) Deu-se, dessa maneira, enorme passo na história das concepções científicas, mas importa deixar claro o que ele não atingiu para que bem se compreenda a contribuição de Newton. O resul-

tado obtido por Kepler correspondeu, essencialmente, a uma observação empírica. Encerrava reduzido poder de predição. Não permitia, por exemplo, explicar por que os planetas se movem segundo elipses, nem explicar por que outros objetos — projéteis, digamos — não se movem segundo as mesmas linhas. (Kepler teve a intuição correta de que alguma influência emanada do Sol atuava sobre as características das órbitas planetárias, porém jamais deu a essa intuição configuração quantitativa.)

O nome que, em nosso relato, se põe, a seguir, como de importância é o de Galileu. Dentre as muitas contribuições que dele recebeu a ciência, desejamos sublinhar duas. A primeira correspondeu à conjectura de que, não havendo a resistência do ar, todos os objetos, independentemente da própria massa, cairiam com igual aceleração. (Hoje, ilustramos esse ponto colocando, por exemplo, pena e moeda num mesmo recipiente, do qual se extraiu o ar, e verificando que efetivamente os dois objetos caem com acelerações sensivelmente semelhantes. Galileu não dispunha de bom aparelhamento produtor de vácuo e, assim, viu-se obrigado a recorrer a métodos indiretos. A lenda segundo a qual ele fez tombar, da Torre de Pisa, duas balas de canhão, de massas muito diferentes, com o fito de obter a prova que o interessava, não tem, ao ver da maioria dos historiadores, fundamento e, se levada a efeito, conduziria a resposta equivocada.) A segunda contribuição de Galileu, a que nos desejamos referir, exige apresentação algo mais sutil. Refere-se ao papel da “inércia” no movimento. Segundo a Física aristotélica, para que um objeto se mantivesse em movimento, fazia-se necessária ação contínua daquilo que hoje chamaríamos força. Essa idéia brotou da experiência comum, da qual decorre que, se pretendemos deslocar um objeto sobre a superfície da Terra, devemos aplicar uma força para manter o objeto em movimento. Contudo, experiência também comum evidencia que, uma vez posto em movimento o objeto, faz-se necessária a aplicação de uma força para detê-lo ou alterar-lhe a direção de deslocamento. Quanto a este ponto, Galileu imaginou situação de que todos os efeitos da fricção estivessem afastados — superfície escorregadia como a do gelo — situação em que se manifesta a propriedade segundo a qual, posto em movimento, o objeto assim se conserva — indefinidamente, em princípio — enquanto sobre esse movimento não atuar uma força. Assentou Galileu que essa componente “inercial” desempenhava papel em todos os movimentos que observamos comumente. A título de ilustração, considerou ele o movimento de um projétil sobre o qual não atuasse a fricção do ar. Se o projétil é erguido e deixado cair, tomba verticalmente. De outra parte, se o projétil recebe impulso inicial no sentido horizontal, descreverá trajetória curva — em verdade, uma parábola — antes de cair ao chão. Galileu admitiu que, nesse movimento, havia a presença de duas componentes que agiam independentemente — uma força que leva o projétil a cair em sentido vertical e uma componente “inercial” que tenderia a manter o projétil em trajetória horizontal infinita,

caso fosse possível afastar a primeira força. Estabeleceu ele, de modo particular, que o estado de repouso e o estado de movimento retilíneo uniforme correspondem a situações em que não atuam forças. Em outras palavras, o papel da força é o de alterar o estado de movimento ou de produzir aquilo que, em nossos dias, chamaríamos aceleração. A observação era importante e contraditava e substituiu a errônea análise aristotélica a propósito das forças e das relações entre elas e os movimentos. Estava o palco preparado para a síntese newtoniana.

É quase impossível exagerar a influência de Newton no campo da Física e, na medida em que avançarmos, teremos oportunidade de examinar, com profundidade, aspectos vários dessa influência.

Aqui, gostaríamos de mostrar como sua obra ultrapassou a dos predecessores e por que, desde a publicação dos Principia, em 1686, até o fim do século XIX, a teoria mecânica de Newton permaneceu inatacada. Newton fez quantitativa e geral a análise que Galileu tinha aplicado apenas a certos movimentos simples. Fê-lo através de alteração de ênfase — a ênfase que se punha no estudo dos movimentos orbitais como um todo passou a ser posta no estudo de propriedades “locais” das órbitas, isto é, no estudo de como o movimento se manifesta entre dois pontos ao longo da órbita. Inventando o cálculo diferencial (simultânea e independentemente descoberto por Leibniz), Newton pôde oferecer definição precisa da taxa de variação da distância percorrida ao longo de uma órbita, no limite em que essa distância se torna arbitrariamente pequena. Dessa forma, ele pôde definir a velocidade de um ponto qualquer da órbita. Obtida a velocidade, pôde ele definir-lhe a taxa de variação em um ponto, ou seja, a aceleração. Essa aceleração é causada pelas forças que atuam sobre o objeto que se acha em órbita. Desse modo, chegou Newton ao que chamaríamos uma “equação diferencial”, relacionando a força com a aceleração — equação que descreve o movimento em uma parte infinitesimal da órbita. (Trata-se da equação $F = ma$, que todo estudante secundário conhece.¹) De modo geral, essa equação não tem conteúdo, a não ser que seja possível especificar a força.

O passo seguinte dado por Newton constituiu-se em obter uma expressão matemática para a força da gravidade. Segundo ele, cada massa existente no universo atrai cada uma de todas as outras massas, com força que é diretamente proporcional ao produto das massas em causa e inversamente proporcional ao quadrado das distâncias que as separam. Faz-se, então, possível inserir essa expressão na equação que relaciona a força à aceleração, resolvendo essa equação por meio do processo da “integra-

¹ A equação aristotélica do movimento, expressa em moderna forma seria $F = KV$

onde K é uma constante e V, a velocidade. Nesses termos, um corpo que não se encontre sob ação de força alguma estará, necessariamente, em repouso.

ção”, também desenvolvido por Newton. A integração torna factível reunir os efeitos que se manifestam em porções infinitesimais da órbita. A solução das equações conduz às órbitas da partícula e Newton pôde demonstrar, considerando a expressão atribuída à força gravitacional, que as únicas possíveis órbitas de uma partícula que se mova sob influência gravitacional de outra — como exemplos podem ser dados um planeta e o Sol — são secções cônicas: elipses, hipérboles e parábolas. Qual desses tipos de órbita uma partícula observe dependerá das “condições iniciais” — da velocidade inicial que lhe foi imprimida. (Tudo isto se tornou matéria de alusão comum com o aparecimento dos foguetes, pois sabemos que para colocar um foguete em “órbita” — isto é, para fazê-lo seguir trajetória elíptica em torno da Terra e não trajetória parabólica, que o levaria a cair na Terra — é preciso imprimir-lhe suficiente velocidade inicial.) Assim, com um só gesto, Newton abrangeu tanto as órbitas elípticas de Kepler quanto as parabólicas órbitas dos projéteis de Galileu. É, entretanto, muito mais profundo o alcance de sua mecânica. Nos termos da mecânica de Newton, uma vez especificadas as forças e as condições iniciais, é possível calcular o movimento das partículas até futuro indefinido. Em outras palavras, todo o futuro curso do universo está fixado e é, pelo menos em princípio, calculável, se conhecidos o presente estado de coisas e as forças atuantes. Mais adiante, quando discorrermos a respeito da teoria quântica, teremos ocasião de reexaminar esse conceito, considerando-o do ponto de vista da Física moderna. A posição de Newton foi sucintamente enunciada pelo marquês Pierre Laplace, físico e matemático francês, cuja *Méchanique Céleste*, obra em cinco volumes, completada em 1825, sintetizou o desenvolvimento da mecânica determinista na linha dos *Principia*. Escreveu Laplace:

Devemos encarar o estado atual do universo como efeito de seu estado anterior e como causa do estado que se seguirá. Uma inteligência que, em determinado instante, pudesse conhecer todas as forças que governam o mundo natural, que pudesse conhecer as posições respectivas das entidades que o compõem e que fosse capaz de analisar todas essas informações teria como abranger em uma única fórmula os movimentos dos maiores corpos do universo e de seus menores átomos — para essa inteligência nada seria incerto e tanto o passado quanto o futuro estariam diretamente presentes a sua observação.

Considerando o fantástico êxito alcançado pela mecânica newtoniana no explicar o movimento dos objetos, desde planetas até balas de canhão, pouco surpreende que os cientistas hajam tendido a aceitar essa teoria sem maior crítica, dando-a como última palavra e padrão último de explicação científica.

Demos atenção, agora, à eletricidade. Embora a eletricidade, sob a forma de fagulhas, relâmpago e coisas semelhantes, seja conhecida há séculos e apresentada como curiosidade excêntrica, os primeiros estudos que dela foram feitos dentro das diretrizes da ciência moderna começaram ao fim do século XVIII, quando Alessandro Volta inventou a “célula voltaica”, ou bateria. Esse dispositivo gera uma corrente contínua de eletricidade por longo tempo — até que se esgote a fonte de energia que está alimentando a corrente, fonte que é uma reação química ou algo do estilo. Com essa conquista, puderam ser estudadas as propriedades de um fluxo contínuo de eletricidade. Em 1820, o físico dinamarquês Hans Christian Oersted descobriu inesperadamente que essa corrente elétrica perturbava um ponteiro magnético do tipo que se encontra na bússolas. Posta a bússola nas proximidades da corrente elétrica, o ponteiro se movia. O magnetismo, o fato de que peças constituídas por certos óxidos de ferro se atraem, era conhecido desde os gregos, sem que para ele se tivesse uma explicação e certamente sem imaginar-se que esse fenômeno singular de qualquer modo se relacionasse com a eletricidade. A relação assumiu aspecto quantitativo quando, pouco depois, o físico francês André Marie Ampère demonstrou que uma corrente, percorrendo uma trajetória circular, produzia uma força magnética de caráter exatamente semelhante à produzida por uma quantidade equivalente de material magnético — existente, digamos, em uma barra de ferro magnetizada. Foi Ampère, assim, levado a conjecturar — conjectura pouco aceita na época — que a origem do magnetismo de certos materiais estaria no fato de eles serem percorridos por correntes elétricas. (Isto, sabemos hoje, corresponde a substancial porção de verdade, embora exista uma outra fonte de magnetismo que se fez patente quando do advento da teoria quântica e se relaciona com o momento angular intrínseco — “spin” — das cargas elementares.) Mostrou Ampère que dois fios portadores de corrente exercem entre si interação magnética, de forma semelhante à maneira como duas barras de ferro magnetizadas vêm-se reciprocamente sujeitas a uma força.

Nesses termos, ao fim do século XIX, havia três coisas assentadas com respeito à eletricidade e ao magnetismo:

1. Ímãs se influenciam, isto é, interagem entre si.
2. Correntes elétricas e ímãs podem interagir.
3. Correntes elétricas podem apresentar interações magnéticas.

O passo seguinte foi dado pelo notável, e, em boa porção, autodidata físico inglês Michael Faraday, cujo retrato Einstein conservava em seu escritório. Faraday, nascido em 1791, um gênio em Física experimental, pertencia a uma família pobre de Yorkshire; seu pai era ferreiro e ele recebeu educação formal rudimentar, consistente, segundo suas próprias palavras, em “pouco mais que primeiras lições de leitura, redação e aritmética em uma escola comum”. Aos doze anos, Faraday empregou-se como entregador em uma livraria e começou a estudar, por iniciativa própria, nos livros

de ciência recebidos pela livraria. Tendo ele dezenove anos, a livraria foi visitada por um senhor Dance, que lhe forneceu entradas para as conferências que fazia, em Londres, o célebre químico inglês, Sir Humphrey Davy. Faraday impressionou-se de tal modo com as conferências que decidiu dedicar-se à ciência, ainda que em nível primário. Pediu um emprego a Davy e, como prova do interesse que tinha, apresentou-lhe as notas acompanhadas de diagramas, por ele redigidas com base nas quatro conferências pronunciadas pelo mesmo Davy. Foi admitido como assistente de laboratório, em 1813, e iniciou a série de experimentos que o levaram, afinal, à descoberta da indução eletromagnética e ao conceito de campo eletromagnético.

Já fizemos notar que, ao início do século dezenove, sabia-se que as correntes elétricas produzem forças magnéticas. O que Faraday demonstrou, a partir de 1831, foi que, sob determinadas circunstâncias os ímãs podem produzir correntes elétricas. Em sua mais direta forma, os experimentos de Faraday consistiam do seguinte: tomava ele de um ímã comum — o chamado ímã permanente, porque retém o magnetismo mais ou menos indefinidamente, contanto que a barra de ferro não seja aquecida, nem sofra alteração drástica — e o deslocava através de uma bobina de fio condutor, do tipo capaz de conduzir corrente elétrica. (As bobinas em forma de toróide, usadas por Faraday, ainda existem e, embora a julgar por fotografias, parecem desgastadas.) A bobina era ligada a um galvanômetro, onde se media a intensidade da corrente que a percorria. Quando o ímã se movia, o galvanômetro indicava aparecimento de corrente, mostrando que um ímã em movimento podia “induzir” uma corrente elétrica. Essa inesperada descoberta completou a correspondência entre eletricidade e magnetismo — embora de forma sutil, pois somente um “campo” magnético variável com o tempo, como diríamos hoje, pode produzir uma corrente. Tal é o princípio básico do “dínamo”, onde correntes elétricas são produzidas nos enrolamentos de fios que se movem — impelidos pela potência gerada a partir do carvão ou força hidráulica — através de campos magnéticos.

A noção de “campo” eletromagnético deve-se a Faraday (que falava de “linhas de força”). Esse conceito originou-se de uma observação por ele feita, a de que, se tomarmos porções de limalha de ferro e as colocarmos, digamos, em uma folha de papel, de sorte que elas possam mover-se, nas vizinhanças de um ímã e, em seguida, sacudirmos a folha de papel ou nela batermos, a limalha se redistribuirá de forma a compor um padrão de linhas que se estende do pólo positivo ao pólo negativo do ímã. Dessa observação, Faraday retirou a idéia de que as linhas estariam presentes, ainda quando ali não estivesse a limalha. Em outras palavras, o ímã produz um “campo” de influência no espaço, “campo” que pode ser medido em qualquer ponto, através da observação do comportamento de certa quantidade de limalha de ferro ou do comportamento de uma pequena agulha

de bússola. Faraday logo ampliou essa noção, para explicar a influência recíproca de objetos carregados de eletricidade. Embora essa idéia de “campo” seja, em essência, uma idéia matemática, Faraday não tinha o preparo matemático ou, talvez, a intuição matemática necessária para transformá-la em uma teoria quantitativa. Isso foi feito, logo depois, pelo físico escocês James Clerk Maxwell. Com procedência se pode dizer que Maxwell esteve para Faraday assim como Newton esteve para Galileu e Kepler.

Maxwell, nascido em Edinburgh, em 1831 — ano em que Faraday descobria a indução eletromagnética — foi um gênio em matemática e, no campo dessa matéria, já compunha, aos quatorze anos de idade, trabalhos originais e significativos. Aos vinte e quatro anos de idade, após brilhante desempenho em Cambridge, foi escolhido para ocupar a cátedra de Física, no Marischal College, de Aberdeen. A obra que a ele se deve cobre, em essência, todos os ramos da Física e foi de tal nível que Einstein, durante toda a vida, sustentou serem mais valiosas que as suas as contribuições de Maxwell. Ao início de sua carreira, Maxwell começou a formular o conjunto de equações que levam o seu nome e que, dando expressão quantitativa às linhas de força de Faraday, constituem atualmente o ponto de partida para a discussão da eletricidade e do magnetismo. Explicar essas equações ao não-especialista envolve dificuldade maior do que explicar as leis de Newton, pois que são equações “diferenciais parciais”, sendo necessário, para compreendê-las, maior conhecimento de cálculo do que o exigido para compreender as leis de Newton, onde aparecem equações “diferenciais ordinárias”. A idéia básica não é, porém, de apreensão difícil. Tal como vimos, um campo magnético que sofra variação induz uma corrente elétrica. Para descrever quantitativamente esse fenômeno, faz-se necessária uma equação que relacione a variação de um campo magnético à corrente induzida ou, em mais amplos termos, que relacione essa variação com as variações do campo elétrico induzido. Um campo é suscetível de variar tanto no espaço quanto no tempo; em outras palavras, em dado ponto espacial, o campo é suscetível de sofrer variação no tempo ou, a determinado tempo, poderá o campo apresentar valores que diferem de ponto para ponto do espaço. As equações de Maxwell relacionam as “variações parciais”, isto é, a variação do campo elétrico no espaço, à variação do campo magnético no tempo. Conferem formulação matemática precisa à observação empírica do tipo da que Faraday realizou. Interessante notar que, embora sem ter preparo matemático para penetrar, em pormenor, o significado das equações de Maxwell, Faraday sentiu instintivamente que tais equações podiam traduzir o que ele vinha buscando expressar. Quando tinha apenas vinte e seis anos e ainda buscava maneira de formular suas equações, Maxwell recebeu a seguinte carta de Faraday, então com sessenta e seis anos:

Há uma coisa que eu gostaria de lhe perguntar. Quando um matemático, empenhado na investigação de fenômenos e resultados físicos, chega a conclusões, não podem elas ser expressas em linguagem comum, de forma tão completa, clara e categórica quanto em fórmulas matemáticas? Em caso afirmativo, não seria uma grande vantagem expressá-las assim? — tirá-lhes o aspecto de hieróglifos, de modo a ser possível com elas trabalhar experimentalmente. Penso que assim deve ser, porque sempre achei que o senhor poderia dar-me uma idéia perfeitamente clara de suas conclusões, a qual, embora não me permitisse, talvez, compreensão integral de todas as passagens envolvidas no processo, haveria de proporcionar-me compreensão dos resultados sem desvio da verdade, e de forma tão clara que me habilitaria a pensar e trabalhar a partir delas. Sendo isso possível, não seria desejável que os matemáticos empenhados no tratamento desses assuntos nos fornecessem os resultados nesses termos populares, úteis, manipuláveis, tanto quanto nos termos que são próprios e adequados a eles, matemáticos?

O razoável pedido de Faraday é algo que os físicos modernos tendem, por vezes, a esquecer.

Uma das “conclusões” de Maxwell era a predição de um fenômeno inteiramente novo — a propagação da radiação eletromagnética no vácuo. Raciocinava ele da seguinte forma: se um objeto eletricamente carregado for posto a vibrar, parte do campo magnético que circunda a carga se destacará desta e passará a propagar-se sob forma de onda. Essa onda, diversamente do que ocorre com as ondas sonoras e com as que se propagam na água, propagar-se-ão, segundo as equações de Maxwell, no espaço vazio, isto é, no vácuo total. E mais ainda, com base nas equações, Maxwell podia prever a velocidade com que essas ondas se propagariam. Descobriu ele que essa velocidade era de aproximadamente 300.000 quilômetros por segundo — a velocidade da luz! Foi esse o primeiro indício de a luz ser um fenômeno eletromagnético. Tão habituados estamos à idéia da luz — e das ondas de rádio, outra forma de radiação eletromagnética — se propagando através do espaço vazio, vinda das estrelas, da lua e de todos os cantos do universo, que dificilmente pensamos no surpreendente fenômeno a que isso corresponde, quando comparado com as espécies de movimento ondulatório que nos são familiares e em que efetivamente vemos ondulando um meio material qualquer. Os contemporâneos de Maxwell tenderam, em verdade, a descrever do que lhes era dito e a existência dessas ondas eletromagnéticas que se propagavam no vácuo só foi experimentalmente confirmada em 1888, nove anos após a morte de Maxwell. Demonstrou-a o físico alemão Heinrich Hertz, que inventou oscila-

dores capazes de produzir as ondas de Maxwell e receptores capazes de captá-las. E conseguiu ele, também, demonstrar experimentalmente que as ondas se propagavam com a velocidade da luz. Contudo, os físicos da época, acostumados como estavam aos modelos mecânicos da Física newtoniana, repeliram a idéia de uma onda oscilando no vazio e, por isso, passaram a falar em um meio, o “éter”, que supostamente permearia todo o espaço e cuja função era a de propiciar uma substância em que oscilassem as ondas de Maxwell. Tal como o próprio Maxwell disse, em 1865: “Tendo em conta os fenômenos da luz e do calor, temos alguma razão para crer que haja um meio etéreo preenchendo o espaço, permeando os corpos e capaz de ser posto a mover-se e a transmitir movimento de uma a outra parte, comunicando esse movimento à matéria bruta, de modo a aquecê-la e afetá-la de várias maneiras”.² Como veremos, as propriedades desse éter foram-se tornando cada vez mais estranhas e muito mais difíceis de visualizar que as próprias ondas de Maxwell. Sob a influência liberadora das idéias de Einstein, o conceito de éter foi abandonado pela maioria dos físicos, já nos primeiros anos do século atual.

Estamos, agora, em condições de compreender o significado do quebra-cabeças com que Einstein começou a debater-se aos dezesseis anos de idade, sete anos, mais ou menos, após o primeiro experimento de Hertz. Einstein começou a indagar de si mesmo quais seriam as consequências de ele ver-se capacitado a deslocar-se com a velocidade da luz. Essa indagação, de aparência inocente, levou-o a ver-se envolvido em contradições e conflitos de enorme profundidade, originados dos fundamentos da Física. Segundo a Física de Newton, um experimento — *Gedanken* (um ensaio mental) — envolvendo observador material que se desloque à velocidade da luz não é despropositado. Com efeito, de acordo com as leis

² Em James Clerk Maxwell, “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field”, *Philosophical Transactions*, 155 (1865), 459-512.

Maxwell não inventou o conceito de éter. Em sua moderna forma, esse conceito remonta a Descartes. Este, assentando um princípio filosófico, rejeitou a “ação à distância” — a idéia de que os sistemas físicos podem interagir uns sobre os outros, independentemente de alguma forma de contato intermediário. Descartes sustentou que esse contato ocorria através de um meio — o éter — e que a luz e o calor, exemplificativamente, se propagavam por pressão do éter. Quando, para explicar todos os fenômenos luminosos conhecidos, surgiu a teoria das partículas, não houve necessidade de recurso ao éter, pois que a propagação intermediária dessas partículas tornava desnecessário falar em ação à distância. Contudo, no século XIX, após ter sido abandonada a teoria das partículas, ressurgiu, de forma aguda, o problema da ação à distância e a teoria do éter reviveu. Nas modernas teorias físicas, não se fala em ação à distância, porquanto se acredita que todas as forças conhecidas se propagam por troca de “quanta” — um tipo de partícula. Assim, no que se refere à luz, a teoria das partículas voltou a imperar, embora sob forma nova e muito mais refinada.

de Newon, se uma pessoa sofre aceleração por longo tempo, em razão de estar exposta à ação de uma força, por pequena que esta seja, essa pessoa chegará, afinal, a atingir a velocidade da luz e, pois, qualquer velocidade. Imaginemos, porém, uma onda — e, para simplificar, uma onda com padrão regular de cristas e cavados. Suponhamos encontrar-nos em repouso e a onda a mover-se. Observaremos um padrão de cristas e cavados que se repete regularmente. Em outras palavras, a amplitude do movimento ondulatório que observamos sofrerá oscilações periódicas, repetidas. No caso de ondas de Maxwell, essas oscilações são exatamente aquilo que é detetado pela antenas de Hertz. Suponha-se, porém, que podemos deslocar-nos com a velocidade de propagação da onda. Poderíamos, em tal caso, acompanhar uma crista ou uma depressão e as oscilações simplesmente desapareceriam a nossos olhos de observadores em movimento. Ora, nos termos da doutrina então aceita, a luz não passaria de movimento oscilatório de onda, a ocorrer no éter. De acordo com essa maneira de ver, se um observador pudesse deslocar-se, no éter, à velocidade da luz, a luz deixaria de ter, a seus olhos, constituição ondulatória. As equações de Maxwell não admitem essa eventualidade e, assim, ou estarão erradas ou não será possível que um observador material se desloque à velocidade da luz. Do ponto de vista da Física clássica, surgiam como absurdas ambas as alternativas.³

Einstein deu-se conta de que um observador que se movesse à velo-

³ Importa notar que ambas as descrições de que extraí essa versão da descoberta da teoria da relatividade por Einstein — o relato de Philipp Frank e as notas autobiográficas de Einstein — foram escritas pelo menos quarenta anos após o fato. Elas tornam compreensível a descoberta da teoria da relatividade, no sentido de que deixam claro implicar a solução em alteração radical da física clássica — da mecânica newtoniana ou das teorias eletromagnéticas de Maxwell e Hertz. O que perturba é não existir qualquer evidência escrita de que, de fato, Einstein assim via o problema àquela época. Ao contrário, com quinze ou dezesseis anos, Einstein redigiu um ensaio (“Über die Untersuchung des Aetherzustandes im magnetischen feld”, agora publicado em *Physikalische Blätter* 27 (1971), 385) propondo experimentos para verificar a teoria de um éter mecânico. No ano de 1901, ele continuava a referir-se, em cartas, ao “éter da luz” e aos métodos para comprovar o movimento da matéria em relação a ele. Aparentemente, não há qualquer documento daquele período capaz de esclarecer a propósito dos processos mentais que conduziram Einstein à relatividade — só existe o trabalho de 1905, que mostra a efetiva transição da física clássica do éter para a relatividade. Talvez que Einstein estivesse examinando, simultaneamente, ambas as linhas de pensamento e, em sua posterior reconstrução dos processos mentais que o levaram à formulação correta, esqueceu os caminhos sombrios que a nada o conduziram. Sou grato a Freeman Dyson pelas cartas trocadas acerca do assunto e pelo debate em torno de um ponto que, dada a obscuridade que o rodeia, concorre apenas para acentuar o milagre da criação intelectual última.

cidade da luz violaria o “princípio da relatividade”. Para compreender essa asserção, importa reexaminar um aspecto das leis de Newton, já referido mas não enfatizado. Lembremos que, se não estiver sob a ação de qualquer força, um objeto se encontrará em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme. A força faz-se necessária apenas para produzir aceleração. Conseqüentemente, no que concerne às leis da mecânica, não há diferença entre um estado de “repouso” e um estado de movimento retilíneo e uniforme. Quando um enunciado desse tipo é pela primeira vez apresentado, surge a tentação de afastá-lo por absurdo, digam o que digam as leis de Newton. Nos movimentos com que a vida cotidiana nos familiariza, partimos, geralmente, de um estado de repouso e, por meio da aplicação de alguma força, sentimo-nos acelerados — impulsionados ou freados — chegando a um estado de movimento em que “sabemos” estar-nos movendo. Imaginemos, porém, a situação de encontrar-nos em um veículo fechado — um trem — que se acha em movimento uniforme; como não há aceleração, como não há nada que nos perturbe, não teríamos como dar-nos conta do movimento. A revolução da Terra em torno do Sol fornece exemplo aproximado do que se pretende dizer. Não temos consciência de que esse movimento exista, porque são muito reduzidas as acelerações devidas à força da gravidade. A razão de a esse fato atribuir-se o nome de princípio da relatividade deve-se, na medida em que entram em pauta as leis de Newton, à circunstância de que ele significa que não há estado de repouso absoluto ou movimento uniforme absoluto. Os únicos estados de movimento uniforme fisicamente detetáveis — e, em consequência, fisicamente com significado — são os movimentos relativos de um observador em relação a outro. Tem perfeito sentido dizer que um observador se está deslocando, em relação a outro, com movimento uniforme, à velocidade de cinco quilômetros por hora — podemos, em princípio, olhar pela janela do trem e medir a velocidade com relação ao solo — mas não tem sentido dizer que o solo se encontra em repouso absoluto. Em repouso em relação a quê? — essa é a questão.

O próprio Newton estava consciente da dificuldade de especificar estados de movimento absoluto. Quando examinarmos a teoria geral da relatividade, proposta por Einstein, discutiremos, de maneira mais pormenorizada, a análise que desse problema propõe Newton — análise sem a qual dificilmente faria sentido o conjunto da mecânica newtoniana. Para Newton, cristão devoto e convicto, bastava que repouso e movimento fossem distinguíveis na consciência de Deus. Em outras palavras, Deus fornece o referencial absoluto da mecânica newtoniana. Dado o enorme êxito prático da teoria de Newton e dado que as estrelas “fixas” — que não são, em verdade, fixas, mas que, vistas da Terra, movem-se muito lentamente, — fornecem um referencial estacionário suficientemente preciso para a maioria dos problemas práticos no campo da mecânica newtoniana, as bases teológicas dessa teoria foram, de modo geral, esquecidas ou ignora-

das pelos continuadores de Newton. Não obstante, o problema da relatividade ressurgiu, sob nova feição, quando da descoberta das ondas de Maxwell e da postulação de um éter que as transportava. Poderia o éter, se existisse, atuar como referencial absoluto? Einstein deixa claro em artigos, cartas e trabalhos que tinha por absurda essa ideia. Em outras palavras, a teoria de Maxwell teria de satisfazer também o princípio de relatividade. “Desde o início, pareceu-me intuitivamente claro que, apreciado do ponto de vista desse observador (que se desloca segundo movimento uniforme) tudo teria de ocorrer de conformidade com as mesmas leis que se aplicam ao observador que, relativamente à Terra, se encontra em repouso”⁴. Surgiu, entretanto, de novo, o mesmo paradoxo. Se correta a mecânica newtoniana, seria possível imprimir aceleração a um observador de modo a levá-lo a atingir a velocidade da luz e, a essa velocidade, a luz não mais lhe apareceria como luz — isto é, em termos de movimento oscilatório de ondas — hipótese em que haveria possibilidade de determinar a velocidade absoluta, contrariando o princípio da relatividade. (Einstein recorria a exemplo particularmente interessante para ilustrar esse ponto. Imaginava um homem olhando para um espelho iluminado por uma lâmpada. Se homem e espelho viessem a deslocar-se à velocidade da luz, a luz da lâmpada — segundo a Física newtoniana — jamais poderia alcançar o espelho e, assim, a essa velocidade, o homem não mais veria a própria imagem. Conseqüentemente, ele teria base para dizer que se estava deslocando à velocidade da luz — em contradição com o princípio da relatividade.)

Antes de examinarmos a solução que Einstein propôs para esse paradoxo — solução que se traduz na teoria especial da relatividade — é importante que façamos breve digressão histórica. Em uma exposição de história da ciência que gire em torno da vida e das idéias de um homem — e, especialmente, de um cientista do porte de Einstein — é fácil distorcer a perspectiva, dando a impressão de que ele e só ele equacionou e resolveu todos os problemas fundamentais. Para evitar essa distorção, é essencial fazer referência a conquistas relevantes e paralelas que se vinham desenvolvendo no campo da Física, enquanto Einstein se dedicava a seu trabalho. Emprego propositadamente a palavra “paralelas”, pois toda evidência indica que Einstein delas não tinha conhecimento. Einstein só desempenhou função acadêmica regular, no Departamento de Física de uma universidade, a partir de 1909, quatro anos após haver aparecido sua publicação a propósito da teoria da relatividade; enquanto a elaborava, tinha emprego subalterno — perito de terceira classe — no Bureau de Patentes, em Berna. Além disso, tal era o isolamento em que se mantinha a Politécnica de Zurique, onde Einstein conseguiu a maior porção de seu preparo formal em Física, que lá não se oferecia curso em que as equações de Maxwell fossem ensinadas. Ele as aprendeu sozinho, estudando textos sobre o assunto. É também interessante assinalar que, em seu trabalho

acerca da teoria especial da relatividade, não se faz referência específica a qualquer outro trabalho de Física.

Ora, em que termos se tinham apresentado a outros físicos os problemas referidos? Tal como já antes sublinhamos, dada a prevalência da filosofia mecanicista — idéia de que a explicação última de todos os fenômenos físicos está na construção de modelos mecânicos — para os mesmos era natural que os físicos posteriores a Maxwell buscassem um modelo mecânico para traduzir a propagação das ondas eletromagnéticas no espaço vazio. Segundo essa maneira de ver, uma carga elétrica oscilante causa uma perturbação no “éter” e essa perturbação se propaga de maneira semelhante à propagação do som na superfície de um tambor — por vibrações elásticas do material. Contudo, logo se tornou claro, especialmente em razão dos trabalhos do físico holandês H. A. Lorentz, que a analogia — para dizê-lo brandamente — era forçada. Ondas sonoras e ondas luminosas diferem sob vários aspectos importantes. O propósito que temos leva-nos a focalizar um desses aspectos. As ondas luminosas são “transversais”: o plano em que a onda luminosa oscila forma ângulo reto — é perpendicular — com a direção de propagação da onda. (Pensemos na onda oscilando para cima e para baixo, enquanto se propaga para a frente.) As ondas sonoras, que se formam por compressão e expansão de um meio material, podem oscilar tanto na direção de propagação quanto transversalmente. E Lorentz demonstrou que, para se manifestarem no éter ondas transversais, o éter haveria de ser infinitamente rígido. Teria de ser não apenas um meio onipresente, através do qual os corpos se movessem sem encontrar resistência, mas, ao mesmo tempo, infinitamente rígido. Tal como Einstein registra em seu “necrológio”:

A introdução da ótica ondulatória no quadro mecânico do mundo estava fadada a despertar sérias dúvidas. Se se devia interpretar a luz em termos de movimento ondulatório em um corpo elástico (o éter), esse corpo haveria de ser permeável a tudo; haveria de ser semelhante a um corpo sólido, dada a transversalidade das ondas luminosas e, não obstante, incompressível, de modo a não existirem ondas longitudinais. Teria esse éter uma existência fantasmal em relação ao resto da matéria, tanto mais que não oferecia qualquer resistência ao movimento dos corpos “com massa”.

Essa era, entretanto, apenas parte da dificuldade. “Fato” mais importante a propósito do éter surgiu quando se indagou se, com respeito a ele, a Terra se acharia em repouso ou em movimento. Ao fim do século XIX, começou-se a imaginar, de maneira aparentemente absurda, que nenhuma das alternativas tinha cabimento. A primeira hipótese a ser afastada foi a de que a Terra arrastasse o éter — como uma espécie de at-

mosfera “fantasma” — enquanto se movia em torno do Sol, de sorte que, no interior desse éter, permanecesse em repouso. Em princípios deste século, chegara-se à conclusão de não ser tal hipótese admissível — e isso devido ao fenômeno de “aberração estelar”, que resulta do movimento de translação da Terra e que foi descoberto pelo astrônomo inglês James Bradley, em 1725. Imagem escolar útil para explicar a aberração é a seguinte: consideremos um homem que caminha na chuva e tem um guarda-chuva aberto; imaginemos, ainda, que não há vento e que, portanto, a chuva cai verticalmente. Como o homem está caminhando, se ele quiser evitar um pinga de chuva que o atinja de frente, ver-se-á obrigado a colocar o guarda-chuva em ângulo contra a chuva. Quanto mais rapidamente ele caminhar em relação à velocidade de queda da chuva, maior o ângulo de inclinação que terá de dar ao guarda-chuva. Ora, podemos transportar essa imagem e aplicá-la à “queda” da luz em um telescópio colocado na Terra (que se acha em movimento). Para captar a luz, é necessário inclinar o telescópio, segundo pequeno ângulo, relativamente à direção “verdadeira”, isto é, à direção em que a estrela estaria, se a Terra se encontrasse em repouso. Assim, para contemplar uma estrela em telescópio colocado na Terra, que se move, é preciso olhar não diretamente para a estrela, mas para um ponto ligeiramente afastado dela. A amplitude da inclinação angular é, neste caso, bem pequena, pois a velocidade da Terra, ao longo de sua órbita, equivale, quando muito, a um décimo milésimo da velocidade da luz.⁴ O efeito é observável porque, devido ao fato de a Terra mover-se em torno do Sol segundo uma órbita elíptica, o ângulo do telescópio deve ser reajustado para compensar a constante mudança de orientação. Em verdade, é preciso movimentar o telescópio ao longo de uma reduzida elipse, enquanto a Terra cumpre uma revolução completa em torno do Sol. Se a Terra, em seu movimento, arrastasse o éter, isso agiria sobre a luz da estrela como o vento sobre a chuva que cai e compensaria o movimento da Terra, cancelando o efeito de aberração. Como a aberração ocorre e admite explicação em termos simples, cabe concluir — e assim se concluiu — que a Terra não arrasta o éter.

Restava, dessa maneira, a segunda possibilidade, ou seja, a de que o éter se encontrasse em repouso, movendo-se a Terra através dele e que, conseqüentemente, o éter fornece o referencial em repouso absoluto ne-

⁴ Esse ângulo é aproximadamente indicado por v/c , razão da velocidade da Terra para a velocidade da luz. Nesses termos, é de aproximadamente 20 segundos de arco. Recorde-se que há 360 “graus” em um círculo, 60 minutos em cada grau e 60 segundos em cada minuto. Foi esse um dos primeiros métodos de avaliar a velocidade da luz.

cessitado pelas leis newtonianas.⁵Ocorreu que essa proposição poderia ser submetida a rigoroso teste experimental. Os experimentos foram obra de outra eminente figura do século XIX, Albert Michelson, o primeiro norte-americano a receber o Prêmio Nobel em uma das ciências. Michelson, nascido na Polônia, em 1852, havia sido educado, após a emigração de sua família para os Estados Unidos da América do Norte, na Academia Naval de Annapolis e começou, em 1878, a respeito das propriedades da luz, os experimentos a que dedicaria a vida. Tal como era costume e exigência daqueles tempos, Michelson foi à Europa — à Alemanha e França — para aprofundar estudos no campo da ótica. Utilizando técnicas novas, teve ocasião, em 1882, de fixar, para a velocidade da luz, o mais preciso valor experimental até então obtido. (Fixou a velocidade em 299.853 quilômetros ou 186.320 milhas por segundo. As técnicas para avaliação da velocidade da luz aperfeiçoaram-se continuamente; em novembro de 1972, fixava-se o valor mais aceitável: 299.792,756 quilômetros por segundo, com pequeno erro nas duas últimas casas. Em outras palavras, a velocidade da luz é agora conhecida com precisão de décimos de milésimos de por cento!) Por essa época, Michelson retornara aos Estados Unidos da América do Norte, passando a trabalhar na Case School of Applied Science, em Cleveland. Na Alemanha, entretanto, foi que ele começou a desenvolver o seu mais importante instrumento experimental — o interferômetro de Michelson. O interferômetro é um dispositivo que tira partido das características ondulatórias da luz. Se dois trens de ondas se superpõem, interferem um com o outro. Significa isso que os dois trens se combinam para produzir uma forma ondulatória resultante, cujas características se relacionam com as das ondas originais. Os trens de ondas originais podem, em particular, estar ou não estar “em fase”. Dito de outro modo, quando dois padrões ondulatórios simples e de forma idêntica interferem, pode ocorrer que os dois padrões se superponham perfeitamente ou que uma das ondas tenha cristas ou cavados antes ou depois da outra. Neste último caso, o padrão resultante apresentará “franjas” características. Ora, o tipo de interferômetro imaginado por Michelson é, em princípio, extremamente simples. Consiste de dois “braços” retos que se encontram em ângulo reto. Na extremidade de cada um dos braços, há um espelho. No ponto em que os braços se encontram, há um espelho em cuja composição entra 50% de prata, inclinado de forma tal que a luz da fonte é “dividida”, isto é, metade dela passa através da superfície não-refletora do espelho central, enquanto a segunda metade se reflete em ângulo reto, caminhando ao longo do segundo braço. Os dois raios de luz são devolvidos pelos espelhos que se acham nas extremidades dos braços, voltam a en-

⁵ Há possibilidades intermediárias, onde se admite que o éter é apenas parcialmente arrastado. Ver Max Born, *Einstein's Theory of Relativity*, onde se proporciona boa visão geral do assunto.

contrar-se no ponto em que os braços se cruzam e aí interferem um com o outro. Se for o mesmo o tempo necessário para os raios de luz percorrerem o caminho de ida e volta num e noutro braço, esses raios, quando chegarem ao ponto de encontro, estarão em fase. Se, por qualquer motivo, os tempos forem diferentes, os raios de luz, quando se encontrarem, estarão fora de fase, formando, em consequência, “franjas” observáveis. Há duas razões possíveis para os tempos serem diferentes: ou os dois braços não têm a mesma extensão, de sorte que a luz necessita de mais tempo para percorrer um deles, ou — ainda que tenham os braços a mesma extensão — poderia a velocidade da luz ser diferente em diferentes direções. Esta última eventualidade parece muito estranha e, do ponto de vista de um físico posterior a Einstein, é estranha. Contudo, do ponto de vista de um físico do século XIX, convencido da existência de um éter estacionário, poder-se-ia raciocinar e, em verdade, se raciocinou da maneira seguinte: à medida que a Terra se move através do éter — digamos, para simplificar, que em linha reta e a velocidade constante — o éter parece escoar como água em um córrego. No éter estacionário, a luz caminha com a velocidade acima referida. Entretanto, aos olhos do observador posto na Terra, o éter está em escoamento e a luz, uma vez que comece a propagar-se no éter, participará de seu movimento — como um nadador apanhado pela correnteza de um rio. Com efeito, colocado o interferômetro de Michelson de forma que um braço esteja na direção da correnteza e o outro perpendicular a ela, a luz, caminhando ao longo desses dois braços, propaga-se à semelhança de um nadador que avançasse e recuasse, contra e a favor da correnteza, em comparação com um nadador que cumprisse a mesma distância de ida e volta, perpendicularmente à correnteza. As reais velocidades da luz serão, sustentava-se, diferentes nesses dois casos e, em consequência, deveriam ser diferentes os tempos necessários para a luz percorrer o caminho de ida e volta, ao longo dos dois braços, ainda que esses braços tivessem exatamente o mesmo comprimento.⁶ Assim, do ponto de vista de quem admite a Terra a mover-se através de um éter es-

⁶ As fórmulas para esses dois tempos foram pela primeira vez elaboradas por Maxwell. Se L é o comprimento de cada braço e v é a velocidade da Terra, o tempo para a trajetória de ida e volta ao longo do braço perpendicular ao movimento da Terra (c é sempre a velocidade da luz no éter), é dado por

$$t = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

enquanto o tempo para a trajetória de ida e volta ao longo do braço paralelo ao movimento da Terra é dado por

$$t' = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{1 - v^2 / c^2}$$

Em geral, t é maior que t'

tacionário, seria de esperar o aparecimento de franjas de interferência, a partir das quais seria possível determinar a velocidade absoluta da Terra em relação ao éter.

Os princípios simples a que fizemos referência formaram a base de um dos mais renomados experimentos na história da Física — o experimento Michelson-Morley. (Edward Morley, físico e químico norte-americano, colaborou com Michelson na primeira versão precisa do experimento, embora a concepção fosse, indubitavelmente, deste último que, em 1881, já havia procurado concretizar a idéia. O experimento a que habitualmente se denomina Michelson-Morley foi realizado em 1887). Para avaliar a precisão dos trabalhos, notemos que os cálculos algébricos necessários para determinar as diferenças dos tempos de chegada dos dois raios de luz, nas condições acima descritas, envolvem proporcionalidade entre o quadrado da velocidade da Terra e a velocidade da luz, o que equivale a uma parte em cem milhões. Não obstante, o experimento foi tão bem planejado que permitiria detectar efeitos de interferência dessa ordem de magnitude e mesmo de ordem inferior.⁷ O fato, porém, é que esses efeitos não se manifestaram. Para aumentar a confiança no dispositivo, Michelson e Morley montaram o interferômetro em pesado bloco de pedra, montado, por sua vez, sobre um disco de madeira que flutuava em um tanque de mercúrio. Isso os habilitava a fazer girar constantemente o conjunto, de sorte a eliminar a possibilidade de estarem observando algum efeito accidental causado por alguma particularidade de construção de um dos braços”.⁸ O experimento foi feito dando-se dezesseis diferentes orientações aos braços. Foi o experimento realizado ao meio-dia e às seis horas da tarde, para verificar se a orientação da Terra em relação ao Sol poderia ter alguma influência; e planejou-se repetir o experimento de três

⁷ Acentuamos aqui, novamente, que o experimento Michelson-Morley mede um efeito da ordem de magnitude $(v/c)^2$. Compreendeu-se bem, àquela época, que todas as medidas terrestres da velocidade da luz feitas anteriormente a Michelson, e não suficientemente acuradas para indicar efeitos dessa ordem de magnitude, não seriam afetadas pelo movimento da Terra com relação ao éter. Com efeito, em 1879, Maxwell havia escrito: “Os métodos terrestres de determinar a velocidade da luz obrigam a que a luz caminhe duas vezes ao longo da mesma trajetória, de sorte que a velocidade da Terra com respeito ao éter agiria sobre o tempo da dupla passagem segundo uma grandeza que depende do quadrado da razão da velocidade da Terra para a velocidade da luz, e essa grandeza é demasiado pequena para ser observada.” Citado por R. S. Shankland “The Michelson-Morley Experiment”, *American Journal of Physics*, 32 (1964), 17.

⁸ Cada braço tinha 11 metros de comprimento. Foi usada luz de sódio amarela, com um comprimento de onda de $5,9 \times 10^{-5}$ centímetros. Com base na teoria de Maxwell, Michelson calculou que, se os braços fossem girados de 90 graus, o padrão de interferência se alteraria de aproximadamente quatro décimos da distância entre as duas franjas. Nenhuma alteração foi observada.

em três meses, com o objetivo de verificar se alguma influência decorreria do movimento da Terra ao longo de sua órbita.⁹ Contudo, nem os ideadores do experimento, nem outros que o realizaram posteriormente — e ele tem sido repetido com precisão enormemente maior na última década, graças à utilização de modernas técnicas eletrônicas — jamais notaram o menor efeito atribuível à velocidade da Terra no éter. (Na década de 1920, o físico Dayton Miller, do Observatório de Monte Wilson, em Pasadena, causou breve agitação no mundo científico, ao chegar, aparentemente, a um resultado não-zero para o efeito de Michelson. Logo se rejeitou esse resultado, mostrando que o experimento fora erroneamente realizado.)

iii. Digressão a propósito do experimento Michelson-Morley

Na maioria dos livros em que se faz apresentação da teoria da relatividade, figura a afirmação de ter sido o experimento Michelson-Morley o fundamento e o ponto de partida do trabalho de Einstein. Não há, entretanto, qualquer menção específica ao experimento na publicação que Einstein deu a lume em 1905. Há referência vaga a experimentos do gênero, mas não diretamente ao experimento Michelson-Morley. Poderia surgir a tentação de concluir que Einstein jamais teve notícia do experimento ou que este o impressionou tão pouco que não se preocupou com fazer-lhe referência. Em verdade, posteriormente, Einstein disse a vários físicos que ocorrera a segunda dentre as hipóteses mencionadas. Considerando-se o tipo de homem que ele era, torna-se impossível imaginar que estivesse agindo com o fito de realçar sua própria engenhosidade. Recentemente, o físico e historiador da ciência, Gerald Holton, que teve acesso aos arquivos de Einstein — cartas, notas e documentos — procurou examiná-los, em Princeton, com vistas a descobrir informações concernentes à relação entre as idéias de Einstein, no que respeita à teoria especial da relatividade, e o experimento Michelson-Morley. Holton cita carta que, um ano antes de falecer, Einstein dirigiu a um historiador de Illinois:

Antes do trabalho de Michelson, era sabido que, dentro dos limites de precisão dos experimentos, não havia influência dos estados de movimento do sistema de coordenadas sobre os fenômenos, isto é, sobre as leis dos mesmos. H. A. Lorentz demonstrou que era possível entender o fato com base em sua formulação da teoria de Maxwell, suscetível de aplicação a todos os casos em que a segunda potência da velocidade do sistema

⁹ Desejavam eliminar a possibilidade de que todo o sistema solar estivesse em movimento com respeito ao éter e de que, em um ponto qualquer, ao longo da órbita terrestre, os dois movimentos eventualmente se anulassem.

pudesse ser desprezada (efeitos de primeira ordem). De acordo com o estágio em que se encontrava a teoria, era, entretanto, natural esperar que essa independência não se manteria com relação a efeitos de segunda ordem ou de ordem mais elevada. Demonstrar que esse esperado efeito de segunda ordem estava de facto ausente em um caso decisivo foi o maior mérito de Michelson. Essa obra de Michelson, grande tanto pela vigorosa e clara formulação do problema, como pela habilidosa maneira de alcançar a precisão de medida que se requeria, constitui a contribuição imortal que ele deu ao conhecimento científico. Essa contribuição erigiu-se em novo e sólido argumento favorável à não-existência do “movimento absoluto”, princípio da relatividade especial, o qual nunca foi posto em dúvida no campo da Mecânica, desde Newton, mas que parecia incompatível com a eletrodinâmica.

(E Einstein prossegue:) Sobre meu próprio trabalho, o resultado de Michelson não exerceu influência ponderável. Nem mesmo recorde se o conhecia quando escrevi, pela primeira vez, sobre o primeiro assunto (1905). A razão reside em que eu estava, por motivo de ordem geral, firmemente convencido de que o movimento absoluto não existe e meu problema se resumia em saber como conciliar esse ponto com o conhecimento que temos da eletrodinâmica. Entende-se, assim, porque, em minha obra pessoal, não coube papel ou, pelos menos, papel decisivo ao experimento de Michelson.

Esclarecendo o papel ou a ausência de papel do experimento de Michelson, Einstein chama a atenção para o fato de que, a esse nível, não há, no campo da criatividade científica — tal como, por vezes, se presume — relação tão simples entre experimento e teoria. A “intuição”, a “livre criatividade” do espírito desempenham, também, papel decisivo. Não equivale isso a dizer que o cientista, como cientista, possa lançar-se a arbitrárias fantasias acerca do universo. Em última instância, todas as especulações, para serem significativas, haverão de resultar em proposições suscetíveis de verificação experimental. Ocorre, porém, que os experimentos específicos não definem, de maneira simples, a base axiomática da teoria e, no trabalho criador realizado por um grande físico, a “intuição” — sentimento a propósito de como o universo deveria ser — desempenha, para elaboração dessa estrutura axiomática, papel mais importante do que os resultados de qualquer experimento.

Independentemente do efeito que o experimento Michelson-Morley possa ter tido sobre Einstein, não há dúvida acerca do efeito que teve sobre cientistas seus contemporâneos. Pasmou-os. Vacilava toda a base me-

canicista que se dava à interpretação das equações de Maxwell, referindo-as ao éter. Havia sido um período de heróicos esforços especulativos e, em 1892, o físico irlandês George Francis FitzGerald propôs uma explicação digna de referência. Sua idéia era a de que o braço do interferômetro de Michelson, que acompanhava a direção do movimento da Terra, se contraía, de maneira a compensar a diferença de tempo que decorria das diferentes velocidades reais com que a luz percorria os dois braços. De acordo com FitzGerald, esses dois efeitos se compensariam exatamente e assim se explicaria o resultado nulo no experimento de Michelson. Na vida de todos os dias, não observamos qualquer contração dos objetos em movimento, mas, para sermos justos com FitzGerald, importa dizer que a contração por ele mencionada era um efeito da ordem de grandeza do quadrado da velocidade do objeto em movimento em relação ao quadrado da velocidade da luz.¹⁰ Em verdade, para explicar o experimento de Michelson, far-se-ia necessária contração de apenas 1/200 de micron — aproximadamente um centésimo milionésimo de metro — extensão tão reduzida que somente um interferômetro poderia acusá-la. A questão está em saber por que haveria tal contração, que surge como urna explicação *ad hoc* para o experimento de Michelson. Em 1895, Lorentz, que também havia chegado a um conceito de contração para explicar o resultado ou não-resultado alcançado por Michelson (como veremos, uma contração fundamentada em base teórica totalmente diversa aparece como traço característico da teoria especial da relatividade e veio a ser conhecida como contração Lorentz-FitzGerald) propôs, para ela, uma justificação provisória. Lorentz se havia empenhado no desenvolvimento de uma teoria de forças eletromagnéticas que suplementasse a teoria dos campos, elaborada por Maxwell. Sua idéia básica era a de que a matéria eletricamente carregada opera como fonte dos campos de Maxwell, campos que existiriam nos espaços vazios entre as partículas de matéria. Sugeriu ele, em outras palavras, clara distinção entre matéria e campos. A seu ver, duas partículas carregadas interagiriam reciprocamente por influência mútua dos respectivos campos. Como diz Einstein em seu “necrológio”:

De acordo com ele (Lorentz), o campo só existe, em princípio, no espaço vazio. A matéria — considerada em termos de átomos — espaço vazio, sede do campo eletromagnético, campo esse criado pela é a sede única das cargas elétricas; entre as partículas materiais, há posição e velocidade das car-

¹⁰ A fórmula exata da contração Lorentz-FitzGerald é

$$L = L_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

onde L_0 é o comprimento medido em estado de repouso, v é a velocidade com respeito ao éter e c é a velocidade da luz.

gas que se localizam nas partículas materiais.... As partículas carregadas criam o campo que, por outro lado, exerce forças sobre as cargas de outras partículas, determinando, dessa maneira, o movimento destas últimas, que ocorre segundo as leis newtonianas do movimento.... O físico da geração atual encara o ponto de vista a que chegou Lorentz como o único possível; na época, entretanto, foi encarado como um passo surpreendente e audacioso — sem o qual não teria havido avanço posterior.

A “força de Lorentz”, que opera entre partículas eletricamente carregadas e que ele derivava de considerações algo superadas, nas quais se envolvia o éter, continua a ser o elemento essencial para descrição das interações entre partículas carregadas — os elétrons, por exemplo. Lorentz admitia que, se a matéria consiste de “moléculas”, isto é, de corpos eletricamente carregados, mantidos em ligação por forças eletromagnéticas, poderia ocorrer que, posto esse corpo em movimento, as forças se alterassem, de sorte a produzir a contração Lorentz-FitzGerald. Em 1906, um ano após o aparecimento do trabalho de Einstein, Lorentz pronunciou uma série de conferências na Universidade de Colúmbia e, na oportunidade, sintetizou sua maneira de ver:

Poderemos entender a possibilidade da presumida alteração de dimensões, se tivermos em mente que a forma de um corpo sólido depende das forças que atuam entre suas moléculas e que, com toda probabilidade, essas forças se propagam através do éter, de modo que mais ou menos se assemelha ao de transmissão das ações eletromagnéticas ao longo desse meio. A partir daí, é natural supor que, tal como se dá com as forças eletromagnéticas, as atrações e repulsões moleculares sofram alguma alteração em decorrência de uma translação imprimida ao corpo e isso pode concebivelmente resultar em alteração de suas dimensões.

De tal modo se encontravam ainda os físicos sob a influência da idéia de éter que a concepção de Lorentz persuadiu Morley e seu colega D. C. Miller (o mesmo Miller que, anos depois, pensaria haver descoberto um resultado não-zero para o experimento de Michelson) a realizarem uma nova série de experimentos, usando, primeiro, uma estrutura de madeira e, depois, uma estrutura de aço, imaginando que, se corretas as explicações de Lorentz, o efeito talvez dependesse das moléculas de que se constituíssem os braços. O resultado continuou a ser zero. Não era suscetível de observação a velocidade da Terra com relação ao éter.

Em 1909, aos sessenta e seis anos de idade, Lorentz deu forma de livro a suas preleções. (Foi o livro revisto em 1915, recebendo apêndice e

notas de pé de página que refletiam a crescente aceitação da teoria da relatividade de Einstein.) O livro de Lorentz é um típico documento da ciência do século XIX. Cabe falar em “ciência do século XIX” porque embora Lorentz — sendo, como era, um grande físico — não tenha deixado de apreciar a obra de Einstein, é claro que, pelo menos em 1909, não conseguia dar-lhe crédito. Ao fim de seu livro, Lorentz faz uma síntese da teoria de Einstein, que estava, então, atraindo a atenção dos contemporâneos e, após tal síntese, escreveu: “Penso, não obstante, poder fazer reivindicação em favor da maneira como apresentei a teoria. Não posso encarar o éter — que pode ser a sede de um campo eletromagnético com sua energia e vibrações — senão como dotado de certo grau de substancialidade, por diferente que possa ser da matéria comum”. O grande livro de Lorentz semelha-se a um esplêndido e antigo castelo europeu, magnificamente construído e, não obstante e até certo ponto, assombrado por fantasmas.

iv. Einstein e a relatividade do tempo

Enquanto o experimento de Michelson-Morley ocupava a atenção dos cientistas contemporâneos de Einstein, o próprio Einstein, tanto quanto se pode saber, permanecia quase alheio ao assunto. Não tendo conseguido qualquer tipo de trabalho universitário no campo da Física, procurava ganhar a vida em Berna, examinando pedidos de patente, com o objetivo de apontar-lhes imperfeições técnicas; nos momentos de lazer, enfrentava o problema real, que tinha entrevisto (como veio posteriormente a recordar) desde a idade de dezesseis anos. Nos termos da teoria especial da relatividade, elaborada por Einstein, a solução do “quebracabeças” Michelson-Morley é tão simples que, à primeira vista, pode desapontar. Consiste em dizer que não está presente qualquer dificuldade. A premissa básica utilizada por Einstein é que não se pode distinguir um estado de repouso de um estado de movimento a velocidade constante, por meio de qualquer experimento, seja de caráter eletromagnético, seja de caráter mecânico, levado a efeito por um observador colocado em um ou outro dos sistemas. Podem, naturalmente, ser medidos os movimentos relativos dos dois sistemas, porém qualquer dos observadores poderá sustentar que está em repouso e que em movimento se encontra o outro. Isto é precisamente o que o experimento Michelson-Morley confirma. O experimento é realizado na Terra que, com elevado grau de aproximação, pode ser vista como um sistema em movimento uniforme (sistema conhecido como pertencente ao tipo dos “sistemas inerciais”). Conseqüentemente, não é de esperar a identificação de qualquer efeito. Em verdade, se Michelson houvesse observado algum efeito, a teoria da relatividade estaria simplesmente errada. Nesse contexto, a contração Lorentz-FitzGerald nunca entra em pauta, pois não há um éter estacionário a proporcionar o referencial do repouso absoluto. O verdadeiro problema é o de saber como

conciliar a mecânica newtoniana — que permite ao observador sofrer aceleração que o coloque à velocidade da luz — com o princípio da relatividade da teoria eletromagnética — o qual, como vimos, não pode admitir que um observador se desloque à velocidade da luz. O gênio de Einstein consistiu em reconhecer que essas duas teorias não podem ser conciliadas e que está em erro a mecânica newtoniana. Naturalmente, quando se diz que uma teoria como a mecânica newtoniana — uma das mais frutíferas descobertas científicas de todos tempos — está “errada”, o que se pretende dizer é só ser ela correta quando aplicada a limitado campo de fenômenos. A mecânica newtoniana foi concebida para explicar os movimentos de objetos que se deslocam a velocidades muito inferiores à velocidade da luz. Aplicadas a esses objetos, a mecânica newtoniana e a teoria especial da relatividade conduzem a resultados quase idênticos. Há, em princípio, “correções relativistas”, mas são tão pequenas que, na prática, podem ser desprezadas em, digamos, cálculos de órbitas planetárias. Isso explica por que a mecânica newtoniana opera tão bem com respeito a tantos fenômenos astronômicos — tal como o do movimento de planetas — e por que a teoria da relatividade não foi descoberta mais cedo. Explica também por que as pessoas experimentam dificuldade no acolher a teoria. Parece, como dentro em pouco veremos, que ela contradiz o “senso comum”. Claro está, porém, que a experiência do senso comum não envolve objetos que se movem com velocidades próximas à da luz. Todavia, em ciclotrons, sincrotrons e no domínio dos raios cósmicos, por exemplo, lidamos com partículas que se movem a velocidades que só diferem da velocidade da luz por pequenas frações de um por cento. Se se tentasse tratar o movimento dessas partículas em termos de mecânica newtoniana clássica, chegar-se-ia a absurdo completo, comparado o resultado com o experimento.

O primeiro trabalho de Einstein a propósito de relatividade, publicado na revista alemã *Annalen der Physik*, em 1905 sob o título “*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*” (“Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em movimento”) principia com uma análise da relatividade do tempo. Em nossa experiência comum, temos consciência de um fluxo de acontecimentos aparentemente irreversível, com separação entre o que está acontecendo “agora”, o que aconteceu “antes” e se contém na memória e o que ocorrerá no futuro. O fato de esse conjunto subjetivo de impressões ser partilhado pelo restante da espécie humana levou a quantificá-lo — levou, se preferirmos dizê-lo assim, à “invenção” do tempo. No que se refere à Física, importa sermos cautelosos, distinguindo entre a sensação subjetiva de tempo — que é, por seu caráter mesmo, imprecisa e pessoal — e o tempo “objetivo” que os relógios medem. (Não há dúvida de ter sido o fato de os indivíduos não diferirem radicalmente no que tange à sensação subjetiva do tempo que levou à criação dos relógios.) Para nossos propósitos, um “relógio” é qualquer fenômeno que se repita, como, por exemplo, o movimento periódico do pêndulo ou os batimentos cardíacos. Quanto

mais precisa a repetição, mais perfeito é o relógio. A primeira observação importante contida no trabalho publicado por Einstein em 1905 é que todo enunciado acerca do tempo “objetivo” de um evento é, em realidade, enunciado acerca da ocorrência simultânea de dois eventos, ou seja, a ocorrência simultânea do evento em causa e, digamos, a superposição dos “ponteiros” de um relógio sobre os números desenhados no mostrador. Tal como se expressa Einstein: “Quando digo, por exemplo, ‘o trem chega às 7’ significa isso que a passagem do ponteiro menor de meu relógio sobre o lugar marcado 7 e a chegada do trem são eventos simultâneos”. (O físico polonês Leopold Infeld, que foi um dos assistentes de Einstein na década de 1930, registrou: “essa é a sentença mais simples com que já deparei em trabalho científico”.) Não obstante, essa sentença inclui, como Einstein se apressou a sublinhar, um conceito indefinido, ou seja, o conceito de “simultaneidade”. Naturalmente, todos “sabemos” o que significa serem simultâneos dois eventos. De modo geral, contemplamos os acontecimentos e nossos relógios e comparamos as observações. Na vida cotidiana, é dispensável a mais aprofundada análise desse procedimento. Na prática, agimos dessa maneira, sem enfrentar dificuldades especiais. Contudo, se refletirmos acerca do assunto, damos-nos conta de que, não sendo infinita a velocidade da luz, algum “tempo” decorre para que ela, que está iluminando o evento em pauta, atinja nossos olhos e, assim, estritamente falando, estamos colocando em correlação com nossos relógios um evento que já ocorreu. Via de regra, esse ponto pode ser ignorado, pois a luz caminha tão rapidamente e são tão reduzidas as distâncias em causa que o “atraso” é irrelevante. Não obstante, se desejarmos cronometrar eventos ocorridos na Lua, digamos, esse atraso torna-se muito significativo. A luz ou as ondas de rádio — que se deslocam à mesma velocidade — precisam de aproximadamente 2,5 segundos para a viagem de ida e volta da Terra à Lua. Isso provoca a questão básica de como sabermos se são “simultâneos” eventos ocorridos na Terra e, digamos, na Lua. Poderíamos sentir-nos tentados a colocar a matéria da maneira seguinte: sincronizarmos dois relógios, comparando-os quando postos suficientemente próximos para que se elimine o efeito atraso. Se os dois relógios foram construídos de idêntica maneira, quando transportarmos um deles para a Lua, poderemos, talvez, confiar em que permanecerão síncronos. Mas como ter realmente certeza disso? Impõe-se dominarmos um processo — uma “definição operacional”, na terminologia do filósofo da ciência Percy Bridgeman — de simultaneidade.

Para elaborar uma definição operacional de simultaneidade, Einstein valeu-se do fato de a propagação da luz no vácuo obedecer a uma lei muito simples — propaga-se com velocidade constante, segundo linhas retas. Conseqüentemente, se desejarmos verificar se há sincronismo entre dois relógios, poderemos proceder da seguinte maneira: medir a distância entre os dois relógios, colocando, digamos, réguas em sucessão, indo em

seguida até o ponto médio e instruindo os observadores colocados junto aos relógios no sentido de que emitam sinais luminosos quando os respectivos relógios assinalarem, digamos, 7 horas. Se esses sinais luminosos chegarem ao ponto médio “simultaneamente”, os relógios estavam sincronizados no momento da medida. (Na teoria da relatividade, presume-se podermos decidir se são simultâneos dois acontecimentos que ocorrem no mesmo ponto do espaço.) Dessa maneira, podemos estabelecer uma rede de relógios síncronos. (Poucos anos depois de ter sido dada publicidade à teoria, Einstein, que ainda não tinha uma posição universitária estabelecida e lutava para ganhar a vida, observou: “Em minha teoria da relatividade, coloquei um relógio em cada ponto do espaço, mas tinha dificuldade para colocar um relógio em meu quarto”.) Todas as asserções feitas são elementares e o mais conservador dos físicos newtonianos nada veria aí que o perturbasse. É no passo seguinte que a revolução se inicia. O problema é este: pode o procedimento ser aplicado a dois relógios que se encontram em movimento um com relação ao outro? E, se isso for possível, qual será o resultado? A essa altura, Einstein formulava um hipótese à primeira vista surpreendente, mas confirmada por todos os testes experimentais já realizados: medida por um observador, a velocidade da luz é sempre a mesma, independentemente do, velocidade que tenha o objeto que a emite em relação àquele observador, contanto que a fonte luminosa esteja em movimento uniforme. Esse princípio desempenha tão importante papel na teoria de Einstein que vale a pena apresentá-lo tão ilustrativa quanto possível. Diz o princípio que, se tivermos uma lanterna e medirmos a velocidade da luz por ela emitida, essa velocidade será sempre a mesma, independentemente da rapidez com que a lanterna se mova em relação a nós enquanto emite a luz. (E bem sabido que a luz emitida por uma fonte em movimento sofre alteração de cor — o chamado efeito Doppler — significando isso que se a fonte se desloca, aproximando-se do observador, a luz se altera no sentido do azul, isto é, sua frequência cresce e seu comprimento de onda decresce; mas essas duas alterações se compensam de maneira tal que a velocidade permanece a mesma.)

Uma evidência experimental direta pode agora ser apresentada em prol do “princípio de constância”: a ilustração mais dramática diz respeito à luz que provém das “estrelas duplas”, pares de estrelas que se movem em órbita, uma em torno da outra. Evidentemente, há pontos do movimento orbital em que a estrela se está deslocando em direção à Terra e pontos em que se está distanciando de nosso planeta. Se a velocidade da luz diferísse nesses dois pontos da órbita, seria fácil demonstrar que veríamos, ao mesmo tempo, vários tipos de imagens “fantasmas” da estrela em movimento. A estrela pareceria estar, por assim dizer, em dois lugares ao mesmo tempo. Imagens desse tipo não são observadas e isso confirma decisivamente o princípio. Notável acerca desse exemplo, e de outros que o seguiram, é terem eles surgido após a elaboração da teoria da relativida-

de. O trabalho concernente às estrelas duplas, por exemplo, foi realizado pelo astrônomo holandês Willem de Sitter, em 1913. Para formulação do princípio, Einstein foi mais uma vez guiado por sua “intuição” quanto ao que era simples e correto. As equações de Maxwell incluem o princípio da constância, mas como as equações conflitavam com a mecânica newtoniana, era preciso “adivinhar” quais as equações corretas. Em princípios da década de 1950, Einstein comentou esse ponto com o físico R. S. Shankland, que lhe havia feito indagação a propósito do princípio da constância. Shankland sabia que haviam sido adiantadas outras sugestões ao tempo em que os experimentos não as refutavam. Essas outras sugestões, escreve Shankland, Einstein

abandonou... porque não podia imaginar forma de equação diferencial que pudesse ter soluções representativas de ondas cuja velocidade dependesse do movimento da fonte. Nessa hipótese, a teoria da emissão conduziria a relações de fase tais que a luz propagada se “misturaria” e poderia até “refluir sobre si mesma”. E ele indagou: “O senhor compreende isso?” Respon-di que não e tudo me foi cuidadosamente repetido. Quando chegou à parte em que falava da “mistura”, agitou as mãos diante do rosto e riu com riso aberto diante da idéia.

E continuou: “As possibilidades teóricas, em um caso determinado, são relativamente poucas e relativamente simples e muitas vezes é possível optar entre elas com base em argumentos de ordem geral. O considerá-las diz-nos o que é possível, mas não nos diz qual seja a realidade”.

A “realidade” brota do experimento, mas é interpretada pela “criação livre” do espírito.

Dispondo do princípio da constância, podemos voltar à questão da sincronização de um relógio que se acha em repouso com um relógio que se acha em movimento. Como vimos, essa questão transforma-se na questão de saber se dois eventos vistos como simultâneos por observadores que se acham em repouso serão também vistos como simultâneos por observadores que se acham em movimento. Imaginemos que um observador em repouso está colocado ao meio da distância entre dois relógios e que, ao iniciarmos a experiência, um observador, que se acha em movimento, passa por esse mesmo ponto intermediário. Ambos os relógios que se acham em repouso indicam as 7 horas e, de acordo com o estabelecido, um sinal luminoso é emitido do ponto em que se encontra cada qual dos relógios. Ao observador que está em repouso e a meia distância entre os relógios, os dois sinais chegam, simultaneamente, pouco após emitidos. Entretanto, do ponto de vista do observador que se acha em movimento, o mesmo não acontece. Como este observador se está aproximando de um

dos pontos de emissão do sinal luminoso e se afastando do outro, a distância que o primeiro percorre antes de a ele chegar é menor que a distância percorrida pelo segundo sinal, e como, nos termos do princípio de constância, ambos os sinais caminham à mesma velocidade, o primeiro sinal atinge o observador antes do segundo. Esse observador em movimento afirmará que os sinais não são simultâneos e que os relógios não estão sincronizados. Conseqüentemente, o observador em movimento e o observador em repouso discordarão quanto às indicações dos relógios. O “tempo” em um referencial que se move diferirá do “tempo” em um referencial que se acha em repouso. Assim é — como conseqüência de a luz não ter velocidade infinita. Até Einstein proceder a essa análise, admitia-se tacitamente que a marcha de um relógio fosse a mesma, estivesse ele ou não em movimento. Havendo provocado o problema, Einstein avançou, para estabelecer a fórmula matemática suscetível de predizer como a marcha de um relógio em movimento se relaciona com a de um relógio em repouso. Essa tarefa é executada com recurso tanto ao princípio da relatividade quanto ao de constância. Reveste-se, do ponto de vista matemático, de extraordinária simplicidade. A lógica é sutil, mas não há uma única fórmula matemática impossível de ser compreendida por alguém conhecedor da álgebra ensinada na escola secundária.

Consideraremos, adiante, outras conseqüências decorrentes da teoria da relatividade, mas, agora, faremos algumas observações adicionais acerca da relatividade do tempo. Aduziremos, inicialmente, um argumento qualitativo para demonstrar que a marcha de um relógio em movimento é mais lenta que a de relógios em repouso. Para esse fim, imaginemos um tipo de relógio particularmente simples. Consideremos dois espelhos separados por certa distância e admitamos haver colocado um sinal luminoso entre os espelhos. A luz caminhará repetidamente entre os espelhos em períodos regulares, de vez que sua velocidade é constante. (Podemos imaginar que os espelhos se encontrem postos em vácuo.) Em princípio, trata-se de um bom relógio e podemos fazê-lo tão preciso quanto o desejarmos, bastando reduzir a distância entre os espelhos. Suponhamos, agora, que prendemos os espelhos às paredes de algo que se pode mover, de sorte que estando os espelhos na vertical, deslocamos todo o sistema ao longo da horizontal, segundo ângulos retos em relação à linha que liga os espelhos. Em seguida, contemplemos, do ponto de vista do referencial de repouso, esse aparelho algo bizarro. Admitamos que a luz parte do espelho que se acha na posição inferior. Se o aparelho estivesse em repouso, a luz, para atingir o espelho que se encontra na posição superior, teria simplesmente de percorrer o segmento de reta perpendicular ao espelho inferior. Não obstante, estando os espelhos a movimentar-se em relação a nós, observamos que, para atingir o espelho superior — que está em movimento —, a luz parte do espelho inferior segundo certo ângulo. Com efeito, para completar o trajeto de ida e volta, a luz terá — para nós que a

contemplamos de uma posição de repouso — de percorrer um trajeto triangular que é, evidentemente, mais longo do que o caminho que seria percorrido se o sistema estivesse em repouso, relativamente a nós. Como, de acordo com o princípio da constância, a velocidade da luz é a mesma em ambos os sistemas de referência, poderíamos sentir-nos inclinados a dizer que o tempo necessário para o trajeto de ida e volta é mais longo no “relógio” que se encontra em movimento. Sustentaríamos, em consequência, que o período desse relógio é mais longo quando ele se encontra em movimento do que quando se acha em repouso. É fácil, recorrendo a não mais que o teorema de Pitágoras, dar feição quantitativa a esse argumento e chegar à expressão matemática da relação que se estabelece entre os dois relógios.¹¹ Essa expressão é e deve ser idêntica à indicada por Einstein como expressão geral do comportamento de qualquer relógio, pois nada nos argumentos de Einstein se coloca na dependência de como sejam construídos os relógios. Uma característica dessa expressão é particularmente interessante — deixa de ter sentido se o relógio em movimento se desloca a velocidade superior à da luz. Dito em termos de maior exatidão: o período do relógio em movimento, aos olhos de um observador em repouso, vai-se tornando mais e mais longo, na medida em que a velocidade desse movimento se aproxima da velocidade da luz; e, se o relógio pudessem atingir a velocidade da luz, seu período, aos olhos do observador em repouso, tornar-se-ia infinito. Conseqüentemente, a velocidade da luz é um limite natural da velocidade, dentro do âmbito da teoria, e isso é o que se faz necessário para evitar o paradoxo que se patenteou ao Einstein de dezesseis anos.

Importa acentuar, neste passo, que, nos termos do princípio de relatividade, um observador colocado sobre o relógio que se desloca em movimento uniforme não chega a notar esse movimento. Em razão disso, qualquer observador, que em tal posição se coloque, afirmará ser o seu o relógio que está medindo o tempo “correto”, ou “verdadeiro”, e que o relógio que se move em relação ao primeiro sofre atraso.

Embora esses argumentos sejam perfeitamente corretos, não devemos pretender verificá-los recorrendo a um relógio de pulso de uso comum. Tal como vimos, esses efeitos da relatividade são, tipicamente — nesse caso — da ordem de magnitude do quadrado da velocidade do reló-

¹¹ De imediato se percebe que, se a distância entre os dois espelhos é L , o período do “relógio” em repouso é $2L/c$, enquanto que o período do mesmo “relógio” à velocidade v é dada por

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

que sempre é maior do que $2L/c$ e se torna infinitamente grande na medida em que v se aproxima da velocidade da luz, c .

gio em relação ao quadrado da velocidade da luz. Recorrendo à fórmula de Einstein, há como demonstrar que se o relógio se movesse, por exemplo, com velocidade igual à metade da velocidade da luz, isto é, a aproximadamente 150.000 quilômetros por segundo, ele acusaria um atraso de mais ou menos treze por cento. Assim sendo, para as velocidades observadas na Terra — quando muito umas poucas centenas de quilômetros por hora — o efeito é, do ponto de vista prático, desprezível.

Em seu trabalho, Einstein apresenta curioso exemplo para dar realce ao princípio. Imagina dois relógios idênticos, um colocado no Pólo Norte e outro no Equador. Assinala que o relógio posto no Equador marcará uma pequena fração de um por cento mais lentamente que o outro, em virtude da rotação da Terra. E para que não se guarde a impressão de que tudo isto não passa de especulação vazia, é importante assinalar que, na Física de alta energia das partículas elementares, esse retardamento desempenha papel de relevo e de fácil observação. As chamadas partículas elementares são, em sua maioria, instáveis. Essas partículas se transformam em partículas estáveis e têm o que se denomina “meia vida” — tempo necessário para que metade de dada amostra se desintegre. Essa meia vida corresponde ao período de um tipo de relógio e, conseqüentemente, nos termos da teoria, uma amostra em movimento deveria desintegrar-se com meia vida mais longa do que a da amostra em repouso. Os grandes aceleradores produzem essas partículas aos milhões e, quando emergem do acelerador, deslocam-se, freqüentemente, a velocidades que só por mínimas frações de um por cento diferem da velocidade da luz. É possível medir a meia vida desse feixe de partículas e compará-la com a meia vida de amostra equivalente de partículas idênticas que, mantidas em repouso, vieram a sofrer desintegração. As duas “meias vidas” diferem substancialmente e o resultado se põe em perfeita concordância com a teoria da relatividade (Por motivos de conveniência, o que os físicos denominam meia vida é o valor desta grandeza supondo a amostra em repouso.)

O leitor que pela primeira vez depara com essas idéias deverá experimentar, sem dúvida, certa sensação de perplexidade diante dos processos aparentemente complexos e sutis do universo natural. Seria de esperar que ele experimentasse, ao mesmo tempo, a sensação de beleza e mesmo de “simplicidade” das leis que governam esses processos. O próprio Einstein certa vez disse: “Raffiniert ist der Herr Gott, aber boshaft ist er nicht” — Deus é sutil, mas não é malicioso. Ao longo de toda a vida, Einstein jamais se cansou de simplificar e emprestar elegância à formulação de suas idéias. A esse respeito é típica a seguinte referência. Em 1943, Einstein foi procurado pelo Book and Author Committee of the Fourty War Loan, que lhe sugeriu — caso ele ainda conservasse o manuscrito do trabalho de 1905, e não fizesse objeção — fosse esse documento leiloadado a fim de serem conseguidos fundos para o esforço de guerra (o documento seria posteriormente conservado na Biblioteca do Congresso norte-

americano). Einstein estava, em princípio, perfeitamente de acordo, mas o manuscrito havia sido destruído em Berna, em 1905, logo depois de publicado o trabalho, pois o autor não imaginara, na época, pudesse o documento vir a ser valioso. Einstein dispunha, entretanto, do manuscrito de um novo trabalho intitulado Bivector Fields II, escrito em colaboração com o professor V. Bargmann, de Princeton. (No dia 4 de fevereiro de 1944, esse manuscrito foi vendido, em leilão pró-esforço de guerra, por cinco milhões de dólares, a W. T. Kemper e encaminhado à Biblioteca do Congresso.) Einstein exibiu o novo manuscrito e, sentindo o desapontamento do visitante, fez-lhe uma sugestão. Ele, Einstein, copiaria à mão o artigo de trinta páginas, publicado em 1905, nos *Annalen der Physik* que poderia ser vendido como um fac-símile. (No mesmo leilão acima referido, foi esse documento vendido à Kansas City Insurance Company por seis e meio milhões de dólares e também entregue à Biblioteca do Congresso norte-americano.) Einstein pediu a sua secretária, Helen Dukas, que relesse o trabalho de 1905, pois havia esquecido a forma de colocação dos vários argumentos. E suspendeu a leitura a certo ponto para indagar se era exatamente aquilo o que ele havia escrito. Recebendo resposta afirmativa, observou que se dava conta, naquele momento, de que poderia ter apresentado o assunto de maneira mais simples.

2. Relatividade, gravitação e cosmologia

v. Einstein quando era jovem

No dia 28 de novembro de 1915, o físico alemão Arnold Sommerfeld recebeu, afinal, em Munique, resposta a várias cartas que havia endereçado a Albert Einstein, que se achava, então, em Berlim. Einstein lhe dizia:

“Durante o mês passado, vivi um dos períodos mais excitantes e trabalhosos de minha vida e é verdade que também um dos mais frutíferos. Escrever (cartas) estava fora de cogitação.

Convenci-me de que todas as minhas equações de campo de gravitação careciam inteiramente de base. Surgiram, para substituí-las, os seguintes pontos de partida... Após haver desaparecido toda a minha confiança na teoria anterior, percebi claramente que uma solução satisfatória só poderia ser encontrada se estabelecida ligação com a teoria universal das covariantes, elaborada por Riemann. O resultado final é o seguinte...

A sensação maravilhosa que experimentei surgiu do fato de que não somente resultou, como primeira aproximação a teoria de Newton, mas que resultou ainda, como segunda aproximação, a variação do periélio de Mercúrio (43" por século). A medida da deflexão da luz pelo Sol apontou resultado duplo em relação ao anterior”.

Einstein havia acabado de criar a “teoria geral da relatividade”, em contraposição à “teoria especial da relatividade”, assunto de que se ocupara seu trabalho de 1905. Essa teoria, que aos olhos de muitos físicos é a mais perfeita e, esteticamente, a mais bela criação da história da Física e talvez de toda a ciência, substituiu a teoria da gravitação universal, formulada por Newton. Esclareceu algumas anomalias observadas em órbitas planetárias — o “periélio” de Mercúrio conduziu a novas predições — o fato de que os raios luminosos se curvam por força da atração gravitacional do Sol; tornou-se o fundamento de toda a moderna cosmologia, inclusive a idéia do universo em expansão; e atualmente — com a descoberta das “pulsars” e a imaginada existência de “buracos negros” de gravitação — constitui-se em centro do interesse científico. Sua metodologia é tão diversa de tudo quanto se fez antes ou depois que, ainda agora, passado meio século, não se percebe claramente como acomodá-la ao resto da Física. Pouco surpreende que, em suas próprias palavras, Sommerfeld haja reagido “algo incredulamente”. Ao que Einstein respondeu, em um cartão

postal datado de 9 de fevereiro de 1916: “Da teoria geral da relatividade você se convencerá assim que a tiver estudado. Não vou, portanto, defendê-la com uma única palavra”.

Ao tempo dessa correspondência, Einstein tinha trinta e seis anos. Era amplamente reconhecido pelos cientistas seus contemporâneos como um gênio criador de primeira qualidade. Em verdade, poucos anos antes, Max Planck, pai da teoria quântica e um dos maiores físicos do mundo, havia escrito uma carta de recomendação em favor de Einstein — que na ocasião pleiteava um trabalho em Berlim — carta na qual se contém a seguinte sentença: “Se a teoria de Einstein (a teoria especial da relatividade) vier a mostrar-se correta, como espero que venha, ele será considerado o Copérnico do século XX”. O público, de modo geral, vinha, com efeito, começando a reconhecer o alcance e a emprestar valor à obra de Einstein.

A vida pessoal de Einstein havia melhorado consideravelmente em relação a seus tempos de funcionário do Bureau de Patentes em Berna, quando se dedicava à Física no tempo livre após as oito horas diárias de trabalho. Era, agora, diretor do recém-fundado instituto de pesquisas físicas Kaiser Wilhelm e integrante da Real Academia Prussiana de Ciências, tendo o título de professor da Universidade de Berlim. (Não estava obrigado a compromissos acadêmicos oficiais e podia, a seu sabor, dividir o tempo entre pesquisa e ensino.) Tudo isso ocorrera em 1913. Nenhum dos acontecimentos exercera a menor influência sobre a maneira comum de Einstein viver. Não mostrava interesse pelos acontecimentos sociais, que se constituíam em porção essencial da vida de um grande Geheimrat alemão e, sob todos os aspectos — segundo Phillip Frank, que teve larga possibilidade de observação — lembrava especialmente um daqueles violinistas da Boêmia, que freqüentavam os cafés e restaurantes onde o próprio Einstein e o professor Frank passavam boa parte do tempo que tinham livre. Em seu livro, Frank refere o seguinte episódio que é, sem dúvida, característico:

Einstein sempre se preocupou com não ser uma pessoa que exigisse qualquer atenção especial.

Em certa ocasião, devia ele apresentar cumprimentos a um membro da Academia de Berlim. Não apreciava essas visitas formais, porém ouvira dizer que o professor Stumpf, conhecido psicólogo, tinha grande interesse pelo problema da percepção espacial. Einstein imaginou que seria possível discutir matéria de recíproco interesse, eventualmente relacionada com a teoria da relatividade e decidiu-se a fazer a visita. Esperando encontrar o professor em casa, procurou-o às onze horas da manhã. A empregada informou-o de que Herr Geheimrat não estava e perguntou-lhe se desejava deixar algum recado, ao que Einstein respondeu que não.

Não queria incomodar ninguém e voltaria mais tarde, no mesmo dia. “No entretempo”, disse ele, “estarei passeando no jardim”. As duas da tarde, Einstein voltou. “Oh!” disse a empregada, “Herr Geheimrat voltou, almoçou e como eu não lhe disse que o senhor voltaria, está agora repousando. “Não faz mal”, disse Einstein, “volto mais tarde”. Deu outro passeio no jardim e retornou às quatro horas. Dessa vez, pôde, afinal, encontrar-se com o Geheimrat. “Veja você”, disse Einstein à empregada “no fim, paciência e perseverança sempre encontram recompensa”.

...O Geheimrat e sua mulher sentiram-se felizes por ver o famoso Einstein e supuseram que ele fazia a visita de apresentação formal. Einstein, entretanto, pôs-se logo a falar de sua nova generalização da teoria da relatividade e explicou, em pormenor, suas relações com o problema do espaço. O professor Stumpf, psicólogo sem conhecimento matemático amplo, entendia muito pouco e raramente encontrava ocasião para um comentário colateral. Depois de haver falado cerca de quarenta minutos, Einstein lembrou-se de que deveria estar fazendo uma visita formal de apresentação e que já se havia demorado muito. Alegando que era tarde, retirou-se. O professor e a mulher estavam estarecidos, pois não tinham tido oportunidade nem mesmo para formular as perguntas convencionais. “Gosta de Berlim?”, “Como estão sua esposa e filhos?” e outras que tais.

Certa vez indaguei do professor Frank se o Einstein daquela época teria parecido “brilhante” em uma conversação ou em um colóquio de Física. Formulando essa indagação aparentemente estranha, considerava eu que mesmo os maiores físicos admitem certas classificações: alguns são apressados — outros não; alguns se tomam extremamente a sério — outros não; alguns têm grande senso de humor — outros não. Interessava-me saber como Einstein se colocava dentro dessa classificação. O Einstein dos anos de pós-guerra nos Estados Unidos da América — já sexagenário — havia assumido, com a naturalidade com que tudo assumia, a aura de um profeta do Velho Testamento. Em retratos, parece carregar, nos olhos, as dores do mundo, como um dos trinta e seis homens justos a que se refere o Talmud, homens em cujos corações Deus despejou “como em um receptáculo, todas as nossas aflições”. Em seus dias de juventude, entretanto, Einstein foi, como o diz o professor Frank, “brilhantíssimo” e muito dado a brincadeiras e gracejos. Havia nele inclinação decidida para a alegria e a boa disposição, combinada com profunda serenidade interna e com um impenetrável muro de reserva.

A impressão imediata que Einstein causava nos que o ro-

deavam tinha traços antagônicos. Agia como todos. O tom com que se dirigia às principais autoridades universitárias era o mesmo com que falava ao homem do armazém ou à limpadora do laboratório. Como resultado de suas grandes descobertas científicas, Einstein havia adquirido profundo sentimento de segurança íntima. Os problemas que lhe afligiram a juventude haviam desaparecido. Encontrava-se ele empenhado em trabalho a que iria dedicar a vida e pelo qual sentia pendor. Ao lado desse trabalho, os problemas da vida cotidiana perdiam importância. Em verdade, parecia-lhe difícil levá-los a sério. Suas atitudes, na relação com as outras pessoas, eram conseqüentemente, de modo geral, a de quem não lhes atribui importância. Os assuntos de todo dia apareciam-lhe sob aspecto algo cômico e essa maneira de ser transparecia, de alguma forma, em todas as palavras que dizia: seu senso de humor manifestava-se imediatamente. Quando alguém dizia coisas engraçadas, fosse ou não intencionalmente, Einstein animava-se, ao responder. A risada que brotava do fundo de seu ser constituía um de seus traços característicos e, de pronto, chamava atenção. Para os que o cercavam, essa risada era uma razão de alegria e lhes aumentava a disposição. Contudo, percebia-se, nesse riso, uma dose de crítica, que causava desprazer a alguns. Pessoas que ocupavam importantes posições na sociedade não desejavam, muitas vezes, sentir-se ligadas a um mundo cujo ridículo — comparado aos grandes problemas da natureza — se refletia naquela risada. Contudo, pessoas mais humildes sempre se agradavam da personalidade de Einstein.

A conversação de Einstein era, freqüentemente, uma combinação de pilhérias inofensivas e de exposição de ridículos, de sorte que certas pessoas não sabiam se deviam rir ou sentir-se ofendidas. Muitas vezes, a pilhéria estava em ele apresentar complicadas relações como se elas fossem acessíveis a uma criança inteligente. Essa maneira de ser era vista como uma crítica incisiva e, não raro, dava a impressão de ser cínica. Assim, a impressão que Einstein causava ia do ele ser capaz desde uma boa disposição infantil até a ser um cínico. Entre esses dois extremos coloca-se a figura de uma pessoa agradável e cheia de vitalidade, cuja companhia era estimulante. Uma segunda gama de impressões se estendia desde o ele parecer uma pessoa que se interessava profunda e apaixonadamente por qualquer estranho até o ele parecer uma pessoa que, a contato mais íntimo, imediatamente se recolhia em si mesmo.

A despeito do que o professor Frank denominou aparência “rabínica” de Einstein, ele conservou, até o fim da vida, o lado travesso e malicioso de sua personalidade: Abraham Pais, colega de Einstein em Princeton, visitou-o regularmente desde 1947 até mais ou menos seis meses antes de ele falecer:

Discutíamos Física; com muita freqüência, a discussão dizia respeito aos fundamentos da mecânica quântica. Muitas vezes, Godel, o lógico, esteve conosco. Embora não concordássemos muito, eu sempre experimentava um sentimento de satisfação, após esses encontros. Certa vez, contei uma anedota a que Einstein respondeu com a mais surpreendente gargalhada por mim ouvida. Era como o som produzido por uma foca. Risada feliz. Desde essa ocasião, procurei sempre ter uma boa pi-lhéria para contar em nossos encontros, a fim de gozar o prazer puro de uma risada de Einstein, risada que lhe iluminava o rosto e o fazia lembrar um menino que se deleitasse com uma boa travessura.

Voltemos ao início da vida de Einstein e aos passos que o levaram a seu emprego no Bureau de Patentes, em Berna. Como referi, Einstein fora admitido na Politécnica de Zurique em 1896, onde fez o curso mais ou menos irregularmente, em grande parte como autodidata e dedicando muito tempo a trabalhos de laboratório. Diversamente de muitos, talvez da maioria dos físicos teóricos, Einstein sentia-se à vontade nos laboratórios e durante toda a vida mostrou satisfação em lidar com aparelhagem científica. (Einstein jamais demonstrou interesse pelo xadrez ou por charadas matemáticas — formas comuns de recreação do físico teórico — mas gostava de imaginar como funcionavam invenções novas, e um de seus mais agradáveis ensaios de cunho popular, escrito em 1925, diz respeito à forma de operar de um recém-inventado barco — estranho engenho a, que foi dado o nome de seu inventor, Flettner, e onde o vento agia sobre cilindros rotatórios feitos de metal, que atuavam como velas.)

Nos últimos anos de vida, Einstein recordava a experiência que teve na Politécnica:

Disponha eu de excelentes professores — por exemplo, Horwitz Minkowski (que, ironicamente, daria depois significativas contribuições à matemática da teoria da relatividade) — de sorte que poderia ter recebido aprofundados conhecimentos matemáticos. Entretanto, eu passava a maior parte do tempo no laboratório de Física, fascinado pelo contato direto com a experiência. O restante do tempo eu usava principalmente para estudar, em casa, as obras de Kirchhoff, Helmholtz, Hertz, etc.... A dificuldade estava no fato de que era preciso armazenar tudo

(“all diesen Wust in sich hinein stopfen musste”) na cabeça, para os exames, fosse ou não fosse de nosso agrado. Essa obrigação tinha tal efeito paralisador (sobre mim) que, depois de vencido o exame final, pareceu-me desagradável, durante todo um ano, o exame de qualquer problema científico. Para ser justo, devo acrescentar que, na Suíça, sofríamos essa coerção, que asfixia toda verdadeira inclinação científica, muito menos que em outros lugares. Só havia dois exames; e, a não ser por eles, podia cada um fazer o que lhe agradasse. Especialmente se esse alguém, como era meu caso, tivesse um amigo que freqüentava regularmente as aulas e estudava conscienciosamente o que nelas era exposto. Isso dava liberdade de escolha de objetivos até uns poucos meses antes do exame, liberdade de que me valia amplamente, considerando o remorso um mal menor na troca que eu fazia alegremente... É, em verdade, quase um milagre não haverem ainda os modernos métodos de ensino estrangulado a sagrada curiosidade de investigação — essa delicada plantinha, além de estímulo, reclama especialmente liberdade; sem isso, se arruinará e perecerá infalivelmente. É erro seriíssimo pensar que o prazer de indagar e pesquisar possa ser despertado por coerção e por apelo ao sentimento de dever. Creio, ao contrário, que seria possível privar de sua voracidade um saudável animal de presa se, com ajuda de um chicote, fosse ele obrigado a comer continuamente, mesmo quando sem fome, em particular se o alimento fornecido compulsoriamente fosse especialmente escolhido para a ocasião.

Entre os colegas de Einstein, estava Mileva Maritsch (Maric), mulher de origem sérvia e grega ortodoxa, que ele depositou em 1903. Frequentavam ambos o curso da Politécnica, onde o objetivo primário era o formar professores de ciência. Em outras palavras, Einstein não se preparava para ser um físico, mas um professor secundário de Física. Recebia 100 francos (25 dólares) mensais, de um parente, e poupava 20 francos mensais com o fito de adquirir cidadania suíça, o que pôde finalmente obter, no cantão de Zurique, em 1901. Sua única esperança de conseguir formação avançada estava no tornar-se assistente de um dos professores da Politécnica ou de outra escola. A esperança se desvaneceu quando, após sua formatura, em 1900, seus professores deixaram de recomendá-lo para essa função. Conseguiu ele trabalho docente de caráter temporário em uma escola técnica superior em Winterthur, nas proximidades de Zurique — mas o trabalho só durou uns poucos meses. Respondeu a um anúncio de jornal, onde um professor de Schaffhausen pedia alguém para orientar jovens estudantes em uma escola interna. Também esse trabalho

durou pouco, pois Einstein convenceu aqueles de cuja orientação estava encarregado de que vinham recebendo uma educação asfixiante; e quando pediu que lhe fosse dada inteira responsabilidade pela formação dos meninos, viu-se despedido. Foi por essa época, em 1901, que Einstein encontrou o emprego no Bureau de Patentes, onde o admitiram, em caráter experimental, no mês de junho de 1902 e onde ele permaneceria os sete anos seguintes.

Dispunha ele, agora, de meios financeiros suficientes para casar-se. Em última análise, o casamento não foi bem sucedido — os Einsteins separaram-se em 1914 e divorciaram-se em 1919. Há várias versões a propósito da pessoa que Mileva foi. O professor Frank, que deve tê-la conhecido bem e que era perspicaz juiz de caracteres, escreve:

Ela era um pouco mais velha do que ele. A despeito de sua origem grego-ortodoxa, era livre-pensadora, de idéias progressistas, como a maioria dos estudantes sérvios. De natureza reservada, não tinha grande capacidade de pôr-se em contato íntimo e agradável com o que a rodeava. A personalidade diferente de Einstein, que se manifestava na naturalidade de seu comportamento e na feição interessante de suas conversas, colocava a mulher pouco à vontade. Havia algo de embotado e áspero em seu temperamento. Para Einstein, a vida com ela nem sempre era razão de paz e felicidade. Quando procurava discutir com ela as suas idéias, que eram abundantes, a resposta da mulher era tão breve que ele, com freqüência, sentia-se incapaz de saber se ela estava interessada ou não.

Tiveram dois filhos, Hans Albert, nascido em 1904 e hoje professor de engenharia hidráulica em Berkeley, e Eduard, nascido em 1910 e recentemente falecido. Em uma entrevista publicada há poucos anos, Hans Albert Einstein fez restrições à caracterização do professor Frank e replicou: “Severa? Áspera? Isso não é, em minha opinião, correto. Tratava-se de pessoa que muito sofrera, mas não áspera. Eu diria que tinha capacidade de dar... e que necessitava de amor. Isso indica pessoa que não se apoiava essencialmente no intelecto”.

O quadro que emerge desses anos iniciais é o de um jovem em grande parte autodidata, descomprometido de tradição religiosa ou apego nacional e, acima de tudo, acostumado, quase que desde a infância, a formular seus próprios juízos e de acordo com eles agir. Durante os anos que passou no Bureau de Patentes, trabalhou em condições que um cientista atual consideraria intoleráveis. Não mantinha contato com físicos profissionais, não tinha acesso a livros e revistas que seu trabalho reclamava, pois que estes não existiam no escritório de patentes, nem na biblioteca da Universidade de Berna. Não contava com a orientação de colegas

mais amadurecidos e não recebia estímulo de qualquer espécie. Em Física, tinha de confiar em si mesmo. Não havia a quem recorrer.

vi. Lorentz e Poincaré

É duvidoso que um físico de nossos dias deparasse com um trabalho escrito no estilo em que foi redigido o trabalho publicado por Einstein em 1905. A despeito do fato de que quase todas as idéias e muitas das fórmulas mostram, pelo menos, distante relação com o trabalho que vinha sendo executado por outros cientistas — notavelmente Lorentz e Henri Poincaré — não há uma única referência a qualquer deles. Com efeito, a similaridade — mais aparente que real — entre a obra de Einstein e a de seus predecessores imediatos, similaridade que seria apontada por qualquer redator competente de uma revista de Física, levou alguns historiadores da ciência a denegrir inteiramente as contribuições de Einstein. O mais notável exemplo é o dado por Sir Edmund Whittaker, eminente físico-matemático inglês, que escreveu um estudo, em dois volumes, acerca da história do éter e da eletricidade, estudo em que a contribuição de Einstein para a teoria da relatividade é sintetizada na sentença: “No outono do mesmo ano (1905)... Einstein publicou um trabalho que expõe a teoria da relatividade de Poincaré e Lorentz, com alguns acréscimos, tendo esse trabalho despertado grande atenção”. Desnecessário dizer que a breve observação de Sir Edmund também despertou “grande atenção” e muitos físicos tentaram explicar por que teria ele desentendido o que se passara. De maior interesse é a questão de saber por que, examinando superficialmente o trabalho publicado por Einstein em 1905, fica-se com a impressão de ele não haver estudado a obra de seus contemporâneos. Devido à maneira como ele vivia e à sua formação educacional e profissional, é plausível que não tenha tido conhecimento da maioria daquelas obras. Embora, poucos anos depois de publicado seu trabalho, Einstein mantivesse correspondência com muitos dos mais eminentes físicos europeus, ele, certa vez, observou que só aos trinta anos conheceu um verdadeiro físico. A única pessoa com quem discutia suas idéias era um engenheiro, Michelangelo Besso, também empregado do Bureau de Patentes, que Einstein havia conhecido desde seus dias de estudante em Zurique e que ele imortalizou na última sentença do trabalho de 1905: “Em conclusão, desejo dizer que, trabalhando no problema aqui focalizado, contei com o leal auxílio de meu amigo e colega, M. Besso, a quem sou devedor de várias sugestões valiosas.”

Essas questões poderão ser enfrentadas de maneira direta, se tivermos em conta a Física do “tempo” e compararmos a abordagem de Einstein com a de seus contemporâneos. Os físicos do século XIX herdaram o vago conceito de “tempo absoluto” (e também de “espaço absoluto”), que podemos fazer remontar à Física apoiada no bom senso, que os gregos

cultivaram. Basta comparar o que diz Aristóteles na Física — “a passagem do tempo decorre de maneira semelhante onde quer que seja e está em relação com tudo” — com o celebrado primeiro Scholium dos Principia de Newton — “O tempo verdadeiro, absoluto e matemático, de si mesmo e por sua própria natureza, flui invariavelmente, sem relação com qualquer coisa externa e admite também o nome de duração...” Esse “tempo absoluto” de cuja existência Newton não tem dúvida é por ele comparado com o “tempo relativo, aparente e comum” que é “qualquer medida razoável e externa (seja acurada ou aproximada) da duração, por meio de apelo ao movimento, comumente usada em lugar do tempo verdadeiro, sendo exemplos a hora, o dia, o mês, o ano”. Em outras palavras, Newton procurou distinguir entre o tempo “comum”, que é medido por meio de relógios, e o tempo “absoluto”, cuja existência primária repousava na consciência de Deus. Pressionado para esclarecer essa distinção — tal como ele o foi na famosa correspondência entre Leibniz e o reverendo Samuel Clarke, capelão do Príncipe de Gales e protegido de Newton — este se recolhia a uma posição de impenetrável misticismo teológico. Na quarta resposta que deu a Leibniz, Clarke, certamente com a aprovação de Newton, escreveu: “... o espaço e a duração não estão hors de Dieu, mas são conseqüências imediatas e necessárias de Sua existência”.¹² Um leitor moderno, que estudasse a correspondência mencionada, quase certamente concluiria que, de um ponto de vista científico, Leibniz, para quem espaço e tempo eram, desse ponto de vista, mais ou menos despidos de significado, ficou em posição vantajosa no debate. E, não obstante, pela primeira vez na história do homem, havia sido criada uma teoria — a de Newton — que habilitava a calcular e predizer quase tudo e, assim, pouco surpreende que houvesse um travo de impaciência na atitude de Newton, semelhante ao que está presente na atitude de Deus quando responde às não descabidas indagações de Jó, perguntando-lhe: “Onde estavas tu quando eu assentei os alicerces do mundo?”

Nos dois séculos seguintes, na medida em que a teoria de Newton se desenvolvia e expandia, esquecia-se a sua infra-estrutura teológica e, em Física, “explicação” tornou-se sinônimo de redução dos fenômenos físicos a modelos mecânicos newtonianos. Isso, como vimos, sofreu dramática alteração quando, concretizando predição de Maxwell, Hertz demonstrou a existência de ondas eletromagnéticas que se propagavam no espaço vazio. Do ponto de vista mecânico, segundo o qual a compreensão de qualquer fenômeno dependia de um modelo mecânico, esse fenômeno era “incompreensível”; conseqüentemente, postulou-se que um meio mecânico, o “éter”, era a sede dessas vibrações. Tal como alguém observou: “O Éter transformou-se em sujeito do verbo oscilar.” Vimos, contudo, que esse

¹² Arnold Koslow, org., *The Changeless Order*, 39, 73. Esse livro é repositório útil da literatura historicamente importante acerca de espaço e tempo.

quadro sofreu contestação quando Michelson e Morley falharam ao tentar identificar o movimento da Terra através do éter, embora a teoria previsse claramente que esse movimento deveria ser observável nas condições em que fora realizado o experimento. Para preservar a concepção do éter, FitzGerald e, independentemente dele, Lorentz foram levados a imaginar que, em movimento, os objetos materiais se contraíam; assim, por exemplo, uma barra de um metro de extensão, posta em movimento, se reduziria de uma quantidade que, em primeira aproximação, equivaleria à ordem de grandeza do quadrado da velocidade da barra em relação ao quadrado da velocidade da luz. Esse é um número reduzidíssimo, em comparação com as velocidades normais na Terra — a razão é de apenas um para cem milhões — e mesmo em comparação com o movimento relativamente rápido de translação da Terra em relação ao Sol. Assim sendo, Lorentz e FitzGerald não estavam reclamando uma contração de grandes proporções. Entretanto, da maneira como Lorentz via a situação, o problema consistia — para ele e para Poincaré — em explicar essa contração, referindo-a a algum tipo de modelo de objetos materiais. Lorentz propôs uma explicação da contração em termos de um modelo eletromagnético de matéria, no qual os objetos materiais eram tomados como partículas carregadas — “elétrons” — situadas no éter. Essas partículas atuavam umas sobre as outras com a força eletromagnética de Lorentz, e Lorentz imaginava que, entrando em movimento esse sistema, essas forças atuavam sobre o éter estacionário e se modificariam de forma a produzir a contração.

Durante dez anos, Lorentz deu desenvolvimento a essa idéia e, em 1904, publicou trabalho intitulado “Fenômenos Eletromagnéticos em um sistema que se move a qualquer velocidade inferior à da luz”, onde se contém a mais elaborada versão de sua teoria. Nesse trabalho, presumiu ele que os elétrons são esferas carregadas que, ao entrarem em movimento, contraem-se e tornam-se elipsóides. Com base nessa contração básica, procurava ele explicar a contração total dos objetos materiais compostos de elétrons.¹³ Ao longo de sua argumentação, pareceu-lhe útil introduzir um novo conceito, a que ele denominou “tempo local”. Tal como a via Lorentz, essa introdução era uma espécie de artifício matemático para simplificar as equações — equações de Maxwell — quando da efetivação de

¹³ Séria objeção a esse modelo — levantada por Poincaré — foi a de que não se dava explicação a propósito do que mantinha unidas as esferas. Sabemos, hoje, que, além das forças elétricas, há “forças nucleares”, responsáveis por manter compacto o núcleo atômico. Se existissem apenas forças elétricas, o núcleo nunca poderia ser estável.

cálculos concernentes a objetos materiais em movimento.¹⁴ Não tentou ele atribuir qualquer significado experimental ao “tempo local”. O tempo “verdadeiro” — único tempo, segundo ele, dotado de significação física — era o tempo medido por um observador em repouso no éter. Inicialmente, em época anterior a 1904, Lorentz havia apresentado uma versão aproximada dessa transformação do tempo em repouso para o “tempo local”, válida para velocidades que, comparadas à da luz, eram reduzidas; em seu trabalho de 1904, formulou ele uma lei exata de transformação, válida para quaisquer velocidades inferiores à da luz. Essas transformações desempenham papel importante no cálculo de Lorentz, mas, basicamente, atuam como auxiliares matemáticos de significação física obscura. Só após a publicação do trabalho de Einstein, em 1905, é que se tornou claro o real significado das transformações de Lorentz.

O que em relação a Poincaré ocorreu tem caráter mais complexo. Quando se lê, por exemplo, uma conferência como “Princípios de Física Matemática”, pronunciada por Poincaré no Congresso Internacional de Artes e Ciências promovido na cidade de St. Louis em 1904 — um ano an-

¹⁴ As transformações que Lorentz introduziu assumem a forma (x, y e z são coordenadas de posição, medidas com relação aos três eixos espaciais que se encontram em ângulos retos e t é o tempo)

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

quando as transformações se referem a um sistema que se move na direção x, com a velocidade v. A quantidade t' é o que Lorentz denominou “tempo local”. Mostrou ele que as equações de Maxwell têm a mesma forma no sistema transformado e no sistema x, y, z, t. Tal sistema era, para Lorentz, o éter em repouso absoluto. Para simplificar os cálculos, ele usou a invariância das equações de Maxwell. Traço curioso do trabalho publicado por Maxwell em 1904 está em não haver exame explícito a propósito de como conciliar o fato de ele referir-se apenas a velocidades menores que a da luz com o estar usando a lei newtoniana da força, F = ma. O que Lorentz demonstrou foi que as esferas contraídas, quando em movimento, viam aumentada a inércia em relação à que existia em estado de repouso, o que tornava mais difícil acelerá-las na medida em que a velocidade se tornava maior. Como veremos, tudo isso se esclareceu com o trabalho publicado por Einstein em 1905, pois ele mostrou que esse aumento da massa efetiva era uma consequência geral do princípio da relatividade e nada tinha a ver com qualquer específico modelo de matéria.

tes do trabalho de Einstein — tende-se a perguntar continuamente e com espanto por que Poincaré não criou a teoria da relatividade. Faz ele, antes de tudo, lúcida apresentação do “princípio da relatividade”.

O princípio da relatividade é aquele segundo o qual as leis que regem os fenômenos físicos devem ser as mesmas, esteja o observador em repouso ou se deslocando em movimento uniforme de translação; nesses termos, não dispomos e não podemos dispor de quaisquer meios de distinguir entre estarmos ou não estarmos nos deslocando segundo esse movimento.

Poincaré passa a citar as provas da afirmação e, em particular, o trabalho de Michelson, que “levou a precisão a seus limites extremos”. Contudo, na sentença seguinte, Poincaré esclarece o que aparta seu pensamento do pensamento de Einstein. O princípio da relatividade reclama explicação “para o que se vêem os matemáticos, hoje em dia, compelidos a utilizar todo o engenho”. Isso, ao ver de Poincaré, era o que Lorentz tentava, apelando para a explicação dinâmica da contração, embora, ainda ao ver de Poincaré, Lorentz haja recorrido a número excessivo de hipóteses arbitrárias. Passa ele a examinar o “tempo local” de Lorentz e assinala que pode ser entendido, em termos de uma análise da simultaneidade, segundo linhas que lembram as de Einstein. Além disso, tem ele clara visão do fato de que, se as transformações de Lorentz cessam de ser aplicáveis quando as velocidades em pauta excedem às da luz, impõe-se a criação de uma nova teoria mecânica — para substituir a de Newton — onde essa característica seja tida em conta. “Talvez devamos construir toda uma nova mecânica, da qual, até agora, só pudemos ter rápida visão, onde, aumentando a inércia na medida em que a velocidade aumenta, a velocidade da luz se colocaria como limite intransponível”. Dois parágrafos adiante, a conferência termina, permanecendo a “mecânica nova” como esperança e conjectura não concretizadas.¹⁵

Ao criar a “nova mecânica”, Einstein, para dizê-lo em termos simples, teve em conta muitos dos pontos referidos. Antes de tudo, descartou-se inteiramente do éter.

“Para a mecânica permanecer como fundamento da Física era preciso interpretar mecanicamente [isto é, em termos de éter] as equações de Maxwell. Isso foi tentado empenhada, mas infrutiferamente, enquanto as equações se mostravam crescen-

¹⁵ A contribuição dada por Poincaré à teoria da relatividade traduziu-se pela descoberta de que as transformações de Lorentz formam um grupo. Significa isso que, quando se combinam duas sucessivas transformações de Lorentz, a transformação resultante continua a ser uma transformação do tipo Lorentz. A esse grupo denomina-se, hoje, grupo de Poincaré.

temente úteis. Tornava-se habitual operar com esses campos [elétricos e magnéticos] tomando-os como entidades independentes, sem necessidade de explicá-los em função de uma natureza mecânica. Assim, quase imperceptivelmente, deixava a mecânica de ser vista como base da Física, pois sua adaptação aos fatos mostrava-se, ao final, impossível”

A única menção ao éter que figura no trabalho publicado por Einstein em 1905 contém-se na famosa sentença do segundo parágrafo:

“A introdução de um éter luminífero mostra-se supérflua, de vez que a concepção aqui exposta não requer um ‘espaço absolutamente estacionário’.” Em segundo lugar, nos termos da formulação de Einstein, o princípio da relatividade não é algo a ser deduzido da teoria, mas é, antes, algo que integra a base axiomática da teoria de onde serão deduzidas consequências. Isso não significa impossibilidade de o princípio da relatividade ser experimentalmente verificado. Se as consequências dele deduzidas contrariarem o experimento, poderemos concluir que o princípio é falho.

À do princípio da relatividade Einstein acrescentou uma segunda hipótese, qual seja a de que, no vácuo, a velocidade da luz é, como ele diz, “uma constante universal”, com o que pretendia significar que essa velocidade é sempre a mesma, independentemente da velocidade com que a fonte luminosa se mova em relação ao observador. Convém acentuar — pois o ponto é, freqüentes vezes, mal enunciado — que essa “constância” de velocidade da luz só se manifesta entre sistemas de referência que, um em relação ao outro, se deslocam segundo movimento uniforme. Um observador que esteja sujeito a aceleração relativamente à fonte luminosa assinalará para a luz uma velocidade menor que a registrada num sistema de referência que se ache em repouso. Como já sublinhamos, Einstein deu-se conta de que essas duas hipóteses se contradiziam — caso correto a mecânica newtoniana. Contudo, a mecânica newtoniana parte do pressuposto de um tempo absoluto. Isso é o que leva à contradição, nos termos seguintes: imaginemos uma onda luminosa que se propaga com a velocidade da luz e imaginemos um veículo capaz de deslocar-se a, digamos, metade dessa velocidade, medida com respeito à Terra. Segundo as leis de Newton, teremos que, vista do veículo, a velocidade relativa da luz é de apenas metade em relação à velocidade registrada pelo observador postado na Terra. Esse “teorema da adição”, próprio do sistema newtoniano, decorre, como é possível mostrar facilmente, do conceito de tempo absoluto e leva a um resultado que se põe em contradição com o pressuposto de que a velocidade da luz é uma constante universal. Na Física newtoniana, através de um deslocamento cada vez mais rápido, pode-se chegar à velocidade da luz e, assim, a velocidade da luz será diferente para observadores que se achem em diferentes situações de movimento relativo. Pa-

ra evitar esse estado de coisas, Einstein foi levado a contestar a base epistemológica onde se assenta a presunção de um tempo absoluto e, tal como já referimos, concluiu que o conceito era falho. Posto de parte o tempo absoluto, não há contradição aparente entre as duas hipóteses e abre-se caminho para delas se retirar quaisquer conclusões que pareçam cabíveis.

Uma das primeiras conseqüências a serem apontadas no trabalho de Einstein dizia respeito às equações de transformação de Lorentz (que Einstein não conhecia). Do ponto de vista de Einstein, o “tempo local” não é um artifício matemático, mas é inerente à noção do tempo como algo medido pelos relógios. Tal como já fizemos sentir, embora seja possível sincronizar relógios em repouso que se achem separados por grandes distâncias, esse mesmo procedimento leva à conclusão de que relógios em movimento não se sincronizam com respeito a relógios em repouso e que, vistos por um observador em estado de repouso, os relógios em movimento “se atrasam” — têm períodos mais longos.

Dos argumentos de Einstein emerge também a contração Lorentz-FitzGerald. Do ponto de vista da relatividade einsteiniana, essa contração não se faz necessária para explicação do experimento Michelson-Morley, pois o experimento é montado em um referencial que, do ponto de vista prático, pode ser visto como algo não sujeito a aceleração. Conseqüentemente, e conforme a teoria, não é de esperar qualquer efeito decorrente de movimento e nenhum efeito se observa. Contudo, a contradição se manifestaria se descrevêssemos o experimento do ponto de vista de um observador postado no Sol. Visto do Sol, o aparelho de Michelson, colocado na Terra, estaria em movimento uniforme e o braço do interferômetro paralelo à direção do movimento se contrairia, tal como previsto pela contração Lorentz-FitzGerald.¹⁶ “A contração não é, contudo, nos termos da teoria de Einstein, atribuível a qualquer particular modelo de forças que esteja mantendo ligada a matéria, mas é, antes, traço característico de uma cuidadosa definição operacional do que seja “comprimento”.

A contração de “comprimento” se insere no processo pelo qual os comprimentos são medidos pelas réguas, assim como o processo de dilatação do “tempo” nada tem a ver com a construção material de determinado relógio, mas com o processo de comparação das indicações dadas pelos relógios. Em termos diretos: todo modelo de matéria consistente com os postulados de Einstein deve apresentar a contração de Lorentz. As

¹⁶ A dilatação relativista do tempo se incluiria também nessa descrição, pois que relógios em movimento e relógios em repouso marcham diferentemente. Percebe-se que, sem a inclusão da transformação de tempo, diferiria a velocidade da luz nos dois sistemas, violando-se o princípio da constância. Em outras palavras, embora com base apenas na contração de Lorentz seja possível “explicar” o experimento de Michelson, isso só ocorreria se a velocidade da luz fosse dependente do referencial considerado.

equações de Maxwell são invariantes por transformações de Lorentz, sendo esta a maneira matematicamente precisa de dizer que elas satisfazem o princípio da relatividade. Conseqüentemente, um modelo eletrodinâmico deve conter, como característica, a contração de Lorentz. E o mesmo acontecerá com todo outro modelo relativisticamente invariante. É difícil constatar a contração de Lorentz através de experimento direto, mas são abundantes as verificações indiretas. Como a velocidade é a razão da distância para o tempo, e como tanto a distância quanto o tempo são afetados pela contração de Lorentz, seria de esperar que também a velocidade fosse afetada. Tal é o que ocorre, e o teorema de adição para velocidades, devido a Newton, é alterado de forma tal que qualquer velocidade acrescentada à velocidade da luz continua a ser a velocidade da luz — e isso é uma forma de dizer que um objeto material não pode caminhar mais rapidamente que um raio de luz.¹⁷

No trabalho de Einstein, esses resultados aparecem como decor. rência de argumentos simples, de ordem geral, e não como consequência de cálculos exaustivos do tipo a que estavam habituados os contemporâneos de Einstein. Para a maioria destes, foi isso o que, de início, tornou difícil a compreensão do que Einstein fazia. Não somente havia ele chegado a resultados novos, como havia também inaugurado uma nova forma de pensar acerca de problemas físicos.

¹⁷ Em mecânica newtoniana, a velocidade relativa é dada por

$$w = c - v$$

enquanto que, na teoria da relatividade, é dada por

$$w = \frac{c - v}{1 - v^2 / c^2} = c$$

c2 significando que, vista. do veículo em movimento, a velocidade da luz é sempre c. O primeiro exame que Einstein fez da contração de Lorentz envolvia uma régua cujas dimensões físicas reais foram consideradas desprezíveis — um normalizador arbitrariamente pequeno. Em 1959, o físico J. Terrell publicou um trabalho intitulado “Invisibility of Lorentz Contraction”, *Physical Review*, 116 (1959), 1041, onde indagou o que seria realmente visto se, digamos, um cubo se movesse diante do observador com velocidade próxima à da luz. Através de complexo argumento, que envolve ótica relativista, chegou ele à conclusão de que o cubo não apareceria achatado, mas girado, se, admitamos, fosse visto de lado. Isso não se opõe à contração de Lorentz, que, em verdade, está presente no argumento desenvolvido, mas é consequência do fato de que uma luz emitida simultaneamente de várias partes de um objeto de tamanho finito leva diferentes quantidades de tempo para atingir o observador, pois cada raio de luz percorre uma distância diferente. Quando esses diferentes raios luminosos se integram para produzir uma imagem, o cubo relativista aparece girado e cúbico.

vii. $E = mc^2$

Um dos mais significativos aspectos do trabalho publicado por Einstein em 1905 foi o de dar natural unidade aos conceitos de eletricidade e magnetismo. Essa unificação está presente nas equações de Maxwell, mas a teoria da relatividade proporciona maneira nova de encará-la. Clara ilustração desse ponto decorrerá de considerarmos um elétron isoladamente. Se nos encontrarmos em repouso com respeito a esse elétron, ele produzirá uma força elétrica pura. Poderemos verificá-lo tomando um outro elétron — inicialmente em repouso com respeito ao primeiro — e observando que essas partículas se repelem — cargas iguais sempre se repelem de acordo com a lei de Coulomb — nome dado em honra do físico francês que a formulou em 1785. (A lei muito se assemelha à lei da gravitação, de Newton, no sentido de que a força é função do produto das cargas elétricas dividido pelo quadrado das distâncias que as separam, ao passo que a lei de Newton diz que a força gravitacional — que tem sempre o caráter de atração — é função do produto das massas dividido pelo quadrado das distâncias que as separam.) Não obstante, uma vez em movimento o elétron, a força elétrica se altera e, a par disso, o elétron passa a gerar força magnética. O fato era conhecido antes da teoria da relatividade, mas, em seu trabalho, Einstein demonstra como essas duas situações se relacionam entre si, de maneira simples, por uma transformação de Lorentz. Em outras palavras, eletricidade e magnetismo são, em essência, o mesmo fenômeno — ou diferentes aspectos do mesmo fenômeno — e o aspecto que recebe realce depende da velocidade do observador relativamente ao elétron. Antes de Einstein, isso tinha sido parcialmente percebido, sob vários ângulos, com base nas equações de Maxwell e em modelos especiais para elétrons, mas só após o surgimento da teoria einsteiniana é que se compreendeu amplamente a conexão existente entre eletricidade e magnetismo.

Em verdade, Einstein entreviu algo mais, que se revelou de grande importância para a verificação da teoria. Dito de maneira simples: qualquer elétron em movimento ou qualquer objeto em movimento passa a ter massa maior quando se desloca em relação a um observador do que quando se encontra em repouso relativamente a esse mesmo observador. Na medida em que a velocidade desse objeto se aproxima da velocidade da luz, sua massa se torna infinita! Não há dúvida de que isso parece estranho, apesar de o leitor, pelo que foi dito antes, achar-se preparado para acreditar em qualquer coisa. A idéia comum a propósito de massa é que ela representa a quantidade de matéria que se contém em um objeto. Como pode a quantidade de matéria alterar-se simplesmente pelo fato de o objeto colocar-se em movimento? Ocorre, porém, que “quantidade de matéria” não é, em termos exatos, o que os físicos pretendem dizer, ao se referirem a “massa”. Para perceber o que os físicos pretendem dizer, imagi-

nemos ter dois objetos — uma bola de bilhar e uma bola de boliche, por exemplo — submetidos às mesmas forças. (Presumimos saber o suficiente acerca da natureza da força em pauta, de modo a podermos assegurar que as duas forças são idênticas.) Segundo a lei de Newton, cada qual dos objetos passará a sofrer aceleração. Contudo, essas acelerações serão diferentes. Mais fácil é comunicar aceleração à bola de bilhar do que à bola de boliche. E isso porque a bola de boliche tem maior massa. Em termos precisos, definimos a “massa inercial” (adiante examinaremos outro conceito de massa, o de “massa gravitacional”, que mede a resposta específica dos objetos à força da gravidade), como razão entre a força que atua sobre um objeto e a aceleração que produz. Isso enuncia, de modo exato, a idéia de que uma bola de boliche é de aceleração mais difícil do que uma bola de bilhar porque tem massa maior. Assim, quando um físico diz que a massa inercial de um objeto aumenta com a velocidade, pretende dizer que a mesma força aplicada ao objeto terá resultado de aceleração cada vez menor na medida em que o objeto se mova mais e mais depressa e, quando o objeto atingir uma velocidade muito próxima à velocidade da luz, a força não terá qualquer resultado. Antes de Einstein, vários físicos haviam conjecturado que algo dessa ordem ocorria com os elétrons — e a conjectura encontrava base em cálculos específicos apoiados nas equações de Maxwell e em vários modelos do elétron. De fato, em 1901, o físico alemão Walter Kaufmann iniciou uma longa série de mensurações para determinar se os elétrons mostrariam acréscimo de massa inercial na medida em que sofressem aceleração e, em caso positivo, qual seria esse acréscimo. Recorreu ele a elétrons emitidos por desintegração radioativa do rádio. (A desintegração radioativa do urânio em partículas carregadas havia sido descoberta pelo físico francês A. H. Becquerel em 1896 e, por algum tempo, essas partículas foram chamadas “raios de Becquerel”, até que se veio a reconhecê-las como elétrons — os mesmos objetos carregados que se sabia desprenderem-se de placas de metal aquecidas.) Os resultados por ele obtidos confirmavam algumas teorias e contestavam outras. Em particular, contestavam as previsões contidas no trabalho publicado por Lorentz em 1904, onde os elétrons eram concebidos como diminutas esferas carregadas que, em movimento, contraíam-se para adotar a forma de um elipsóide. Mais significativamente ainda, os resultados contrariavam as conclusões de Einstein em seu trabalho de 1905, onde ele chegara à resposta de Lorentz como previsão que decorria diretamente da teoria da relatividade e independia de qualquer modelo especial do elétron. Como assinala Gerald Holton, a primeira referência que se faz ao trabalho publicado por Einstein em 1905 contém-se em artigo de Kaufmann inserido nos *Annalen der Physik* em 1906. Esse artigo se inicia com o enunciado sumário: “Antecipo aqui o resultado geral das medidas a serem adiante descritas: *os resultados das medidas não são compatíveis com as presunções fundamentais de Lorentz-Einstein*” (grifo do original).

E Holton prossegue, acrescentando:

“Einstein não poderia ter sabido que o aparelhamento de Kaufmann era inadequado (isto é, que seu experimento era falho). Em verdade, só dez anos depois é que se soube realmente disso... Por esse motivo, em sua exposição de 1907 (resumido artigo acerca da relatividade preparado para o *Jahrbuch der Radioactivitat und Elektronik*), Einstein teve de reconhecer que havia pequenas, mas significativas diferenças entre suas previsões e os resultados de Kaufmann. Admitiu que os cálculos de Kaufmann pareciam isentos de erro, mas “se há um insuspeitado erro sistemático ou se os fundamentos da teoria da relatividade não correspondem aos fatos é algo que só se poderá decidir fundamentalmente quando houver disponibilidade de amplo e variado material colhido em observações.”

Ora — e essa é a parte significativa, revelada pela extraordinária atitude científica de Einstein — sublinha Holton:

“A despeito dessa profética observação, Einstein nela não apóia sua defesa. Ao contrário, toma posição diversa e, para sua condição e tempo, muito ousada: reconhece que as teorias acerca do movimento de elétrons, anteriormente elaboradas por Abraham e Bucherer propiciam previsões consideravelmente mais próximas dos resultados experimentais a que chegara Kaufmann. Contudo, Einstein recusa-se a permitir que os “fatos” decidam a questão: “Em minha opinião, ambas as teorias contam com pequena probabilidade de acerto, porque seus pressupostos fundamentais, concernentes à massa de elétrons em movimento, não são explicáveis em termos de sistemas teóricos que abranjam um complexo maior de fenômenos...”

Esse é o traço característico, a diferença crucial entre Einstein e aqueles que fazem da correspondência com o fato experimental a chave de decisão pró ou contra uma teoria: ainda que os “fatos experimentais”, àquela época, parecessem favorecer, de maneira clara, a teoria defendida por seus oponentes e não a sua própria, Einstein considera o caráter ad hoc dessas teorias como traço mais significativo e mais suscetível de objeção do que uma aparente discordância entre sua teoria e aqueles “fatos”.

Essa atitude — despreocupação para com alguns aparentes fatos experimentais porque eles não se adequam a amplo e harmonioso esquema teórico — é atributo do gênio ou da loucura, dependendo de quem toma a atitude e do tempo durante o qual a mantém. O jovem Einstein parecia ter

tão poderosa intuição da verdade científica que o erro se afigurava impossível. Quando, em idade madura, Einstein voltou toda a força dessa mesma intuição para o campo da teoria quântica, muitos físicos sustentaram que ele se encontrava às hordas da loucura.

O leitor haverá talvez notado que não se mencionou o mais conhecido resultado da teoria da relatividade de Einstein, a fórmula que se tornou quase sinônima de seu nome: $E=mc^2$. A razão está em que essa fórmula e sua correta interpretação não aparecem no trabalho de 1905, embora nele esteja implícita. A fórmula e sua interpretação correta figuram em notável trabalho de três páginas, publicado por Einstein ainda em 1905 e também nos *Annalen*, intitulado: “*Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?*” (Depende a inércia de um corpo de seu conteúdo de energia?)

O trabalho é modelo perfeito do melhor processo dedutivo aplicado à Física. Como os demais trabalhos iniciais de Einstein, é quase totalmente não-matemático, apoiando-se na invenção de uma “experiência hipotética” que, analisada cuidadosamente, propicia o resultado. Nesse caso, Einstein imaginou um átomo ou qualquer outra partícula que se desintegre radioativamente, emitindo radiação eletromagnética — raios gama.¹⁸ Hoje, conhecemos muitos exemplos dessas desintegrações, mas, em 1905, o estudo da radioatividade era incipiente e desintegrações como a imaginada por Einstein não haviam merecido estudo pormenorizado. Aplicando o princípio segundo o qual energia e momento se conservam durante a desintegração e fazendo engenhoso uso da transformação de Lorentz, Einstein pôde sustentar que o átomo posterior à desintegração haveria de ter massa inferior à do átomo original. E, mais ainda, a quantidade de massa perdida era exatamente igual à energia total, E , desprendida em virtude da radiação, dividida pelo quadrado da velocidade da luz — ou, em fórmula, sendo m a massa perdida, então $m = E/c^2$. Em palavras de Einstein: “Se um corpo perde a energia E sob forma de radiação, sua massa diminui de E/c^2 ”. (Os grifos são do original, onde se emprega “ L ” e não “ E ” para indicar “energia”.) E isso é tudo, exceto por uma penúltima sentença em nota que traduz uma das mais extraordinárias visões implícitas jamais expressa, em trabalho de Física: “Não é impossível que tomando em conta corpos cujo conteúdo energético é altamente variável (e.g. sais de rádio), a teoria possa ser submetida a teste com bom resultado.”

Fundamentalmente, a equação de Einstein revelou uma nova e, até

¹⁸ Simbolicamente, a desintegração pode ser representada por

$$A \rightarrow B + \gamma + \gamma$$

onde A é a partícula inicial que se desintegra, B é a partícula final e γ representa um fóton.

a época, insuspeitada fonte de energia. O mero fato de um objeto material ter massa dota-o de energia, mc^2 , que é significativa porque é muito elevada a velocidade da luz. De modo geral, essa energia é inacessível em termos práticos, razão por que não havia sido descoberta antes — não admite fácil conversão em uma das formas de energia (luz, calor, etc.) de que podemos fazer uso. Quando uma partícula radioativa se desintegra em, digamos, radiação eletromagnética, essa conversão se faz de modo natural — parte da massa se converte em energia de radiação. Era o que Einstein pretendia significar, ao escrever a sentença acima citada. Conhecemos, agora, exemplos extremos — envolvendo algumas das “partículas elementares” mais recentemente descobertas — onde é completa essa conversão de massa em energia radiante”.¹⁹ A partícula original se desintegra espontaneamente e todo o equivalente em energia de sua massa converte-se em energia de radiação. Nesses casos, surge certo número de raios gama — fótons altamente energéticos — cuja energia total se iguala ao equivalente em energia da massa da partícula que se desintegrou. Outro caso interessante é o de duas partículas com massa de repouso não nula que ao se encontrarem se aniquilam completamente, produzindo fótons luminosos. O primeiro exemplo desse tipo a ser estudado foi o da mútua aniquilação do elétron e de sua “antipartícula” — o pósitron. O pósitron foi descoberto em raios cósmicos, no ano de 1932, pelo físico norte-americano C. D. Anderson (que recebeu o Prêmio Nobel em 1936). A existência do pósitron havia sido prevista, em 1930, pelo físico teórico inglês P. A. M. Dirac, que fez a primeira combinação correta da teoria da relatividade com a teoria quântica, descobrindo que uma das inevitáveis consequências dessa conjugação eram as antipartículas — objetos de massa igual à da partícula, mas, quando eletricamente carregados, de carga oposta à dela. Todas as partículas têm antipartículas, tendo sido o par elétron-pósitron o primeiro a ver-se descoberto. Quando um elétron e um pósitron se encontram, em repouso, podem aniquilar-se, dando origem a dois fótons, cada um dos quais com energia igual a mc^2 , onde m é, neste caso, a massa do elétron (ou pósitron).

Outra importantíssima aplicação do resultado de Einstein é a “fusão nuclear”, que ainda poderá vir a transformar-se na mais importante fonte de energia barata e não-poluente. Partamos do exemplo mais simples: um nêutron e um próton podem juntar-se para formar um dêuteron — núcleo do “hidrogênio pesado” — liberando uma certa quantidade de energia que é transportada por um fóton. Essa perda de energia significa, segundo o princípio de Einstein, que o dêuteron deve ter massa inferior à da soma de suas partes — a massa do nêutron mais a do próton. Assim ocorre efeti-

¹⁹ Um exemplo é a desintegração do chamado méson Pi neutro — o π . O π tem uma energia de repouso de aproximadamente 140 milhões de elétron volts. Na desintegração $\pi \rightarrow \gamma + \gamma$ cada fóton retira metade da energia de repouso de π .

vamente e a diferença de massa é denominada “energia de ligação”, de vez que, para romper o dêuteron, é preciso utilizar pelo menos essa energia. (Pode-se dividir o dêuteron em um nêutron e um próton, bombardeando-o com fótons de energia adequada, processo a que se dá o nome de “foto-desintegração”.) Pode-se imaginar a construção de todos os tipos de núcleo através da conjugação de nêutrons e prótons e do que ficou dito decorre que todos os núcleos estáveis terão massas menores que a soma das massas de suas partes constitutivas. Dentro da Física clássica, não haveria como explicar essa diminuição de massa. A fórmula de Einstein propicia uma explicação simples e natural, pois que, na formação dos núcleos por fusão, alguma energia — ou massa — é liberada e, conseqüentemente, o núcleo resultante apresenta massa menor que a de suas porções integrantes.

A fusão nuclear e energia resultante permitiram resolver o problema de saber como as estrelas, inclusive o Sol, continuam a “queimar” — isto é, a emitir tão elevadas quantidades de energia radiante — por tão longo tempo e com tanta intensidade. A primeira e mais ingênua explicação via o Sol como um bloco de carvão inflamado. Essa idéia se vê instantaneamente rejeitada pelo simples cálculo do tempo que esse bloco levaria para queimar-se totalmente, considerando a observada taxa de produção de energia pelo Sol. A resposta gira em torno de 1.500 anos, ao passo que a idade do sistema solar sobe a vários bilhões de anos. Idéia mais refinada surgiu em 1854, com o físico alemão Hermann Helmholtz. Recorreu ele à noção, ainda aceita, de que o Sol se formou a partir de uma nuvem gasosa, quando as partículas de gás, por motivos ainda não assentados pelos astrônomos, começaram a juntar-se em blocos. Iniciado esse processo, a mútua atração gravitacional entre as partículas o mantém e o excesso de energia gravitacional, resultante do colapso da estrela, pode ser convertido em radiação. Não obstante, logo se demonstrou que se esse fosse o único processo a operar, o Sol não poderia ter mais de vinte milhões de anos. Após a descoberta da radioatividade, formulou-se a idéia de que talvez a energia do Sol se deva à desintegração radioativa. Se o Sol fosse constituído de urânio puro, libertaria energia, mais ou menos na taxa observada durante vários bilhões de anos. Contudo, o Sol não é constituído de urânio, mas de elementos como hidrogênio e hélio. Isso fez surgir um impasse que se prolongou até a década de 1920, quando o falecido George Gamow, utilizando concepções próprias da recém-descoberta mecânica quântica sugeriu que o processo de fusão poderia ocorrer às temperaturas próprias do interior das estrelas. (Vários anos antes, o astrônomo inglês Sir Arthur Eddington havia considerado certa e havia enunciado claramente a asserção de que na fórmula de Einstein deveria encontrar-se a solução do problema; porém para que o mecanismo de fusão fosse entendido do ponto de vista quantitativo fez-se necessário aguardar o surgimento da mecânica quântica.) Em 1939, H. A. Bethe e C. F. von Weizsäc-

ker, independentemente, esquematizaram a química nuclear, identificando as reações específicas que ocorrem na fusão nuclear e, em consequência, completaram a explicação de como ocorre a geração de energia solar. (Não há, dentro dessa linha de idéias, problema algum com a longa existência do Sol, pois tão reduzida perda de massa produz tão grande quantidade de energia.) E, assim, as três páginas do trabalho publicado por Einstein em 1905 colocam-se entre as mais frutíferas da Física moderna.

Todas essas confirmações experimentais só foram conseguidas muito mais tarde e as reações iniciais aos trabalhos acerca da relatividade, escritos por Einstein, em 1905, foram, em termos gerais, de indiferença ou de negação. Infeld registra:

Qual o impacto dessas novas idéias? De início, quase nenhum. Hoje em dia, resultados importantes são, talvez, mais prontamente reconhecidos e um trabalho novo e revolucionário geralmente produz uma torrente de outras contribuições, escritas por pessoas que examinam as idéias em pormenor e as desenvolvem matematicamente. Essa torrente de contribuições não se manifestou imediatamente após o aparecimento dos artigos de Einstein. Começou cerca de quatro anos depois — longo intervalo quando se trata de reconhecimento em plano científico. Sei, contudo, que físicos houve que leram muito cuidadosamente os trabalhos de Einstein e ali reconheceram o surgimento de uma ciência nova. Meu amigo, professor Loria, contou-me que seu professor, o professor Witkowski, da Cracóvia (que era um grande mestre), leu os trabalhos de Einstein e disse a Loria: “Nasceu um novo Copérnico! Leia os trabalhos de Einstein.” Mais tarde, quando o professor Loria encontrou o professor Max Born, em um congresso de Física, falou-lhe de Einstein e perguntou-lhe se conhecia os seus trabalhos. Nem Born nem qualquer outra das pessoas presentes tinha ouvido falar de Einstein. Foram a uma biblioteca, retiraram das prateleiras o décimo sétimo volume dos *Annalen der Physik* e começaram a ler o artigo de Einstein. Imediatamente, Max Born reconheceu-lhe a importância e a necessidade de generalizações formais. Posteriormente, a obra do próprio Born a propósito da teoria da relatividade tornou-se uma das mais importantes dentre as primeiras contribuições para esse campo da ciência

Dentre as personalidades por nós atrás mencionadas, Poincaré começou a ter dúvidas acerca do próprio princípio da relatividade, ao conhecer os primeiros resultados experimentais obtidos por Kaufmann e relativos à massa do elétron; em 1906, escreveu: “esses experimentos abriram campo à teoria de Abraham (um modelo de elétron que diferia do

de Lorentz). Talvez o princípio da relatividade não tenha o valor absoluto que lhe foi atribuído”. Poincaré faleceu em 1912, antes de o problema ter tido solução. Entre 1905 e sua morte Poincaré escreveu e falou, com frequência, acerca do princípio da relatividade. Em nenhuma de suas exposições aludiu à contribuição de Einstein, embora mencionasse os trabalhos de Einstein em outros campos da Física.²⁰ Entretanto, em 1911, um ano antes de sua morte, Poincaré redigiu uma carta em favor de Einstein, que se estava candidatando para trabalhar na Politécnica de Zurique, e diz nessa carta:

Einstein é um dos espíritos mais originais que conheci; apesar de jovem, já ocupa lugar de honra entre os mais eminentes estudiosos de nosso tempo. Admirável nele é, antes de tudo, a facilidade com que se coloca diante de conceitos novos, deles retirando todas as conseqüências. Não permanece preso a princípios clássicos e, em face de um problema de Física, dá-se conta, prontamente, de todas as possibilidades. Em seu espírito, isso se traduz, desde logo, na predição de novos fenômenos, suscetíveis de verificação por experimento. Não quero dizer que todas as previsões se confirmem, quando submetidas a teste. Como ele se encaminha para todas as direções possíveis, é de esperar, pelo contrário, que a maioria das trilhas seguidas conduza a impasse; mas pode-se também esperar que uma das direções apontadas seja a verdadeira; e isso basta. Essa é a maneira segundo a qual se deve proceder. O papel da Física Matemática é o de colocar questões; cabe à experiência respondê-las. O futuro colocará mais e mais em evidência o mérito de Einstein e a universidade que puder atrair esse jovem mestre poderá estar certa de muito ganhar.

A aceitação da teoria da relatividade por parte de Lorentz aumentou progressivamente e, em 1915, ele acrescentou uma nota de pé de página ao texto clássico da “Teoria dos Elétrons”:

Se redigisse agora este capítulo, eu certamente daria importância maior à teoria da relatividade, de Einstein, por força da qual a teoria dos fenômenos eletromagnéticos nos sistemas em movimento ganha grau e simplicidade que não pude atin-

²⁰ Poincaré não deixou papéis particulares e, assim, não são conhecidas as razões que teve para ignorar publicamente as contribuições de Einstein para a teoria da relatividade. Ver S. Goldberg, “In Defense of Aether”, em Russell McCormach, org., *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1970, 89-125, onde se discute esse ponto e se faz análise das reações dos físicos europeus à teoria da relatividade.

gir. A razão principal de minha falha foi o prender-me à idéia de que a variável t (o tempo medido no referencial do “éter”) só pode ser encarada como traduzindo o tempo verdadeiro e que o tempo local, t' , não passa de quantidade matemática auxiliar. Na teoria de Einstein, ao contrário, t e t' desempenham igual papel; se desejamos descrever fenômenos em termos de x' , y' , z' , t' , devemos trabalhar com essas variáveis exatamente como trabalharíamos com x , y , z , t .

Quando escreveu essa nota, Lorentz estava com sessenta e dois anos de idade. Havia chegado à pequena cidade universitária de Leyden, na Holanda, ainda muito jovem e ali continuou até sua morte, em 1928. Talvez fosse uma questão de idade. Ambos, Lorentz e Poincaré, tinham entre quarenta e cinquenta anos quando passaram a colocar-se ante a crise que sentiram havia sido desencadeada, no campo da Física, pelo experimento Michelson-Morley. Em certo sentido, sabiam muito e estavam muito comprometidos com a Física clássica para que pudessem simplesmente desprender-se dela. Einstein tinha apenas vinte e seis anos quando publicou seu trabalho e não apenas a sua, mas todas as descobertas importantes no campo da Física teórica — poucas são as exceções, que se põem à parte por seu caráter de singularidade — foram feitas por homens com menos de trinta anos de idade. E, muitos foram os casos em que a geração mais velha não reagiu ou não pôde reagir com a marca e a flexibilidade que assinalaram a reação de Lorentz. Embora Lorentz, até o fim de sua vida, continuasse a falar do “éter” como de uma “concepção” que apresenta “certas vantagens”,²¹ foi ele o primeiro a telegrafar a Einstein, em 1919, anunciando que as expedições inglesas que estudavam o eclipse solar haviam confirmado as previsões feitas dentro do quadro da teoria geral da relatividade. Os dois homens, apesar da grande diferença de idade, formação e temperamento, cultivaram amizade e admiração mútua, que se prolongou até a morte de Lorentz e que Einstein prezou até o fim de sua própria vida.

Albert Michelson, que Einstein muito respeitava como físico experimental, sempre desaprovou e descreu da teoria. Quando os dois se encontraram pela primeira e única vez — em 1931, tendo Michelson setenta e nove anos — este chegou a manifestar a Einstein o pequeno arrependi-

²¹ Algo da ambigüidade que reinava no espírito de Lorentz pode ser percebido com a citação integral: “Quanto ao éter... embora a concepção de sua existência traga algumas vantagens, importa reconhecer que, se Einstein a houvesse conservado, certamente não nos teria dado sua teoria e, assim, somos gratos a ele por não ter trilhado velhas estradas.” H. A. Lorentz, *Problems of Modern Physics: A Course of Lectures Delivered in the California Institute of Technology* (1922), H. Bateman, org. (Boston, 1927), 220-221.

mento que sentia pelo fato de seus experimentos haverem sido causa do nascimento de tal “monstro”.

viii. O espaço-tempo de quatro dimensões

Os passos que levaram Einstein de Berna a Berlim começaram quando físicos suíços se deram conta de que seus talentos estavam sendo desperdiçados em um escritório de patentes. “As pesquisas, cujos resultados Einstein deu a público em Berna, em 1905, fugiam tanto ao comum que, aos olhos dos físicos das universidades suíças, pareciam incompatíveis com o trabalho rotineiro de um funcionário de pouco relevo em um escritório de patentes”, escreveu Philipp Frank, e “logo se fizeram tentativas para levar Einstein a ensinar na Universidade de Zurique”.

Aí, Einstein e o professor Alfred Kleiner — eminente físico de Zurique e principal advogado de Einstein — viram-se diante de um impasse, pois, segundo os regulamentos vigentes, não era possível ser alguém designado para as funções de professor sem ter, antes e por algum tempo, atuado como Privatdozent. Esta era uma posição acadêmica de contorno singular: quem a ocupava não tinha obrigações para com a Universidade e por ela não era pago. O Privatdozent podia ministrar os cursos que desejasse, cabendo aos alunos pagar pequena taxa. Era quase impossível viver do exercício dessa atividade e, assim, Einstein conservou seu emprego no Bureau de Patentes. A despeito de tudo, foi Einstein, finalmente, chamado a Zurique em 1909 e admitido como professor “extraordinariamente”, o que, apesar do título pomposo, correspondia a uma posição acadêmica sem projeção. Seu salário era o mesmo que recebia em Berna, mas ele viu-se obrigado a renunciar ao tipo de vida pouco dispendioso que tinha naquela cidade, pois ao professor universitário tocava um mínimo inevitável de compromissos sociais.

Einstein sempre gostou muito de Zurique, mas, no outono de 1910, abriu-se uma vaga na cadeira de Física Teórica, na Universidade alemã de Praga — o que significava uma promoção. Até 1888, tinha havido uma universidade em Praga, a mais antiga da Europa central, cujos professores lecionavam em alemão e checo. Entretanto, após infindáveis querelas políticas entre alemães e checos, o governo austríaco decidiu dividir a universidade em duas, tendo como critério a língua. Isso conduziu a um clima de hostilidade mais intenso, pois o grupo de língua alemã considerava os checos “racialmente inferiores”. O Imperador Francisco José havia imposto como requisito para ensinar em universidades do Estado pertencer o candidato a uma igreja reconhecida; por causa disso, quando chegou a Praga, em 1911, Einstein — que, desde os doze anos, não havia praticado qualquer religião — declarou pertencer ao “mosaísmo”, que era, na Áustria da época, a designação oficial que recebia o judaísmo. Einstein manteve muito contato com círculos literários judeus em Praga, dos quais fa-

ziam parte Kafka, Hugo Bergmann e Max Brod; este, em um romance intitulado “A redenção de Tycho Brahe”, retratou o caráter de Johann Kepler, assistente e antagonista de Tycho, de maneira que se apoiava claramente no caráter do jovem Einstein. Em 1912, este deixou Praga e retornou à Politécnica de Zurique, na posição de professor. Durante todo esse período, trabalhou intensamente em vários campos da Física. Desejamos focalizar, a esta altura, os desenvolvimentos dados à teoria da relatividade. Adiante, abordaremos o tema da Física quântica, para o qual Einstein deu, simultaneamente, contribuições de relevo e importância fundamentais.

É interessante assinalar que o passo seguinte, de significação para a teoria da relatividade, não foi dado por Einstein, mas por seu velho professor na Universidade de Zurique, Hermann Minkowski, matemático russo-alemão, nascido em 1864 e falecido em 1909, dois anos após a realização do trabalho relevante a que nos referiremos. Minkowski, que pouco se lembrava de Einstein como aluno, havia-se transferido para a Universidade de Gottingen, que era na ocasião e foi por muitos anos a capital matemática do mundo. É a formulação dada por Minkowski à teoria especial da relatividade que, de modo geral, hoje se ensina e isso em razão de sua simplicidade formal e elegância matemática. Por esse tempo, Einstein continuava alérgico à matemática pura e durante vários anos deixou de demonstrar qualquer particular interesse pela “visão quadridimensional do mundo”, proposta por Minkowski. Somente quando chegou à formulação final de sua teoria da gravitação — aperfeiçoada generalização da obra de Minkowski — é que Einstein mostrou-se capaz de apreciar-lhe a significação formal. Resquício da anterior atitude de Einstein permanece na sentença introdutória do capítulo intitulado “o espaço quadridimensional de Minkowski”, que faz parte do belo livro que é Relatividade, escrito em 1916. “O não-matemático”, principia Einstein, “é tomado de misterioso pavor quando ouve falar de coisas de ‘quatro dimensões’ e experimenta sensação que não difere da despertada por pensamentos em torno do oculto.” Acrescenta, porém, “Contudo, não há enunciado mais trivial que dizer que o mundo onde vivemos é um *continuum* espaço-tempo quadridimensional”. Tratar-se ou não de um enunciado trivial depende dos círculos que freqüentamos. O que Einstein pretende indubitavelmente significar é que, inconscientemente, admitimos uma descrição quadridimensional dos acontecimentos, sem nos darmos conta — a menos que sejamos matemáticos — do que estamos fazendo. Quando concordamos em nos encontrar com alguém, a determinada hora, em determinado lugar, estamos fazendo um pronunciamento quadridimensional, pois o lugar pode, falando-se com precisão, ser especificado por três coordenadas especiais, x , y , z , aparecendo mais o tempo, t , quarta coordenada, ou “dimensão”. Conseqüentemente, em seu todo, o lugar do encontro no “espaço-tempo” é especificado pelo que os matemáticos chamam vetor quadridimensional.

Nada do que se disse tem qualquer coisa a ver com a teoria da relatividade pois a mecânica newtoniana pode ser formulada em quatro dimensões, apenas não interessando assim agir. A razão está em que, na Física newtoniana, o tempo é “absoluto” e sua medida não depende do sistema de referência em movimento uniforme — do “sistema inercial” — de que fazemos uso em nossa descrição. Conseqüentemente, as equações de transformação que, na Física newtoniana, levam de um a outro sistema inercial de referência são apenas “interessantes” para as dimensões triespaciais; a quarta equação diz simplesmente que o “tempo” em um sistema é idêntico ao “tempo” medido em termos de qualquer outro sistema inercial. Nas transformações de Lorentz concernentes à teoria especial da relatividade, tanto o espaço, como o tempo se transformam, de sorte que, em tal sentido, se colocam no mesmo pé e faz-se natural tratá-los conjuntamente em quatro dimensões. Isso, em verdade, foi o que Einstein implicitamente fez em seu trabalho de 1905. E Minkowski mostrou que se poderia “visualizar” essas transformações de maneira geométrica precisa.

Como todos sabem, o célebre teorema de Pitágoras estabelece, dentro dos quadros da geometria euclidiana, que, dado um triângulo retângulo — triângulo que tenha um ângulo de 90° — a soma dos quadrados dos catetos é igual ao quadrado da hipotenusa. Podemos utilizar esse teorema da maneira a seguir descrita. Em primeiro lugar, fixamos um par de “eixos” — duas retas que se encontram, em ângulo reto, em um ponto denominado “origem”. Se, em seguida, traçarmos qualquer segmento de reta que passe pela origem, poderemos determinar-lhe o comprimento, recorrendo ao seguinte artifício: baixamos projeções perpendiculares desse segmento de reta sobre os dois eixos — chamemo-las de projeções x e y . O segmento de reta torna-se a hipotenusa de um triângulo retângulo, cujos catetos são x e y . Assim, a soma dos quadrados $x^2 + y^2$ levará, por aplicação do teorema de Pitágoras, a determinar o comprimento do segmento de reta. Esse segmento de reta é, pelos matemáticos, denominado “vetor” e x e y são “componentes” do vetor, com. respeito aos eixos escolhidos.

Há, é claro, algo de arbitrário nesse procedimento — a escolha dos eixos. Se fizermos os dois eixos girarem rigidamente, de certo ângulo, sem tocar no vetor, obteremos novo conjunto de eixos e novo conjunto de componentes, x' e y' . Entretanto, nenhuma rotação alterará jamais o comprimento do vetor. Em conseqüência, a soma dos quadrados de x' e y' é igual à soma dos quadrados de x e y . Tal soma é “invariante”, com respeito a rotações rígidas dos eixos. Pode-se, facilmente, estender esse procedimento a três dimensões, introduzindo um terceiro eixo perpendicular aos outros dois. O vetor tridimensional se caracterizará por envolver três componentes, x , y e z , e o comprimento desse vetor equivalerá exatamente à raiz quadrada da soma dos quadrados das três componentes. Esse comprimento é também, em três dimensões, invariante por rotações.

Ora, nada nos impede — pelo menos em imaginação — de adicionar

um quarto eixo, que se coloque em ângulos retos em relação aos outros três, definindo, assim, um vetor de quatro dimensões. Denominamos “comprimento euclidiano” desse vetor a soma dos quadrados das quatro componentes e ele será invariante por rotações rígidas em quatro dimensões. (Talvez seja difícil visualizar esse ponto, mas isso escapa ao que ora interessa.) Como vimos, um “acontecimento” no espaço-tempo admite descrição por meio de quatro componentes — x , y , z e t . Uma vez que x , y e z têm dimensão de comprimento e t , dimensão de tempo — “metro” no primeiro caso e “segundo” no outro — unificamos a descrição introduzindo ct no lugar de t , onde c corresponde à velocidade da luz no vácuo. Agora, todas as quatro coordenadas, x , y , z e ct têm as mesmas dimensões físicas — metros — pois o produto da velocidade pelo tempo resulta em dimensão de comprimento. Podemos, à primeira vista, sentir-nos tentados a denominar comprimento de um “acontecimento” à soma dos quadrados dessas quatro componentes. Esse comprimento euclidiano seria invariante por rotações rígidas dos eixos. Contudo, a teoria da relatividade ensina que as transformações interessantes não são as rotações comuns em quatro dimensões, porém, antes, as transformações de Lorentz. Ora, ocorre (e isso está implícito em uma nota de pé de página que figura no trabalho publicado por Einstein em 1905, mas não foi acentuado) que as transformações de Lorentz mantêm invariante a quantidade $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$.

O leitor notará que têm sinais opostos os componentes tempo e espaço. Conseqüentemente, esse comprimento não é, necessariamente, positivo. Será positivo se o quadrado da componente-temporal for menor que a soma dos quadrados das componentes-espaciais. Será negativo, se o contrário ocorrer; e poderá ser zero. Esta última situação, acentuou Einstein, corresponde exatamente à equação do movimento de um raio de luz no vácuo. O fato de essa equação ter a mesma forma em quaisquer sistemas de referência ligados pelas transformações de Lorentz corresponde tão-somente a um aspecto do princípio da relatividade — àquele que Einstein apontou em sua nota de pé de página. Minkowski, entretanto, avançou um passo mais, esclarecendo a geometria da teoria da relatividade. Sustentou que as transformações de Lorentz atuam como rotações especiais no espaço de quatro dimensões. Essas rotações ocorrem ao longo do que os matemáticos denominam ângulos “imaginários”, para significar que, diversamente dos ângulos comuns que se estendem de 0° a 360° ,²²

²² Esse é um dos muitos casos de descrição verbal de idéias matemáticas em que a expressão é mais complicada que a idéia a ser expressada. Minkowski observou que se se escrever $X_4 = i ct$, sendo $i = \sqrt{-1}$, de sorte que $i^2 = -1$, a transformação de Lorentz poderá ser expressada como “rotação” segundo um ângulo como segue:

$$X' = X \cos \Psi - V_4 \sin \Psi$$

esses ângulos contêm a raiz quadrada de menos um”. Em outras palavras, tem-se o que é conhecido como “geometria pseudo-euclidiana” no espaço quadridimensional de Minkowski — “pseudo”-euclidiana, porque o comprimento nem sempre é positivo. Minkowski introduziu denominação sutil — linha de universo — para indicar as trajetórias das partículas em quatro dimensões: cada ponto de uma linha cósmica é descrito por uma coordenada-temporal e três coordenadas-espaciais, de forma que se pode acompanhar a história cósmica de uma partícula no espaço e no tempo, bastando conhecer sua linha cósmica. A grande virtude da abordagem de Minkowski é que, com prática reduzida, torna-se possível visualizar os resultados das transformações de Lorentz e dizer, rapidamente, de que maneira quantidades como campos elétricos e magnéticos se transformarão com a passagem de um sistema inercial para outro. Nada se acrescenta em matéria de Física, porém o formalismo é muito mais elegante e compacto do que o apresentado no trabalho original de Einstein.

Em 1908, Minkowski proferiu o que deve ter sido uma conferência assaz provocadora na Oitava Assembléia de Físicos e Cientistas alemães, na cidade de Colônia, conferência que se intitulou “Espaço e Tempo”. Quase se pode dizer que foi essa conferência que atraiu atenção para a teoria da relatividade. Começou Minkowski com um enunciado que tem sido alvo de muita citação e de muito mal-entendido: “As concepções de espaço e tempo que desejo apresentar-lhes brotaram do solo da Física experimental e nisso reside a força que têm. São radicais. Ora por diante, o espaço em si mesmo e o tempo em si mesmo estão condenados a desvanecer-se em sombras e somente a conjugação de um e outro preservará uma realidade independente”. Alguns escritores, poetas, romancistas e filósofos de ficção científica — que, aparentemente, interromperam a leitura nesse ponto — entenderam significar essa frase que, por algum motivo, em razão do aspecto quadridimensional da relatividade, seria possível ir e voltar no tempo, em direção ao futuro, ao passado e sabe Deus o quê. Infelizmente, nada de semelhante é verdadeiro. Cada um de nós está preso a seus próprios referenciais de Lorentz e para nós, no que diz respeito à teoria da relatividade, o futuro permanece o futuro e o passado se conserva como passado. Surge uma questão algo mais sutil quando se pergunta se todas as seqüências causais aparecem sob forma idêntica aos olhos de todos os observadores relacionados pelas transformações de Lorentz; dito de outro modo, se em meu sistema de Lorentz, o evento B segue o evento A, verão os observadores, de todos os outros sistemas de Lorentz, B seguir

$$X'' = X \sin \Psi - V_4 \cos \Psi$$

onde $v/c = i \tan \Psi$

É a mesma forma da equação de uma rotação comum, a não ser pelo fato de que, no caso, xy é um ângulo “imaginário”.

A — ainda que espaço e tempo sejam atingidos por uma transformação de Lorentz que relacione os vários sistemas? A resposta é afirmativa e pode-se demonstrar, com base em transformações de Lorentz que se, em um sistema, dois eventos ocorrem em dada ordem temporal — o segundo, digamos, após o primeiro — aparecerão esses eventos na mesma ordem temporal a todos os observadores ligados por transformações de Lorentz. Isso é também verdadeiro para eventos que ocorram em diferentes pontos do espaço, contanto que esses pontos sejam tais que entre eles possam ser trocados sinais luminosos. Esse problema surgiu em data recente, ligado a uma especulação nova a que se deram, independentemente, os físicos George Sudarshan e Gerald Feinberg. Consideraram eles a possibilidade teórica de existirem partículas que sempre se deslocuem mais rapidamente que a luz. Já vimos que é impossível acelerar uma partícula comum até imprimir-lhe velocidade superior à da luz, mas o problema agora proposto é o de saber se não poderia existir um novo tipo de partículas — às quais Feinberg deu o nome de “taquions” — que jamais admitiram ser freadas a ponto de se deslocarem a velocidades inferiores à da luz. Em caso afirmativo, caberia recorrer a esses hipotéticos objetos mais velozes que a luz para violar nossas idéias acerca de seqüência causal? Aparentemente, isso pode ser evitado, mas não se sabe, com certeza, se é cabível emprestar à teoria coerência total. Foi sugerida maneira de se buscar experimentalmente os taquions, mas, até agora, eles não se mostraram. E isso leva, inevitavelmente, a recordar a famosa quadra humorística:

Houve uma jovem chamada Bright
Que andava com velocidade à da luz superior.
Certo dia ela partiu, em termos relativos,
E chegou na noite anterior.

Infelizmente, nunca saberemos o que Einstein teria pensado dos taquions, mas não foi de entusiasmo sua reação inicial diante do trabalho de Minkowski, pois que ali viu um formalismo matemático desnecessariamente elaborado a encobrir a Física. Quando, logo após a conferência de Minkowski, Max von Laue, que ganhou o Prêmio Nobel em 1914, publicou o primeiro pormenorizado manual de matemática relacionado com a teoria da relatividade, Einstein comentou jocosamente: “Por mim, tenho grande dificuldade de entender o livro de von Laue.” David Hilbert, professor de Gottingen e provavelmente o maior matemático daquela época, observou, certa vez: “Qualquer menino das ruas da nossa matemática Gottingen sabe mais acerca de geometria das quatro dimensões do que Einstein. E, contudo, foi Einstein quem realizou a obra e não os matemáticos.” Hilbert disse a um grupo de matemáticos: “Sabem os senhores por que Einstein pôde dizer as coisas mais originais e profundas que em nossa geração se disse a propósito do tempo e do espaço? Porque nada havia aprendido acerca da filosofia e da matemática do tempo e do espaço”.

ix. O princípio de Mach

O último trabalho matematicamente “simples” que Einstein escreveu a respeito da relatividade — *A propósito da influência da gravitação sobre a propagação da luz* — data de 1911 e corresponde a estado intermediário entre os trabalhos de 1905, acerca da teoria especial, e a formulação final da teoria geral da relatividade — sua obra-prima, redigida em 1916. Ninguém afirmaria que qualquer “menino da rua”, ainda que de rua de Gottingen, poderia facilmente apreender a “geometria quadridimensional” apresentada no trabalho de 1916. Para ler esse trabalho, atualmente, um estudante médio de pós-graduação provavelmente dispõe de maior base que os físicos da época, em geometria riemanniana, cálculo tensorial, símbolos de Christoffel e de todo o aparelhamento tomado de empréstimo ou inventado por Einstein para que lhe fosse possível enfrentar o problema da gravitação. Ainda assim, esse trabalho é de difícil apreensão, no pormenor. Para muitos dos contemporâneos do surgimento da teoria, a compreensão foi impossível. Perguntaram, certa vez, a Sir Arthur Eddington — estreitamente ligado ao desenvolvimento teórico e experimental da doutrina e um dos primeiros a reconhecer-lhe valor — se era verdade que apenas três pessoas compreendiam realmente a teoria geral da relatividade; em resposta, Eddington teria indagado: “Quem é a terceira?”.²³

A gravitação é (em condições normais) a mais fraca dentre as forças da natureza por nós conhecidas. Suponhamos que se faça comparação entre a força elétrica pela qual se repelem, entre si, dois prótons positivamente carregados e a força da gravidade, que tende a mantê-los em coesão. (Fazendo essa aproximação, estamos admitindo a lei de Coulomb, para a força elétrica, e a lei da gravitação, de Newton, para a gravidade. Segundo idéias modernas, nenhuma dessas leis é totalmente correta, mas ambas são suficientemente precisas para o argumento que temos em vista.) Ocorre que a força elétrica é mais intensa do que a gravitacional por um fator de aproximadamente 10^{36} . (Nos termos dessa notação, um milhão é representado por 10^6 .) Em outras palavras, ao considerar a Física dos prótons, em circunstâncias normais (alguns recém-descobertos fenômenos astrofísicos, tal como o dos pulsars, são exemplos de “circunstâncias não-normais”), cabe, mesmo quando se exige precisão em alto grau, desprezar inteiramente a força da gravitação. E coloca-se, então, o problema de saber por que os movimentos dos planetas são governados pela gravitação e não por força elétrica. A resposta direta é que os planetas são,

²³ Eugene Guth, “Contribution to the history of Einstein’s Geometry as a Branch of Physics”, *Proceeding of the Relativity Conferente in the Midwest 1969* (Nova Iorque, 1970), 185. Guth oferece interessante versão da história da relatividade geral. O Professor S. Chandrasekhar, que conheceu bem Eddington, informou-me ter ouvido esse relato do próprio Eddington.

em essência, eletricamente “neutros”. Essa observação não é tão tautológica quanto pode parecer e chama atenção para a profunda diferença que existe entre eletricidade e gravidade. Tal como já referimos, as cargas elétricas podem ser positivas, negativas ou neutras (tão negativas quanto positivas). Só por convenção histórica dizemos que esta é a carga “positiva” e aquela a “negativa”. Ponto importante é o que se traduz pelo fato experimental de que próton e elétron encerram cargas iguais e opostas — por convenção, a carga do elétron é dita “negativa”; e o nêutron, terceiro componente da matéria comum, não tem carga. Isso quer dizer que um átomo normal, apesar de todos os seus elétrons, é eletricamente neutro; conseqüentemente, os planetas em seu todo são, essencialmente, muito próximos da condição de eletricamente neutros. (Os dois prótons do exemplo acima acham-se positivamente carregados e, por isso, repelem-se.) E os objetos eletricamente neutros não exercem, em primeira aproximação, qualquer efeito elétrico recíproco. Assim, na teoria dos movimentos planetários, a eletricidade não desempenha papel, embora seja força muito mais intensa que a da gravidade, quando estão em causa partículas carregadas. O que determina a intensidade da força gravitacional é a “massa” da partícula. Com efeito, e conforme a lei de Newton relativa à gravitação universal, toda partícula, seja qual for sua carga elétrica, é atraída por qualquer outra partícula do universo com intensidade — ou “constante de acoplamento”, para empregar uma expressão moderna — proporcional ao produto das duas massas. A massa de um próton individualmente considerado é infinitesimal — cerca de 10^{-24} gramas (tendo o nêutron massa aproximadamente igual), mas, no Sol, digamos, há elevadíssimo número deles. (Cifra mais exata seria a de 10^{57} prótons.) Todas essas reduzidas massas se adicionam para produzir a atração gravitacional que o Sol exerce sobre os planetas.

É importante assinalar que utilizamos a expressão “massa” em dois sentidos que não são manifestamente o mesmo. De um lado, denominamos “massa inercial” aquela propriedade de um objeto que mede sua resposta a uma força, obedecida a lei de Newton $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ (a força é igual ao produto da “massa inercial” pela aceleração produzida). Essa massa pode ser medida através de experimentos que nenhuma relação têm com a gravidade. A massa inercial de um próton, por exemplo, pode ser medida por sua resposta a uma força elétrica. De outro lado, tem-se a “massa gravitacional”. Mede ela, especificamente, a atração gravitacional que duas partículas exercem uma sobre a outra. Não é, a priori, evidente que os números indicadores da massa gravitacional e da massa inercial sejam o mesmo. Contudo, é sabido, desde a formulação inicial dada por Newton à teoria da gravitação universal, que esses números são muito próximos, se não idênticos. A primeira observação que sugere essa conclusão é que, ausente a resistência do ar — condição possível em experimentos realizados no vácuo — todos os objetos caem com a mesma aceleração, dentro do campo

gravitacional da Terra. (Essa aceleração é o famoso “g” do vôo dos foguetes e equivale aproximadamente a 32 pés por segundo.) Isso é verdadeiro, seja qual for a “massa” do objeto. Na equação gravitacional, a “massa gravitacional” do objeto anula sua “massa inercial” e a única massa restante é a “massa gravitacional” da Terra.²⁴ Essa curiosa característica da gravitação foi identificada e estudada antes de Einstein — o nobre húngaro, Barão von Roland Eötvös dedicou-se, nos primeiros anos do século, a medir, com grande precisão, a equivalência entre as massas gravitacional e inercial; e estudos feitos em anos recentes por R. H. Dicke demonstraram que as duas massas são iguais com precisão de uma parte em cem bilhões. Aparentemente, entretanto, ninguém pensou merecer esse fato ênfase especial. Aos olhos de Einstein, porém, essa igualdade falava não de um acidente, mas de uma conspiração. Em notas históricas posteriormente escritas, diz ele: *“Essa lei, que pode ser apresentada como a lei da igualdade das massas inercial e gravitacional, atingia-me com todo o seu impacto. Espantava-me sua persistência e imaginei que nela deveria residir a chave de mais profunda compreensão da gravitação e da inércia. Eu não tinha dúvidas sérias acerca de sua estrita validade, apesar de não me serem conhecidos os admiráveis experimentos de Eötvös, de que — se recordo bem — só vim a ter notícia posterior”*.

O trabalho publicado por Einstein em 1911 é uma tentativa de situar essa observação dentro de um esquema de referência mais geral. Não foi, contudo, uma tentativa inteiramente bem sucedida porque, a essa altura, Einstein não havia, ainda, abandonado a teoria da gravitação de Newton. Procurava, ao contrário, acrescentar princípios novos à velha teoria newtoniana, em amálgama que se desfazia. Não obstante, alguns dos conceitos por ele, então, introduzidos sobreviveram e o trabalho é interessante pelo que revela a propósito da evolução do pensamento de Einstein. É possível perceber a luta por ele travada, o que já não ocorre no trabalho de 1916, trabalho de uma perfeição austera e acabada. A principal idéia nova que se contém no trabalho de 1911 é a que veio a receber o nome de “prin-

²⁴ Em termos específicos, a lei de Newton estabelece que, para qualquer força F

$$F=ma$$

sendo m a “massa inercial”, ao passo que a lei da gravitação universal de Newton estabelece que, para as forças da gravidade,

$$F = \frac{GmM}{r^2}$$

onde as massas m e M são massas “gravitacionais” e G é a “constante de gravitação” universal. Na superfície da Terra, podemos substituir r pelo raio da Terra e M pela massa da Terra. Conseqüentemente, se as massas inercial e gravitacional forem as mesmas, concluiremos que todos os objetos próximos à superfície da Terra cairão com uma aceleração g.

cípio da equivalência”. É uma espécie de princípio de relatividade, mas de caráter inédito. Assevera que os efeitos de uma aceleração constante e uniforme sobre um observador ou sobre seus instrumentos de medida são indistinguíveis — isto é, são equivalentes — dos efeitos causados por um campo gravitacional uniforme sobre um observador em repouso.

Antecipando o que será dito e para evitar mal-entendido, importa sublinhar, a esta altura, que esse enunciado do princípio da equivalência não é compatível com a teoria especial da relatividade. A razão é que, segundo a lei de Newton, um objeto colocado em campo gravitacional uniforme poderá ver-se acelerado a velocidades arbitrárias e, afinal, deslocar-se-á mais rapidamente que a luz. Em verdade, a natureza não apresenta algo que se possa chamar um campo gravitacional uniforme, embora, para propósitos práticos, haja muitas regiões do espaço onde o campo gravitacional é quase uniforme. A interpretação correta do princípio é que, se tomarmos pequena região em torno de determinado ponto, o campo variará pouco nessa região e, reduzindo continuamente as dimensões da mesma região, será possível reduzir, arbitrariamente, a variação. Nessa região infinitesimal, pode-se substituir o campo gravitacional local por um sistema de coordenadas com aceleração constante. Evita-se, dessa maneira, conflito com a teoria especial da relatividade, pois a aceleração uniforme só ocorre em uma região infinitesimal e a velocidade da partícula não pode exceder a da luz.

Para perceber o que significa o princípio da equivalência, podemos imaginar-nos no que veio a ser conhecido como “elevador de Einstein”. Trata-se de caixa fechada, colocada em um ponto do espaço, suscetível de ser içada por alguém situado fora dela, que puxa, com força constante, uma corda ligada ao teto da mesma caixa. Os ocupantes do elevador sentem-se impelidos “para baixo”, em direção ao solo, e o princípio da equivalência assevera que essa força dirigida para baixo é idêntica à que poderia ser produzida por um campo gravitacional convenientemente construído que atuasse “de cima para baixo” sobre um elevador estacionário. As pessoas que se acham no elevador não serão capazes de dizer se enfrentam uma situação ou a outra. Essa lei traz como implicação a equivalência entre a massa gravitacional e a inercial, pois, em verdade, equipara uma força gravitacional e uma força inercial.

Einstein utilizou o princípio da equivalência para retirar outras consequências extremamente interessantes. Pretendo focalizar apenas uma: a inclinação da luz em razão da força da gravidade.

Imaginemos a situação seguinte: um elevador vem sendo içado com aplicação de uma força constante e, portanto, a uma aceleração constante. Nós estamos estacionados em ponto externo ao elevador, o “sistema de repouso” com respeito ao qual o elevador está sofrendo aceleração. De nosso sistema de referência estacionário projetamos um raio de luz, de maneira tal que a luz penetre no elevador — através de uma fresta, diga-

mos — observando uma trajetória inicialmente paralela ao chão do elevador. Veremos acontecer que o chão do elevador, sendo acelerado de baixo para cima, caminha em direção ao raio de luz. Para nós, que nos encontramos no sistema de referência estacionário, o raio de luz segue trajetória retilínea, mas, para os que se encontram no elevador, o raio de luz parecerá inclinar-se na direção do chão do elevador. Se os que estão no elevador não “sabem” que vêm sendo impelidos para cima, podem, nos termos do princípio da equivalência, concluir que há um campo gravitacional uniforme operando naquela região do espaço e levando o raio de luz a inclinar-se para baixo, segundo uma trajetória curvilínea. A primeira vista, isso é muito estranho, pois, de acordo com a teoria newtoniana, só objetos possuidores de massa é que são afetados pela gravidade. Nesses termos, para evitar contradição ao princípio da equivalência, deve-se dizer que, em um campo gravitacional, os raios de luz se propagam como se tivessem massa gravitacional. Isso, assinalou Einstein, é o que se pode esperar da relação massa-energia, $E = mc^2$, conforme a teoria especial da relatividade. Os raios luminosos transportam, sem dúvida, energia — a luz do Sol, afinal de contas, aquece a Terra. E Einstein sustentou que, se o conteúdo da energia presente na luz é E , a massa gravitacional equivalente deve ser E/c^2 .

Deve-se realçar que o princípio da equivalência, isoladamente considerado, não indica maneira única de a luz inclinar-se sob influxo do campo gravitacional. Sugere apenas que a luz deva sofrer ação da gravidade. Tendo assim concluído, Einstein, em seu trabalho de 1911, utilizou a lei da força gravitacional newtoniana para calcular as trajetórias de raios de luz em um campo gravitacional newtoniano. Quando, mais tarde, percebeu que a lei gravitacional de Newton precisava ser modificada, Einstein teve, naturalmente, de refazer esses primeiros cálculos, passando a empregar a dinâmica gravitacional introduzida por seu trabalho de 1916. Faremos referência ao primeiro cálculo porque compõe útil introdução à matéria e ilustra a maneira de as idéias científicas avançarem, a pouco e pouco, no tempo — cada fase tirando vantagem dos erros e dos acertos das fases anteriores.

Ao fim de seu trabalho de 1911, Einstein assinalou estar sujeita a verificação, por teste experimental, sua idéia de que a luz tem massa gravitacional. Ao descrever a forma dessa verificação, deixaremos de lado, inicialmente, o argumento de Newton, para mencionar argumento equivalente devido ao matemático alemão Johann Georg von Soldner que — com total desconhecimento de Einstein — havia proposto a mesma orientação em 1801!²⁵ Isso pode parecer incrível, até recordarmos que todas as pri-

²⁵ O trabalho de Soldner foi reimpresso nos *Annalen der Physik*, 65, 593, acompanhado por longa introdução de Philipp Lenard. Lenard, conhecido físico experimental, nazista entusiasta desde as primeiras horas, declarou que seu mo-

meiras teorias acerca da luz envolviam a idéia de que a luz consiste em alguma espécie de partícula. Só no século XIX é que essa noção caiu em descrédito, devido a experimentos haverem aparentemente “provado” que a luz se comportava, em muitas circunstâncias, como se fosse composta de ondas de radiação eletromagnética. Sabemos, hoje, que a luz exibe atributos que lembram tanto os de onda quanto os de partícula e que a solução desse aparente paradoxo se encontra, segundo a maioria dos físicos, na teoria quântica. Soldner executou seus trabalhos antes de haver sido demonstrada a natureza ondulatória da luz, e ele respondeu em pormenor, ao primeiro “Quesito” que se contém na ótica de Newton, onde se assenta que a luz tem a natureza de partícula. “Não agem os corpos, à distância, sobre a Luz, inclinando seus raios e não é tal ação (*caeteris paribus*) máxima à distância mínima?” Por “distância mínima” pretendia Newton significar a distância mais próxima do centro de gravidade da massa que, agindo gravitacionalmente sobre a luz, produz a curvatura dos seus raios. Soldner calculou a trajetória de uma partícula luminosa emitida por uma estrela distante, ao cruzar ela as bordas do Sol. Não era preciso que ele conhecesse a massa da partícula luminosa, pois presumia simplesmente que sua massa inercial, fosse qual fosse, anulava a equivalente massa gravitacional da mesma partícula, de sorte que a única massa a considerar, no problema, era a massa do Sol, já conhecida.

Verificou Soldner que a curvatura da trajetória da partícula luminosa dava surgimento a um efeito observável da seguinte maneira. Suponhamos, primeiro, achar-se a Terra em posição tal de sua órbita que a estrela em causa não apareça nas vizinhanças do Sol. Nesse instante, determina-se, com auxílio de telescópios e o que mais for, aquilo que se pode chamar posição “verdadeira” da estrela. Imaginemos que, em outra oportunidade, tornada possível pelo movimento terrestre, a luz da estrela em causa, que não se moveu, deva passar pela borda do Sol para atingir a Terra. Segundo o cálculo de Soldner, a trajetória do raio de luz é, agora, encurvada, com a concavidade voltada para o Sol. A trajetória se dobra em arco aproximando-se do Sol como aconteceria com uma nave espacial. Significa isso — com algum exagero, para maior clareza — que devemos agora apontar o telescópio para a borda do Sol, para ver a estrela cuja posição “verdadeira” seja — para exagerar novamente — atrás do Sol. Alterar a posição do telescópio fará parecer como se a estrela houvesse alterado sua posição — distanciada do Sol — de um pequeno ângulo. Nossa linha de visão acompanha a tangente à borda do Sol e a estrela surge no prolongamento dessa linha — e, portanto, distanciada do Sol. Em verdade, quando sua luz cruza as vizinhanças do Sol, toda estrela distante parece ter sua posição alterada segundo o mesmo ângulo, pois esse ângulo, de acordo

tivo para ver reimpresso o trabalho de Soldner (1921), era o de dar apoio à sua afirmação de que a obra de Einstein havia sido previamente criada por “arianos”.

com os cálculos de Soldner — e os de Einstein — depende apenas de propriedades do Sol, depende de sua massa e não da estrela que emitiu o raio luminoso. O ângulo previsto por esses cálculos é incrivelmente pequeno: oitenta e três segundos do arco. Na maioria dos casos, o Sol brilha tão intensamente que não é possível concretizar a verificação experimental pois, apontando o telescópio para o Sol — e isso quer dizer que se age durante o dia — dificilmente se verá estrelas. Contudo, Einstein sugeriu em 1911: *“Como as estrelas fixas em pontos do céu próximos do Sol tornam-se visíveis por ocasião de eclipses totais do Sol, essa consequência da teoria pode ser comparada com dados experimentais.”* E acrescenta: *“Com respeito ao planeta Júpiter, o deslocamento a esperar (de uma estrela que esteja em suas proximidades) é de aproximadamente 1/100 da cifra mencionada”* (Júpiter tem menor massa e, portanto, é menor o efeito). Conclui Einstein: *“Seria desejável que os astrônomos considerassem a questão aqui proposta. Independentemente de qualquer teoria, põe-se o problema de saber se é possível, com o aparelhamento de que hoje dispomos, identificar uma influência dos campos gravitacionais sobre a propagação da luz”*.

Em 1914, pouco antes do início da guerra, uma expedição de astrônomos alemães dirigiu-se à Rússia, de onde seria observável um previsto eclipse total do Sol. Antes, porém, que qualquer medição pudesse ser feita, foram os astrônomos considerados prisioneiros de guerra. (Sem o equipamento, foram libertados algumas semanas depois, trocados, por oficiais russos.) Se houvessem realizado as medições, teriam chegado a resultado que haveria interessado Einstein, mas que não lhe causaria — no estágio em que se encontravam suas idéias — muita surpresa. Em outras palavras, teriam verificado o efeito, mas um efeito duas vezes superior ao previsto em 1911 — indicando que estavam erradas pelo menos algumas das presunções em que se apoiou o trabalho de 1911. Não obstante haver ocorrido o que ocorreu, Einstein, dentro em pouco, apercebeu-se da falha em que incidia.

Antes de entrarmos em pormenores, convém deixar registrados alguns comentários de ordem geral. Como já mencionamos, foi a essa altura de seu trabalho que Einstein quase deu seu “salto quântico” em níveis de abstração matemática. A par disso, parece ter dado também um salto filosófico; o êxito obtido influenciou, daí para diante, sua visão da ciência. Os primeiros trabalhos de Einstein fundamentam-se, aparentemente, em uma espécie de concepção clarividente do significado do fenômenos físicos. Há forte sensação de proximidade dos fenômenos físicos, mesmo quando eles estão sendo descritos em termos novos e revolucionários. De outra parte, no salto que o conduziu à relatividade geral, a conexão com os fenômenos é extremamente indireta. Não se orientava ele por experimentos — os experimentos só foram efetuados vários anos depois da publicação da teoria — mas por princípios filosóficos ou epistemológicos. Um crí-

tico poderia dizer que ele se encontrava sob influência de preconceitos filosóficos e, quiçá, metafísicos. O fato de que esses princípios podiam, em suas mãos, levar a uma teoria física de incrível alcance convenceu-o do poder, inerente ao espírito humano, de compreender o universo natural. Em junho de 1933, pronunciou-se ele em Oxford. Na conferência Herbert Spencer, Einstein tentou fazer análise do que denominava “o Método da Física Teórica”. O título é algo desnorteador, pois o que ele realmente descreve é seu método de desenvolver a Física teórica, método que, naquela época, diferia quase totalmente do adotado por qualquer dos contemporâneos. De fato e em sentido algo bizarro, seu “método” mais se aproximava das atitudes filosóficas de Platão — com a ênfase platônica em formas e contornos perfeitos — do que das atitudes de qualquer físico anteriormente surgido, inclusive Newton.

A experiência até agora colhida justifica a crença de que a natureza é a concretização das mais simples dentre as idéias matemáticas concebíveis. Estou convencido de que podemos descobrir por meio de construções puramente matemáticas os conceitos e as leis que os conectam, os quais fornecem uma chave para a compreensão dos fenômenos naturais. A experiência pode sugerir os conceitos matemáticos adequados, mas, certamente, não podem eles ser deduzidos da experiência. A experiência permanece, naturalmente, como o critério único para verificação da utilidade física da construção matemática. Em certo sentido, portanto, considero verdadeiro que o espírito, nos termos em que sonharam os antigos, possa apreender a realidade.

O princípio filosófico orientador, subjacente à teoria geral da relatividade, é a convicção que tinha Einstein acerca da carência de significado do espaço vazio absoluto como entidade física. Tal como ele por vezes disse: “O espaço não é uma coisa.” Espaço e tempo só adquirem significado em termos de réguas e relógios. Isso, como vimos desempenhava papel central na formulação da teoria especial da relatividade, mas volta a apresentar-se no âmbito da teoria geral da relatividade, sob feição mais sofisticada. A teoria “especial” é especial porque diz tão-somente respeito a um tipo de movimento — o movimento uniforme, a velocidade constante, ao longo de uma linha reta. O próprio Newton acreditava — do ponto de vista das leis físicas, tal como ele as conhecia — que esse movimento não pode ser distinguido de um estado de repouso. A seu ver, entretanto, a aceleração era algo inteiramente diverso. Sentimos a aceleração — somos empurrados ou puxados — e, assim, parece razoável sustentar que podemos medir as acelerações, mesmo no espaço “vazio” em algum sentido absoluto.

Os exemplos mais comumente examinados por Newton diziam res-

peito às rotações. Imaginemos, por exemplo, ter dois pesos ligados por um fio, pesos esses que giram em torno de um ponto central. É fato comprovado pela experiência comum o de que ambos esses pesos solicitam o fio. Pode parecer e pareceu a Newton que se poderia usar o valor da tensão exercida sobre o fio como forma de medir, no espaço vazio, a aceleração absoluta desses pesos em rotação. Esse procedimento pode parecer razoável até começarmos a analisar as forças que, do ponto de vista newtoniano, devem agir sobre os corpos em causa para produzir a rotação observada. Exemplo particularmente claro é o que faz referência à órbita estacionária dos satélites síncronos utilizados para transmissão de sinais de rádio. Como é sabido, para obter essa órbita, o satélite é lançado paralelamente ao equador da Terra, de sorte que a velocidade de rotação do satélite, vista do Pólo Norte, corresponde exatamente à velocidade com que um ponto situado sobre a linha do equador gira em relação ao pólo. Conseqüentemente, e tal como visto do equador, o satélite paira sobre um ponto fixo do mesmo equador. Uma pessoa postada no equador concluiria, do ponto de vista newtoniano, que, não mostrando o satélite qualquer aceleração — permanece simplesmente estacionário — nenhuma força, conforme a lei de Newton, estaria agindo sobre ele. Sabemos, não obstante, que a força da gravidade está puxando o satélite para baixo: à vista disso, um newtoniano seria forçado a afirmar a existência de uma outra força, que equilibra a força da gravitação, impelindo o satélite para cima. A essa força chega-se a dar um nome, em livros elementares de física. É denominada “força centrífuga”. Embora os estudantes que se iniciam em Física aprendam a empregar as equações que definem essa “força”, sentem-se, freqüentemente, não muito à vontade e isso com boa razão.

Diversamente de outras forças de que a Física se ocupa, a força centrífuga não parece estar associada à influência de objetos vizinhos sobre um determinado objeto. A força de gravitação é produzida pela proximidade de corpos materiais; as forças elétricas são produzidas pela presença de objetos eletricamente carregados; e assim por diante. A força centrífuga, entretanto, parece surgir da relação entre um objeto e o espaço vazio. Em seu trabalho de 1916, a propósito da teoria geral da relatividade, Einstein ofereceu uma ilustração gráfica da peculiaridade dessa situação. Imaginou um universo que fosse formado por duas esferas idênticas feitas de material plástico deformável. De acordo com a Física newtoniana, podemos imaginar uma situação em que uma esfera se deforme passando a constituir um elipsóide, enquanto a outra permanece perfeitamente esférica — apesar de ambas estarem totalmente afastadas da influência de quaisquer objetos externos e apesar de ambas as esferas exercerem idêntica influência recíproca: tal é a situação que se apresenta quando uma esfera se põe a girar em torno de seu eixo, enquanto a segunda permanece em repouso. A esfera em rotação sofrerá “forças centrífugas” que a levarão a deformar-se — ou, pelo menos, isso é que sustentariam os newtonianos.

Mas, se indagarmos qual a causa da força centrífuga, um newtoniano só poderá responder que ela reside na rotação da esfera com respeito ao espaço vazio, ou absoluto. De fato, em muitos livros elementares de Física, faz-se referência às forças centrífugas chamando-lhes “forças fictícias”, de vez que desaparecem quando o sistema em rotação passa ao estado de repouso. Poder-se-ia indagar, inicialmente: por que se torna preciso introduzir tais forças? Do ponto de vista newtoniano, a resposta é muito clara — sem ela torna-se falsa a lei de Newton que relaciona a força à aceleração.

O caso do satélite síncrono, atrás referido, ilustra esse fato. A única força “real” que atua sobre o satélite é a força de gravidade e, conseqüentemente, se não se tivesse em conta a força centrífuga, o satélite, conforme a lei de Newton, deveria tombar sobre a Terra, o que contradiz a experiência.

A primeira pessoa a criticar esse ponto de vista newtoniano foi, é interessante sublinhá-lo, um contemporâneo de Newton, um filósofo irlandês, o bispo Berkeley. Vinte anos depois da publicação dos Principia, Berkeley sustentou, em termos surpreendentemente modernos, que não tinha sentido atribuir forças à influência do espaço absoluto e avançou, indo ao ponto de adiantar a suspeita de que talvez estivesse em causa a influência de remotas estrelas em rotação. Os contemporâneos de Berkeley acharam que isso era absurdo e não havia, de qualquer modo, como acomodar essa forma de ver ao contexto da gravitação newtoniana. O assunto foi mais ou menos esquecido até o século XIX. O verdadeiro precursor do ponto de vista moderno, o homem que exerceu decisiva influência sobre o jovem Einstein foi o físico, filósofo, fisiologista e polímata austríaco Ernst Mach. No mundo alheio à Física, Mach é conhecido — quando o é — pelos números Mach: Mach 1, por exemplo, corresponde à velocidade do som no ar, a temperatura e pressão normais, e tem importância no campo da dinâmica do escoamento de ar relativamente a um objeto em movimento — asa de aeronave — quando esse objeto se desloca à velocidade do som. (Mach realizou significativos trabalhos experimentais acerca do assunto — daí os números Mach.) Aos olhos de seus contemporâneos, entretanto, Mach aparecia como um gigante intelectual de enorme influência. Em 1882, William James ouviu-o falar em Praga — onde Mach foi o primeiro Reitor da Universidade procurada por Einstein em 1910 — e escreveu: “Creio que pessoa alguma jamais produziu em mim mais forte impressão de puro gênio intelectual. Tem-se a impressão de que tudo foi lido por ele e que ele refletiu a propósito de tudo e são encantadores sua absoluta simplicidade de maneiras e o sorriso aliciante no rosto que se ilumina”.

Mach encarou com visão devastadoramente crítica os fundamentos da Física e propôs-se a afastar tudo quanto fosse “metafísico” — isto é, qualquer elemento impossível de ver-se diretamente ligado à experiência sensível. Seu juízo nem sempre foi infalível — rejeitou, até data próxima

de sua morte (1916), o conceito de átomo — e Einstein, após o êxito da relatividade geral, rejeitou a expressão mais simples do “machismo”. Em 1917, Einstein escreveu a Besso, seu colega do Bureau de Patentes, que nos tempos de estudante lhe dera a conhecer os escritos de Mach

e mencionou um manuscrito que Friedrich Adler havia enviado a Besso. Einstein comentou: “ele monta o pobre cavalo de Mach até a exaustão”. A isso, Besso — leal adepto de Mach — responde, em 5 de maio de 1917: “Quanto ao pequeno cavalo de Mach, não cabe insultá-lo; não tornou ele possível a infernal jornada através das relatividades? E — quem sabe? — no caso dos aborrecidos quanta, conduzirá também Don Quixote de la Einstein através de tudo!”... reveladora a resposta de Einstein, datada de 13 de maio de 1917: “Não invisto contra o pequeno cavalo de Mach, mas você sabe o que penso a respeito dele. Não pode dar nascimento a nada, só é capaz de exterminar a erva daninha”.

O livro de Mach, dado por Besso a Einstein em 1897, era *Ciência da Mecânica*, que está entre as obras de cunho crítico mais importantes para o desenvolvimento da Física moderna, e a “erva daninha” que ela exterminava era a concepção de espaço absoluto, proposta por Newton. Todas as páginas da *Mecânica* estão cheias de uma espécie de fúria polêmica e daquilo que Einstein chamou “o ceticismo e independência incorruptíveis” de Mach. Leia-se uma passagem típica:

É praticamente desnecessário assinalar que, no campo das reflexões aqui apresentadas, Newton agiu contrariamente à sua expressa intenção de apenas investigar fatos reais. Ninguém tem como pregar acerca do espaço absoluto e do movimento absoluto; são puros frutos do espírito, puras construções mentais que não admitem tradução experimental. Todos os nossos princípios de mecânica correspondem, como demonstramos em pormenor, a conhecimento experimental concernente a posições e movimentos relativos dos corpos. Mesmo nos setores em que são agora reconhecidos como válidos, não puderam ser e não foram admitidos sem prévia sujeição a teste experimental. Ninguém está autorizado a estender esses princípios para além das fronteiras da experiência. Em verdade, essa extensão carece de sentido, pois ninguém possui o conhecimento necessário para utilizá-la.

Naturalmente que uma coisa é a capacidade de criticar idéias científicas e outra coisa é ser capaz de criar idéias novas — e essas duas faculdades nem sempre convivem na mesma pessoa. Se Mach fosse mais jovem

quando da publicação de Ciência da Mecânica (isso ocorreu em 1883 e ele tinha quarenta e cinco anos), talvez tivesse descoberto a teoria geral da relatividade. Não o fez, mas fez importante reformulação da idéia do bispo Berkeley, segundo a qual uma matéria situada em locais remotos do universo pode influenciar o comportamento de objetos que estejam sofrendo acelerações, isto é, pode proporcionar uma explicação física para a força centrífuga. Essa reformulação é hoje conhecida como Princípio de Mach. Mach afastou os exemplos de Newton, que se referiam a corpos girando isolados, sob alegação de que, no universo real, não há coisas tais como corpos isolados, pois que não se pode desprezar os efeitos produzidos pelas estrelas distantes. Não se dispunha de evidência experimental acerca de como se comportaria um corpo — uma das esferas de Einstein — posto em rotação em um universo vazio, pois, tanto quanto sabemos, não há um universo vazio. Como diz Mach:

Para mim, só existem movimentos relativos. (...) Quando um corpo gira relativamente às estrelas fixas, surgem forças centrífugas; quando ele gira relativamente a outro corpo e não relativamente às estrelas fixas, as forças centrífugas não se manifestam. Não tenho objeção a que se dê o nome de rotação ao primeiro movimento, contanto que seja lembrado pretender-se significar apenas que se trata de rotação relativa, referida às estrelas fixas.

Einstein deu-se conta desde o início — desde 1908, segundo referem suas notas — que a teoria especial da relatividade não poderia erigir-se em base satisfatória de uma teoria da gravitação que abrangesse o princípio da equivalência e o princípio de Mach. A razão estava em que a teoria especial se apóia numa concepção geométrica do espaço e do tempo, que não é suficientemente ampla para incluir os efeitos de aceleração e, portanto, a gravidade. Esse ponto básico pode ser tornado claro através de um exemplo, também usado com frequência por Einstein. Imaginemos um disco circular chato, posto em rotação ao redor de um ponto central — uma roda girando. Segundo a Física clássica, a geometria desse disco permanece euclidiana, mesmo depois de ele entrar em rotação. Falando em geometria euclidiana, quer-se dizer, neste caso, que, medida a circunferência do disco e dividida ela pelo diâmetro do mesmo disco, o resultado é sempre o célebre número “pi”. (Com várias casas decimais, o número “pi” é igual a 3,1415927...) Isso é verdade para todos os círculos, em um universo euclidiano. A teoria da relatividade ensina, entretanto, que um segmento do perímetro do disco em rotação sofre uma contração de Lorentz, nos termos medidos por um observador que se encontre num ponto central fixo em torno do qual o perímetro esteja em rotação. De outra parte, o diâmetro do círculo não é atingido pela contração de Lorentz, de vez que se coloca em ângulo reto para com a direção da velocidade de um

ponto do perímetro. (Em um círculo real, traçado a lápis, o diâmetro teria alguma largura e esta se veria sujeita à contração de Lorentz; mas nós estamos imaginando um círculo ideal, com diâmetro ideal — segmento de reta sem largura.) Dessa forma, a razão circunferência/diâmetro não mais será “ π ”, de acordo com a teoria da relatividade e, conseqüentemente, uma vez consideradas as acelerações, a geometria deixará de ser euclidiana.

Observações semelhantes são aplicáveis aos relógios. Aos olhos de um observador postado em ponto central, relógios que estejam no perímetro do disco e mesmo em pontos intermediários se “atrasarão” com respeito ao relógio central. Assim, no disco, não será possível estabelecer qualquer sistema geral de coordenadas espaço-tempo, no sentido da teoria especial da relatividade. Não se pode construir tal sistema recorrendo a réguas e relógios, pois que há contração, no caso das réguas, e atraso, no caso dos relógios, ocorrendo isso com variado grau de intensidade, de ponto para ponto do disco, tal como visto por observador colocado no ponto central. Esse foi o grande obstáculo que impediu Einstein de chegar a uma imediata generalização da teoria especial, que abrangesse os movimentos sujeitos a aceleração.

Logo percebi que considerar transformações não-lineares (generalizando as transformações de Lorentz para incluir as acelerações), como pedido pelo princípio da equivalência, era fatal para a simples interpretação física das coordenadas — isto é, não mais se poderia exigir que diferenciais de coordenadas significassem resultados diretos de medidas com réguas ou relógios ideais. Muito me perturbou esse ponto, pois longo período haveria de decorrer antes de eu dar-me conta do que as coordenadas em geral realmente significam no campo da Física. Não encontrei solução para essa dificuldade senão em 1912.

A “solução dessa dificuldade” não é de explicação fácil para leitores sem preparo matemático. Modificou, entretanto, de maneira tão profunda nossas concepções acerca do espaço, do tempo, do cosmos que vale a pena tentar transmitir pelo menos sua essência. A esta altura, oferecemos apenas uma visão geral, abreviada e didática, reservando-nos para, mais adiante, examinar o assunto pormenorizadamente. A essência da nova concepção de Einstein é que existe uma conexão, insuspeitada até aquele momento, entre a geometria do espaço-tempo e a gravitação. Deparamos com uma entrevisão desse ponto ao examinarmos o problema da reflexão da luz, nos termos em que Einstein o apresentou em seu trabalho de 1911. Afinal de contas, a geometria, em seu todo, depende do comportamento das linhas “retas” e, em última análise, determinamos o caráter reto de uma linha recorrendo à luz e à sua propagação. Se, em presença da gravi-

tação, os raios de luz não obedecem à geometria euclidiana, devem ser modificados nossos conceitos de geometria física. Na prática, esses efeitos são reduzidos, pois, como já fizemos notar, a gravitação é, na maioria dos casos, a menos intensa de todas as forças conhecidas. Não obstante, em certas circunstâncias, esses pequenos efeitos se tornam mensuráveis — deflexão da luz em razão da presença do Sol, por exemplo. O trabalho de 1911 é, entretanto, insatisfatório porque toma a gravitação newtoniana como entidade isolada — algo conhecido e estabelecido — que atua sobre a luz. E, tal como sublinhamos acima, a lei da gravitação universal, de Newton, é insatisfatória porque, de um lado, não explica o princípio da equivalência e, de outro, põe-se na dependência da ação do espaço absoluto.

Em sua nova abordagem, Einstein substitui as equações da gravitação newtoniana por um novo conjunto de equações que apresentam a propriedade de reterem a própria forma em todos os possíveis sistemas de coordenadas, haja aceleração ou seja o movimento uniforme. Einstein chegou a essas equações postulando que devem corresponder às expressões matemáticas mais simples, compatíveis com aquela invariância geral. Consequentemente, as equações são, em essência, impostas, pois que se estabelece a presunção de que o espaço absoluto não pode desempenhar qualquer papel em Física. Essas equações determinam a geometria do espaço-tempo. Onde não há gravidade — ou seja, a considerável distância de objetos de grande massa — essa geometria é a geometria pseudo-euclidiana do mundo minkowskiano da relatividade especial. Essa geometria é chamada “plana” porque a luz se propaga em linhas retas, cujo comportamento obedece aos axiomas de Euclides. Em presença da gravitação, a geometria do espaço-tempo se altera, o que, muitas vezes, se expressa dizendo que o espaço-tempo é “inclinado”, ou “curvo” — significando isso tão-somente que as figuras construídas com base em raios de luz não satisfazem à geometria euclidiana, caso os raios se estejam propagando na presença de matéria em gravitação. Não obstante, é significativo dizer que os raios de luz propagam-se segundo as “geodésicas”, ou seja, as curvas que desempenham o papel de linhas retas na geometria nova.²⁶ São

²⁶ A esta altura, convém, talvez, colocar importante observação técnica. No trabalho de 1916, Einstein sentiu-se compelido a estabelecer o postulado de que os objetos materiais, bem como a luz, seguem trajetórias geodésicas em um campo gravitacional. Contudo, em 1938, trabalhando em colaboração com Infeld e Banesh Hoffman, pôde mostrar que esse postulado era, em certo sentido, dispensável. Nesse trabalho, um objeto material é abstratamente caracterizado como um ponto do espaço-tempo onde o campo gravitacional se torna infinitamente intenso — uma “singularidade”. Teve ele como demonstrar que as soluções para as equações de campo poderiam ser obtidas de modo a conterem pontos singulares situados apenas ao longo de geodésicas, significando isso que as “partículas” seguem necessariamente essas trajetórias. Esse trabalho foi, talvez, o último exe-

geodésicas dessa geometria esférica, por exemplo, os grandes círculos traçados sobre o globo terrestre para indicar latitudes e longitudes. Em certos casos simples, as equações de Einstein podem ser resolvidas por aproximação. Na aproximação em que os efeitos gravitacionais são fracos, elas se confundem com a lei de Newton, embora peçam interpretação geométrica nova. Em razão disso, a estrutura geral do movimento planetário, segundo as leis de Newton, continua a ser considerada aproximadamente correta. Contudo, em relação a um raio de luz que se desloque nas vizinhanças do Sol, importa fazer correções nas previsões newtonianas. O espaço é suficientemente “curvado” pela gravitação do Sol para que a geodésica da luz se comporte diferentemente da previsão newtoniana. Em verdade, a nova teoria prediz que deve haver uma aparente alteração da posição das estrelas cuja luz passa próximo à superfície do Sol — alteração essa que é de 1,74 segundos de arco; ou seja, duas vezes superior ao previsto pela teoria newtoniana de que Einstein se valeu para redigir o trabalho de 1911.²⁷

Essa previsão foi dada a público por Einstein em 1916, quando a Primeira Guerra Mundial alcançava o clímax. Não surpreende, pois, que a previsão só haja sido submetida a teste em 1919, depois de terminada a guerra.

cutado por Einstein a propósito de cuja importância e significação todos os físicos se mostraram concordes. E o êxito por ele obtido parece tê-lo levado a convencer-se de que se encontrava no caminho certo para chegar a uma descrição última da matéria. Nunca pôde concretizar o restante do programa, que deveria incluir outras forças além da gravitação, e a maioria dos físicos acredita que o trabalho não possa ser realizado sem incluir elementos da teoria quântica, o que Einstein não estava preparado para fazer. Conseqüentemente, ele seguiu esse caminho durante o resto da vida, quase em isolamento. (Agradeço a Freeman Dyson por haver-me chamado a atenção para esse aspecto da obra da última parte da vida de Einstein.)

²⁷ Aqui também importa notar que a diferença entre essa predição e a do trabalho de 1911 não é simplesmente relativa ao fator numérico, mas, antes, ao conjunto do alicerce teórico. Na teoria de 1916, parte da deflexão da luz é atribuída a uma alteração de geometria do espaço e parte ao fato de que os relógios se atrasam quando expostos a um campo gravitacional -- ponto a que breve tornaremos. Os argumentos contidos no trabalho de 1911 levaram a uma correta predição do atraso dos relógios, mas não da alteração da geometria espacial. Pode-se dizer, em conseqüência, que os experimento que confirmam o retardamento dos relógios apenas confirmam, em verdade, o princípio da equivalência, enquanto que a deflexão da luz confirma a idéia de que a geometria do espaço e do tempo — do espaço-tempo — é determinada pela gravidade. Essa a razão por que muito esforço foi dedicado ao repetir e aperfeiçoar essas medidas.

x. A primeira guerra mundial e a deflexão da luz

Em 1914, pouco depois de Einstein haver-se mudado de Zurique para Berlim, a guerra começou.

Os anos da Primeira Guerra Mundial foram para ele a um tempo muito difíceis e muito felizes. Em 1914, pouco depois de chegarem a Berlim, Einstein e sua mulher se separaram, tendo ela retornado a Zurique, em companhia dos dois filhos. Durante a guerra, Einstein reencontrou pessoas de sua família que estavam vivendo em Berlim ou, melhor dito, elas o reencontraram. Por longo tempo, Einstein havia aparecido como irresponsável boêmio aos olhos de seus ricos e sóbrios parentes, membros da classe média berlinense; agora, entretanto, que ele pertencia à Real Academia Prussiana, causava satisfação reconhecê-lo como parente. Isso foi conveniente para Einstein, pelo menos sob dois prismas. Ele frequentemente adoecia — em parte, sem dúvida, por alimentar-se mal, pois, solteiro de novo, sua dieta acompanhava os caprichos dos restaurantes de uma Berlim em tempo de guerra. Na casa de um tio, ele era bem alimentado e gozava da companhia de sua prima Elsa, que havia enviuvado recentemente e ficara com dois filhos; era “mulher de temperamento afetivo, maternal, apreciadora de conversas deleitosas e interessada em criar ambiente agradável”. Quando Einstein a desposou, em 1919, houve alguma crítica nos ambientes acadêmicos de Berlim, comentando-se que ela não era suficientemente “intelectual” para ele. “Entretanto”, como sublinhou o professor Philipp Frank, “se Einstein houvesse dado ouvidos a esse tipo de crítica, qual a mulher com quem poderia ter-se casado?”... A vida conjugal dos grandes homens tem sido sempre um problema, independentemente de como sejam eles ou suas mulheres. Nietzsche observou certa vez: “Um filósofo casado é, para dizê-lo delicadamente, uma figura ridícula”. Seja como for, há toda evidência de que o segundo casamento de Einstein foi feliz e sua prima teve a habilidade de proporcionar-lhe a serena vida caseira de que ele necessitava para realizar sua obra.

Desde a primeira infância, Einstein abrigava sentimentos pacifistas profundamente enraizados. Simplesmente odiava e detestava guerra e soldados — palavras mais fracas não traduziriam seus sentimentos. Assim, iniciada a Primeira Guerra Mundial, recusou-se ele a ligar-se ao célebre Manifesto ao Mundo Civilizado, que terminava expressando a idéia de que a cultura e o militarismo alemão tinham de ser aceitos em conjunto e que recebeu as assinaturas de noventa e três proeminentes artistas, cientistas e escritores alemães (inclusive Planck). Em verdade, Einstein tentou ligar-se a pacifistas de outros países, entre os quais Romain Rolland, autor de *Jean-Christophe*. Rolland, que havia caído em desfavor na França, vivia próximo de Genebra, e Einstein, após ter visitado seus filhos em Zurique, visitou-o no mês de setembro de 1915. Rolland registrou, em seu diário, algumas impressões que lhe ficaram desse encontro:

Einstein é ainda jovem (tinha, então, trinta e seis anos), não muito alto, rosto largo e longo, abundantes cabelos crespos, anelados, muito pretos, com manchas grisalhas, altos, sobre uma fronte ampla. Nariz grande e proeminente, boca pequena, lábios cheios, faces arredondadas, queixo redondo. Usa pequeno bigode. Fala um francês vacilante, entremeando-o de alemão. É muito alegre e gosta de rir. Não pode impedir-se de emprestar caráter jocoso aos mais sérios pensamentos. Einstein é extremamente franco em suas opiniões acerca da Alemanha, onde vive, e que é sua segunda pátria (ou primeira). Nenhum outro alemão age e fala com o mesmo grau de liberdade. Outro homem poderia ter sofrido com a sensação de isolamento experimentada durante esse terrível ano passado, mas não ele. Ri. Encontrou meio de, ao longo da guerra, escrever sua mais importante obra científica. Pergunto-lhe se transmite suas idéias a amigos alemães e se as discute com eles. Responde-me que não. Limita-se a inquiri-los, à maneira socrática, para desafiar-lhes a complacência. As pessoas não apreciam muito esse comportamento, diz-me ele.

O próprio Einstein escreveu a seu amigo, o físico Paul Ehrenfest:

A Europa, em sua insanidade, entregou-se a algo inconcebível. Em tempos como este, percebe-se a que triste espécie de animal pertencemos. Continuo silenciosamente meus estudos e contemplações pacíficos e só sinto pena e desgosto. O astrônomo Freundlich (chefe da mal sucedida expedição de 1914) tornou-se prisioneiro de guerra na Rússia, em vez de poder observar o eclipse do Sol. Preocupo-me com ele.

Einstein prosseguiu em seus estudos pacíficos durante toda a guerra — escreveu cerca de trinta trabalhos entre 1915 e 1918 — mas, como já referimos, não houve possibilidade de verificação da teoria geral da relatividade antes de terminado o conflito. Não há dúvida de que, mais cedo ou mais tarde, seria feita a tentativa de submeter a teste a teoria de Einstein a propósito da deflexão da luz. Contudo, o fato de duas expedições haverem sido organizadas pelos ingleses em 1919, logo depois do término da guerra, deveu-se, por certo, ao interesse de Sir Arthur Eddington e à compreensão que ele tinha das revolucionárias implicações da relatividade geral. Além disso, Eddington era “quaker”, o que lhe dava especial consciência da oportunidade que uma expedição dessa ordem proporcionaria no sentido de restabelecer alianças científicas rompidas pela guerra. Desde o início, a teoria da relatividade atraiu Eddington. Quanto estava ele convencido da verdade da teoria pode ser avaliado pelo fato de que, ao ser per-

guntado por um dos membros do grupo de Eddington, o que aconteceria se as observações dessem resultado igual ao dobro do previsto por Einstein, Sir Frank Dyson, astrônomo real, respondeu: “Eddington enlouquecerá e você terá de voltar para casa sozinho”.

Não há como aperfeiçoar a descrição que, em seu clássico livro a respeito da relatividade, *Space, Time and Gravitation*, Eddington fez dos acontecimentos de 1919:

Em uma era de superstição, o filósofo natural que desejasse realizar um experimento consultaria um astrólogo, a fim de determinar o momento favorável para a tentativa. Com melhor razão, um astrônomo de hoje, consultando as estrelas, proclamaria que o dia do ano mais propício para pesar a luz é o dia 29 de maio. O motivo está em que, se o Sol, na sua jornada atual, atravessa campos de estrelas de variada riqueza, no dia 29 de maio ele se encontra em meio de um excepcional conjunto de brilhantes estrelas — parte das Híades — que é, sem comparação, o mais belo campo estelar. Ora, se o problema se houvesse colocado em algum outro período da história, teria sido preciso aguardar alguns milhares de anos para que ocorresse eclipse em data conveniente. Contudo, por estranha e feliz coincidência, ocorreu um eclipse no dia 29 de maio de 1919.

Em março de 1917, o Astrônomo Real alertou os astrônomos britânicos a respeito dessa oportunidade e começaram a ser feitos preparativos para duas pequenas expedições. Uma delas deveria dirigir-se a Sobral, na parte norte do Brasil, e a outra, a de Eddington, à Ilha do Príncipe, no golfo da Guiné, África Ocidental — estando ambos esses pontos situados na faixa de eclipse total. Eddington e outros astrônomos chegaram à Ilha do Príncipe na primavera de 1919, portando um grande telescópio e muito material fotográfico; ali permaneceram por mais de um mês.

No dia do eclipse, as condições atmosféricas eram desfavoráveis. Quando o eclipse total se iniciou, o escuro disco da Lua, rodeado pela coroa, era visível através das nuvens, e a Lua se apresentava muito à semelhança de como se apresenta, frequentemente, em meio a nuvens, numa noite sem estrelas. Nada havia a fazer senão executar o programa e esperar o melhor. Um dos observadores foi encarregado de mudar as placas em rápida sucessão, enquanto outro dava o tempo de exposição adequado, utilizando um anteparo diante da objetiva, a fim de evitar qualquer oscilação do telescópio.

E dentro e fora e acima e abaixo e nas cercanias,
Nada mais havia que um mágico espetáculo de sombras

Desenrolado em uma Caixa iluminada pelo Sol
Em torno da qual figuras fantasmagóricas se moviam.

Em nossa caixa de sombras concentra-se toda a atenção. No alto, desenrola-se um espetáculo maravilhoso e, tal como as fotografias posteriormente revelaram, grandiosa labareda se projetava cem mil milhas acima da superfície do Sol. Não temos um instante sequer para olhá-la. Só temos consciência da fantástica meia-luz em que mergulhou a paisagem e da quietação da natureza, quebrada apenas pela voz dos observadores e pelas batidas do metrônomo que marca os 302 segundos de eclipse total. (...)

[Obtivemos dezesseis fotografias das quais apenas] uma mostrava imagens razoavelmente claras de cinco estrelas, adequadas para a determinação que nos interessava. A medida se fez no local, uns poucos dias após o eclipse, por meio de máquina de mensuração micrométrica. O problema era o de determinar como as posições aparentes das estrelas afetadas pelo campo gravitacional do Sol se colocavam em relação às posições normais por elas ocupadas em fotografias colhidas quando o Sol não estava na trajetória. Para efeito de comparação, fotografias normais haviam sido tiradas, com auxílio do mesmo telescópio, no mês de janeiro, na Inglaterra. A fotografia colhida durante o eclipse e a fotografia tirada para efeito de comparação foram colocadas na máquina de mensuração, de modo que as imagens correspondentes quase se superpussem e as pequenas distâncias de separação foram medidas em duas direções perpendiculares. A partir daí, podiam ser determinados os deslocamentos relativos das estrelas. Os resultados do exame da chapa apontaram um deslocamento definido, em bom acordo com a teoria de Einstein e discordando da predição newtoniana. Embora o material fosse muito escasso em relação ao que se esperava, este autor (que, deve admitir, não ocupava posição inteiramente imparcial) considerou o resultado convincente.

O experimento da Ilha do Príncipe indicou um deslocamento de 1,61 segundos de arco, com margem de erro experimental de 30 segundos; os dados de Sobral indicaram 1,98 segundos, com margem de erro de 12 segundos; ambos os resultados situavam-se em razoável concordância com a previsão de 1,74 segundos, feita por Einstein. Considerou-se a evidência suficientemente sólida e foi ela apresentada em sessão conjunta da Royal Society e da Royal Astronomical Society, em Londres, no mês de novembro de 1919. Tendo em conta o que se discutia e a ligação do nome de Newton aos primeiros tempos da Royal Society, a atmosfera do encontro deve ter sido excepcional. Alfred North Whitehead, que estava presente, dela fez uma descrição:

A atmosfera, impregnada de tenso interesse, era exatamente a dos dramas gregos. Compúnhamos o coro, comentando o decreto do destino, tal como se revelava no desenvolvi-

mento de um incidente supremo. No próprio ambiente havia qualidade dramática — a cerimônia tradicional e, ao fundo, o retrato de Newton para lembrar-nos de que a maior das generalizações científicas estava, agora, passados mais de dois séculos, a ponto de receber sua primeira modificação. E nem faltava o elemento do interesse pessoal; uma grande aventura do pensamento concretizava-se, enfim.

Há duas alusões à reação de Einstein em face da primeira confirmação experimental de sua teoria. Uma delas é feita por Ilse Rosenthal-Schneider, aluna de Einstein em 1919, que o encontrou logo após haver ele recebido informação acerca da expedição que observara o eclipse.

Ele subitamente interrompeu a discussão (...) apanhou um telegrama que estava no peitoral da janela e o deu a mim, dizendo: “Olhe, isso talvez possa interessá-la”. Era o telegrama de Eddington, comunicando os resultados colhidos pela expedição que acompanhara o eclipse. Quando eu expressei alegria pelo fato de os resultados coincidirem com os cálculos, ele disse tranqüilamente: “Eu sabia que a teoria é correta”; e quando lhe perguntei o que teria acontecido se não se vissem confirmadas suas previsões, comentou: “Da kōnnt’ mir halt der liebe Gott leid tun, die Theorie stimmt doch” (Então eu lamentaria pelo bom Deus — mas a teoria está correta).

E no dia 27 de setembro de 1919, depois de haver recebido um telegrama de Lorentz — “Eddington verificou deslocamento de estrela na orla do Sol” — que tinha sido informado dos resultados da análise dos dados colhidos, antes de eles se tornarem oficiais, Einstein enviou a sua mãe (então hospitalizada em Lucerna) um cartão postal que, apesar de dizer respeito principalmente a questões de família, se inicia com as palavras “Boas notícias hoje. H. A. Lorentz telegrafou-me dizendo que a expedição inglesa constatou a deflexão da luz pelo Sol”.

Examinaremos evidência mais recente, favorável à teoria geral da relatividade, mas é interessante apresentar, a esta altura, uma lista parcial de mensurações bem sucedidas, levadas a cabo por ocasião de eclipses ocorridos até o ano de 1952.²⁸ Na primeira coluna, figura o patrocinador da observação e, na terceira, o resultado, acompanhado do erro quotado (em segundos de arco):

²⁸ A relação foi retirada de D. W. Sciama, *The Physical Foundations of General Relativity*, 71. O professor Sciama, agora em Oxford, participou da expedição de 1954 que, tendo encontrado mau tempo, não pôde tirar quaisquer fotografias. Essa é apenas uma parte da relação de Sciama, bastando, porém, para dar idéia acerca do trabalho e de seu caráter internacional.

Greenwich	Austrália, 21 de setembro de 1922	1.77 0.40
Potsdam	Sumatra, 21 de setembro de 1929	1.82 0.20
Sternberg	U.R.S.S., 19 de junho de 1936	2.73 0.31
Sendai	Japão, 19 de junho de 1947	2 13 1.15
Yerkes	Brasil, 20 de maio de 1952	2.01 0.27
Yerkes	Sudão, 25 de fevereiro de 1952	1.70 0.10

O fato de esses números apresentarem ampla “dispersão” indica o quão difícil é atingir precisão em observações astronômicas. Se essa fosse a única evidência em favor da teoria, não se poderia evitar uma sensação de mal-estar. Há, porém, como veremos, grande número de evidências outras, concernentes a tipos de fenômenos inteiramente diversos. E aí está a extraordinária harmonia e beleza da teoria como um todo. É como se — em palavras que Einstein teria usado — o Velho tivesse permitido breve afastamento das nuvens de mistério que rodeiam os segredos últimos do mundo. E, através do gênio de Einstein, alcançamos visão nova.

Para Einstein, o resultado da expedição marcou o fim de sua vida como pessoa comum. A partir do dia em que se anunciou a deflexão da luz estelar pelo Sol, Einstein tornou-se uma figura pública, uma sensação e um símbolo. Essa mudança coincidiu com as primeiras manifestações anti-semitas na Alemanha (que se encontrava, então, em estado vizinho ao de guerra civil), algumas das quais chegaram a ser dirigidas contra Einstein e contra a “Física judaica”. Talvez tivesse ele esses fatos em mente, quando o Times de Londres lhe pediu uma versão popular da teoria da relatividade, levando-o a escrever, aos 28 de novembro de 1919, um artigo a que acrescentou um pós-escrito:

Algumas afirmações acerca de minha pessoa e de minha vida, que foram estampadas em seu jornal, devem-se à imaginação viva do articulista. Eis aqui, para deleite do leitor, uma outra aplicação do princípio da relatividade: Hoje sou apresentado, na Alemanha, como um “sábio alemão” e, na Inglaterra, como um “judeu suíço”. Se eu viesse a ter o destino de ser apresentado como uma bête noire, eu me transformaria em “judeu suíço” para os alemães e em “sábio alemão” para os ingleses.

xi. Geometria e cosmologia

Já acentuei que o principal resultado da teoria da gravitação de Einstein é que a presença da gravitação, o efeito de um corpo como um planeta, ou o Sol, é modificar a geometria do espaço ou, posto em termos mais gerais, do espaço e do tempo. É fácil deixar-se arrastar pela fantasia ou dominar pela confusão, quando se trata de precisar o que signifique

aquela asserção e, por isso mesmo, é importante manter a discussão em bases muito concretas. Na geometria de Euclides, todo triângulo tem três ângulos cuja soma é exatamente cento e oitenta graus. É isto que significa um triângulo em geometria euclidiana. Traçando um triângulo no chão, poderíamos, talvez, indagar se a soma dos ângulos desse triângulo é igual a cento e oitenta graus. Em termos estritos, a resposta é não, porque o chão é parte da Terra e a Terra é uma esfera — um globo — e triângulos traçados sobre um globo não apresentam, como soma dos ângulos, cento e oitenta graus. (O leitor poderá tomar de um globo e sobre ele traçar um triângulo que tenha o ápice no Pólo Norte e a base no Equador; e verificará que a soma dos ângulos desse triângulo é superior a cento e oitenta graus.) Saber se um triângulo construído pela natureza é ou não é euclidiano resolve-se em problema de mensuração física. A questão relativa à existência de geometrias não-euclidianas foi levantada pelo matemático alemão Carl Friedrich Gauss, em fins do século XVIII, começos do século XIX. Gauss e, posteriormente, Johann Bolyai e Nikolai Lobachewski construíram geometrias perfeitamente coerentes e não-euclidianas. Nessas geometrias, é possível demonstrar todos os tipos de teoremas corretos, ainda que os ângulos dos triângulos não somem, necessariamente, cento e oitenta graus. A obra foi continuada pelo matemático alemão Bernhard Riemann, que viveu no século XIX.

A situação pode ser resumida nos termos seguintes: há três tipos gerais de geometria — em primeiro lugar, a geometria comum, euclidiana, caracterizada por triângulos de cento e oitenta graus. Essa geometria é chamada “plana”, porque é a geometria de uma superfície plana. Há, em seguida, a geometria estudada por Riemann, na qual a soma dos ângulos de um triângulo é sempre superior a cento e oitenta graus. Essa geometria é chamada “elíptica”, ou geometria de uma superfície com curvatura “positiva”, como é o caso de uma esfera. E há, finalmente, a chamada geometria “hiperbólica”, devida a Gauss e seus continuadores, na qual a soma dos ângulos de um triângulo é inferior a cento e oitenta graus. Pode-se visualizar essa geometria como uma geometria de superfícies de curvatura “negativa”, conformada à semelhança de um funil.

Em 1900, ocorreu ao astrônomo alemão Karl Schwarzschild, de Gottingen, a idéia de determinar efetivamente a geometria do espaço, recorrendo aos raios de luz de uma estrela que atingissem a Terra em dois pontos de sua órbita, amplamente separados. Dessa maneira, formar-se-ia um enorme triângulo e Schwarzschild desejava saber qual seria a soma de seus ângulos e, portanto, a “curvatura” do espaço. Aparentemente, ele não se filiava a qualquer teoria, sentindo-se simplesmente intrigado pelo problema. Escreveu:

Aqui nos encontramos, se quisermos assim dizê-lo, em uma geométrica terra de maravilhas, mas a beleza desse conto

de fadas está em que não sabemos se ele é verdadeiro. Abordamos, pois, nesta passagem, a questão concernente a indagar até que ponto devemos fazer recuar as fronteiras dessa terra de maravilhas; a indagar quão reduzida devemos imaginar a curvatura do espaço, quão amplo seu raio de curvatura.

Schwarzschild realizou medidas com base em várias estrelas, mas só pôde concluir que, se o espaço é curvo, o raio de curvatura deve ser muito amplo. (Um raio de curvatura infinito corresponde, por definição, ao espaço plano, isto é, euclidiano.) Houve, de algum modo, propriedade no fato de ter sido Schwarzschild quem, no ano de 1916 — ano de seu falecimento — encontrou a primeira solução exata para as equações de campo, propostas por Einstein e aplicável ao caso em que se admite como fonte gravitacional massa concentrada num ponto geométrico fixo. Isso proporciona boa aproximação no caso de muitos problemas de Física da gravitação e a “solução de Schwarzschild” continua a ser de fundamental importância nesse terreno da Física. Ela descreve o movimento planetário no sistema solar.

A esta altura, o leitor ter-se-á, talvez, habituado ao fato de que, em teoria da relatividade, modificações do espaço acompanham-se, usualmente, de modificações do tempo, isto é, de comportamento dos relógios. Não pode, portanto, surpreender que, na teoria da gravitação, de Einstein, o comportamento de um relógio se modifique, ao ser ele posto sob influência de um campo gravitacional. Isso é algo que não foi de modo algum antecipado pelos geômetras do século XIX, nem, tanto quanto me consta, por Schwarzschild. Colocando a questão de maneira singela, diremos que um relógio exposto a um campo gravitacional “atrasa-se”, quando comparado a um relógio idêntico, livre dos efeitos da gravidade; e quanto mais intensa a gravidade na região dada, mais se atrasará o relógio. Não tentaremos oferecer qualquer espécie de explicação acerca do por que isso ocorre, mas lembraremos o leitor de que, segundo a teoria especial da relatividade, um relógio que se encontre em movimento uniforme parecerá atrasar-se, quando contemplado por um observador em repouso. Não é, pois, implausível que um relógio que venha recebendo aceleração uniforme apresente característica similar. Além disso, de acordo com o princípio da equivalência, tal como formulado por Einstein, um sistema que venha sofrendo aceleração uniforme equivale, do ponto de vista da Física, a um sistema em repouso sob a ação de um campo gravitacional uniforme; e esse argumento torna plausível que, em campo gravitacional uniforme, um relógio marche mais lentamente. A teoria geral da relatividade dá mais um passo, para asseverar que um relógio sujeito a qualquer campo gravitacional, seja este uniforme ou não, parecerá “lento” quando comparado a um relógio não sujeito à gravitação.

Em seu trabalho de 1916, Einstein menciona dados astronômicos

que, a seu ver, confirmariam essa predição. Tinha ele era: mente o que hoje se conhece sob o nome de deslocamento espectral para o vermelho, de origem gravitacional. Os elétrons, quando saltam de uma para outra órbita, desprendem luz de frequências características, ou seja, cores características. Esses “espectros” são usados para identificar substâncias químicas e as linhas espectrais, em particular, vêm sendo empregadas, desde meados do século XIX, para identificar elementos existentes nas estrelas e, como é óbvio, no Sol. Essas vibrações atômicas são também uma espécie de relógio e, conforme a teoria geral da relatividade, devem ocorrer mais lenta—, mente quando os átomos se acham nos intensos campos gravitacionais existentes nas superfícies das estrelas. Consequentemente, a luz deve pender para o vermelho, pois a luz vermelha apresenta frequência menor do que, digamos, a luz azul. Einstein imaginou que, ao tempo da redação de seu trabalho, esse efeito talvez já houvesse sido observado. Sabemos hoje que distinguir esse efeito do complexo pano de fundo dos efeitos astronômicos que alteram as características espectrais da luz estelar é muito mais difícil do que a princípio se imaginou; só em recentes anos acreditaram os astrônomos haver realmente visto, nas estrelas, o deslocamento para o vermelho previsto por Einstein. Antes disso, alguns experimentos extremamente belos realizados, na Terra, por grupos independentes — na Universidade de Harvard (orientado pelo professor R. V. Pound) e em Harwell, na Inglaterra — mediram o efeito de Einstein, de maneira que não parece deixar qualquer dúvida a propósito do assunto.

No *Jefferson Laboratory*, em Harvard, há uma torre de 74 pés de altura — equivalendo isso a dizer que a base da torre está 74 pés mais próxima do centro da Terra do que seu topo, sendo, por tanto, o campo gravitacional ligeiramente mais intenso na base do que no topo. Essa diferença produz, nos termos da teoria de Einstein, um deslocamento extremamente reduzido da frequência da luz (uma parte em 10^{15}). Até uns poucos anos atrás, a verificação de uma tão reduzida alteração de frequência estaria para além das possibilidades da tecnologia experimental. Novos métodos de ótica quântica tornaram, entretanto, possível essa verificação e foram esses os métodos empregados por Pound e seus colaboradores e pelo grupo de Harwell. No interesse da precisão, devemos assinalar que o experimento de Pound e seus colaboradores identifica uma alteração da luz para o azul e não para o vermelho. E isso não é muito difícil de compreender: se imaginarmos a luz como constituída de quanta, estes, na medida em que “tombam” do topo da torre para sua base, ganham energia pois, como um projétil que fosse deixado cair sobre a Terra, passam a mover-se em uma região de maior energia gravitacional. Como esclareceremos no próximo capítulo, ganho de energia significa aumento de frequência da luz e, portanto, alteração para o azul, de vez que a luz azul tem maior frequência do que, digamos, a luz vermelha. Por outro lado, a luz, deixando o Sol e

caminhando para a Terra, perde energia, pois a Terra tem campo gravitacional menos intenso do que o do Sol e, em consequência, a luz altera-se para o vermelho. Um habitante do Sol, que realizasse experimentos com a luz provida da Terra, verificaria que essa luz se altera para o azul — tal como no caso do experimento de Pound — pois que essa luz está passando de um campo de gravitação fraco para outro mais forte. Através dos experimentos, Pound e colaboradores puderam confirmar a predição de Einstein com a precisão de cerca de um por cento.

Em seu trabalho de 1916, Einstein fez duas previsões — deflexão da luz sob influência do campo gravitacional do Sol e alteração da luz para o vermelho, ambas confirmadas — e fez também uma dedução. A dedução resolveu um problema de astronomia planetária que vinha perturbando os astrônomos desde, pelo menos, os meados do século XIX. Sabem os astrônomos, desde Newton, que o campo gravitacional do Sol não é a única instância que influi sobre os movimentos dos planetas. Por força da mútua gravitação, os planetas exercem influência recíproca sobre o movimento de cada qual. De início, pareceu que essas “perturbações” — embora pequenas — poderiam somar-se de maneira a tornar instável o sistema, podendo o sistema solar ou partes dele, ao fim, desagregar-se, passando os planetas a simplesmente vagar no espaço ou a irem, talvez, chocar-se contra o Sol. Contudo, ao fim do século XVIII, Laplace demonstrou que uma especial feição da lei de Newton impedia que isso acontecesse, embora as órbitas perturbadas não correspondessem a simples elipses fechadas. Em 1845, o astrônomo francês Leverrier, analisando a órbita de Mercúrio, o planeta mais próximo do Sol, mostrou que ela não se fechava. A cada giro em torno do Sol, o planeta passava a ocupar um diferente ponto do espaço, de sorte que essa órbita, longamente observada, não correspondia a uma elipse simples, mas a muitas elipses vizinhas que, se superpostas, assemelhar-se-iam às pétalas de uma flor. A maneira habitual de demonstrar a existênciadesses efeito consiste em tomar o ponto da órbita que mais se aproxima do Sol — o periélio — e verificar como esse ponto se altera à medida que os anos passam. Ocorre que o periélio se altera da diminuta, porém mensurável quantidade de quarenta e três segundos de arco por século — além e acima do que poderia ser explicado dentro dos quadros da gravitação newtoniana, já considerados os efeitos perturbadores dos planetas conhecidos. Por algum tempo, os astrônomos acreditaram que pudesse existir, nas proximidades do Sol, um planeta desconhecido (Leverrier deu-lhe o nome de Vulcano) responsável pelo efeito observado; todavia, ao início do século XX, esse planeta não havia sido descoberto e os astrônomos começaram a suspeitar que não fosse correta a lei da gravitação elaborada por Newton.

Notável traço da teoria de Einstein é que ela prevê exatamente esse avanço do periélio de Mercúrio. Prevê também a ocorrência de efeito similar nas órbitas de outros planetas, mas, como estes se encontram mais

afastados do Sol, esse efeito é muito menor. Uma observação adicional que, sem dúvida, teria agradado a Einstein é que, em 1968, o físico norte-americano I. I. Shapiro e seus colaboradores, valendo-se de técnicas de radar, puderam determinar a órbita do asteroide Ícaro e verificaram que ela apresentava um avanço de periélio conforme, em termos gerais, com a teoria. (Shapiro e seu grupo têm lançado sinais de radar contra planetas, como Mercúrio, quando esses planetas estão em linha, de sorte que os sinais tangenciam o Sol; e assim agem com o fito de submeter a teste a predição de Einstein, segundo a qual a radiação eletromagnética — luz, radar e assim por diante — é defletida pela gravitação do Sol. Também neste ponto, a teoria mostra concordância, em termos gerais, com o experimento.)

Um aspecto ainda mais significativo da geometria da gravitação sugerida pela teoria de Einstein é o novo prisma sob o qual permitiu fossem colocadas velhas questões de cosmologia.

A palavra “cosmologia” deriva dos vocábulos gregos kosmos — que significa “o mundo”, isto é, o universo — e logos — que significa “discurso”: é o “discurso” concernente à estrutura e evolução do universo como um todo. Sendo ousadas e, aparentemente, de dificuldade extrema as perguntas que a cosmologia se propõe responder e sendo escassos os dados experimentais, foi ela encarada, até recentemente, como a ovelha negra da família científica, algo que mais se aproximava da ficção científica do que da ciência. Atualmente, em grande parte devido às novas descobertas astronômicas, a cosmologia transformou-se em um dos mais excitantes e agitados ramos no todo da ciência. Essa transformação pode ser atribuída, pelo menos em parte substancial, aos desenvolvimentos de um trabalho publicado por Einstein em 1917 — “Considerações Cosmológicas a Propósito da Teoria Geral da Relatividade” — o qual, isso é curioso, aparece hoje como “superado, se não errôneo”. Leopold Infeld, que exprimiu esse juízo em 1947, acrescentou: “Creio que Einstein seria o primeiro a admiti-lo. E, não obstante, o aparecimento desse trabalho foi de grande importância na história da Física teórica. Em verdade, é mais um exemplo a mostrar que uma solução errada de um problema fundamental pode ser incomparavelmente mais frutífera do que uma solução correta de um problema trivial e desinteressante”.

Einstein inicia o trabalho fazendo uma “crítica” da cosmologia, a qual seria sugerida por uma direta aplicação da teoria da gravitação proposta por Newton. Colocamos entre aspas a palavra “crítica” porque, embora as observações de Einstein sejam logicamente coerentes, o quadro newtoniano, se corretamente entendido — em oposição à maneira como se colocou Newton — está mais próximo daquilo que nós e, posteriormente, o próprio Einstein consideramos a real situação. Newton fez tentativa de conceber um universo de estrelas onde estas, em média, se distribuísem uniformemente, estendendo-se o universo ao infinito. Admitia-se que

essas estrelas agissem umas sobre as outras, como consequência dos efeitos da mútua gravitação. Newton desejava esclarecer o que entendia por um universo estático, imutável, de extensão infinita. O que Einstein assinalou e já havia sido por outros apontado foi que, dada a lei de gravitação do próprio Newton, a situação figurada não poderia existir. Sabemos hoje — e esclareceremos adiante a maneira como foi adquirido esse conhecimento — que, em verdade, essa situação não existe e que o universo está atualmente em expansão. Se Newton se dispusesse a isso, poderia ter predito um universo que evolui no espaço, em vez de tentar, como o fez, explicar incorretamente um universo estático. Contudo, ainda em 1917, toda evidência astronômica existente sugeria um universo estático e, assim, Einstein foi levado a tentar acomodar esse quadro à sua teoria da gravitação. Logo se deu conta de que as mesmas objeções por ele opostas a Newton eram válidas quando levantadas contra sua própria teoria — e, por isso, modificou a teoria. Tal é o assunto do trabalho de 1917. Escreveu ele:

Conduzirei o leitor pela mesma estrada que percorri, estrada má e sinuosa, pois, de outra forma, não posso esperar que ele se interesse pelo resultado que surgir ao fim da jornada. A conclusão a que chegarei é que as equações de campo de gravitação, que até agora defendi, reclamam ligeira modificação, de sorte que, na base da teoria geral da relatividade, possam ser evitadas aquelas dificuldades que se põem como fundamentais... em confronto com a teoria newtoniana.

À sua equação gravitacional Einstein acrescentou um termo novo — denominado “termo cosmológico” — que se traduz em nova e reduzida constante (que se soma à constante gravitacional). Essa “constante cosmológica” não modifica as antigas predições da teoria no que diz respeito a fenômenos “locais”, fenômenos que envolvem o sistema solar. Pôde Einstein, com o auxílio do matemático J. Grommer, encontrar solução aparentemente estática para essas equações. (Algum tempo depois, Eddington demonstrou que essa solução não era realmente estática, no sentido de que se o universo recebesse, em qualquer ponto, qualquer ligeiro abalo, começaria a expandir-se ou a contrair-se.) Essa solução pinta o universo como uma espécie de esfera que paira no espaço provido, em média, de pequena densidade uniforme de matéria. De acordo com esse quadro, um raio de luz, partido de qualquer ponto do universo, retornará a esse ponto em aproximadamente dez bilhões de anos. Mais ou menos por essa época, o astrofísico holandês Willem de Sitter encontrou uma segunda solução para as equações atrás referidas, solução que levava a pensar em uma situação algo artificial, em que a densidade média da matéria igualaria zero, mas que apresentava a interessante propriedade de figurar um universo em expansão. Foi essa a primeira sugestão teórica a respeito de um universo em expansão.

O próximo passo de importância foi dado em 1922, quando o cientista russo A. Friedmann (que trabalhava em vários campos) desprezou o termo cosmológico, voltando às equações originais de Einstein, verificando que elas tinham solução para um universo em expansão, com densidade de matéria diferente de zero. Einstein não aceitou esse resultado e chegou mesmo a tentar refutá-lo em escrito que veio a ser impresso. Logo, porém, convenceu-se da correção do trabalho de Friedmann e, à semelhança de muitos outros cosmologistas, abandonou o termo cosmológico, vendo-o como complicação supérflua e desnecessária. O moderno pensamento cosmológico recorre, em maioria, às soluções de Friedmann (há mais de uma). À altura de 1929, devido principalmente aos trabalhos do astrônomo norte-americano E. P. Hubble, havia-se tornado claro que o universo se encontra em expansão. Trata-se de fato de significação tal que merece comentário.

Até o começo do século XX, não havia evidência segura de que quaisquer objetos astronômicos observados (nebulosas, por exemplo) se situassem para além da Via-láctea. (Falando em “nebulosas”, pretendemos significar coleções de estrelas agrupadas, que parecem nuvens luminosas até que poderosos telescópios possam identificar estrelas singulares. No espaço interestelar há também nuvens gasosas que os astrônomos adequadamente denominam nebulosas. Nossas “nebulosas” são, em verdade, “galáxias”.) Contudo, graças aos estudos que, em Harvard, realizou Henrietta Leavitt e, posteriormente, H. Shapley, evidenciou-se que havia objetos astronômicos para além da Via-láctea. (Determinar as distâncias astronômicas a que se acham objetos remotos é tarefa espinhosa e ocupação com o assunto nos afastaria do tema. Basta dizer que, em 1952, o astrônomo W. Baade reexaminou os métodos de Shapley e descobriu, para surpresa geral, que todas as distâncias indicadas eram, pelo menos, duas vezes superiores ao que imaginara o mesmo Shapley.) Contribuição importante imediatamente seguinte foi dada por V. M. Slipher e teve início em 1912, no Observatório Lowell; Slipher observou que as galáxias distantes apresentavam “deslocamento para o vermelho” de sua luz. Quer isso dizer que as linhas espectrais da luz estelar dessas galáxias, quando comparadas com as de estrelas mais próximas, deslocam-se para a faixa do vermelho. Em 1929, Hubble já havia demonstrado que essa tendência para o vermelho obedecia a uma lei muito simples. Quanto mais afastada a galáxia, maior a alteração para o vermelho que, em verdade, é simplesmente proporcional à distância. Sabíamos que a luz emitida por um objeto que se afasta mostra o efeito Doppler, que também consiste num deslocamento espectral para o vermelho, assim como o silvo emitido por um trem que se move tem sua frequência alterada. Era e é, pois, natural admitir que os distantes objetos astronômicos se estão afastando de nós, de maneira tal que, quanto mais distante se encontram, mais rapidamente se afastam. Foram observados objetos astronômicos que apresentam deslo-

camentos espectrais para o vermelho de mais de metade do comprimento normal de onda.

Em 1927, o abade belga Georges Lemaitre sugeriu a idéia de que a expansão tenha começado a partir de uma gigantesca explosão cósmica — o “grande bang”, na expressão do falecido George Gamow — ocorrida há cerca de dez bilhões de anos, quando a matéria constitutiva do universo viu-se levada a um estado de densidade extremamente alta. Gamow, seus colaboradores e continuadores vêm trabalhando nos últimos trinta anos, com êxito considerável, para tentar explicar a distribuição de matéria e a radiação verificada no universo; e trabalham com base na Física nuclear dessa explosão. (Talvez seja interessante referir que a Física nuclear foi um dos poucos ramos da Física moderna para cujo desenvolvimento Einstein deixou de contribuir — sem dúvida porque, na década de 1930, quando se iniciou a Física nuclear, no sentido atual, ele estava inteiramente voltado para suas preocupações com as teorias de campo unificado.) Aparentemente, os quasars — fontes de rádio quase-estelares — que se acham distribuídos não uniformemente no exterior de nossa galáxia, serão, se as atuais idéias se confirmarem, remanescentes daquela primitiva explosão, estando nesse mesmo caso a recentemente descoberta radiação cósmica do “corpo negro”, a qual parece encher o universo e talvez corresponda a um efeito secundário da explosão original. Não é ainda conhecida a geometria total do universo, mas há razão para acreditar que ela seja uma geometria de Friedmann, com curvatura positiva como a de uma esfera e tendo a propriedade de que a luz emitida de um ponto qualquer retornará, afinal, ao mesmo ponto. Isso é o que se pretende dizer com a afirmação de ser o universo “fechado”. Desnecessário é assinalar que estas observações gerais não fazem nem mesmo parcial justiça à moderna cosmologia, mas talvez bastem para indicar a riqueza de idéias que se contém na teoria geral da relatividade.

3. A teoria quântica

xii. Preâmbulo: Einstein e Newton

Os historiadores da ciência referem-se, freqüentemente, ao ano de 1666 como *annus mirabilis* da ciência clássica. Foi nesse ano que Isaac Newton, retirado à proteção da casa de sua mãe, em Lincolnshire, devido à Grande Peste de 1665, que havia determinado o fechamento da Universidade de Cambridge, formulou — pelo menos de si para consigo (pois boa parte permaneceu inédita durante décadas) — a maior parte dos conceitos básicos que vieram a transformar a Física em ciência quantitativa precisa. Tinha ele, a essa altura, vinte e quatro anos e, como recordou mais tarde, “... naqueles dias... na pujança de minha capacidade inventiva, voltado para a matemática e para a filosofia (ciência natural) mais do que em qualquer ocasião posterior”.²⁹ Ao longo de um período de dezoito meses, Newton elaborou suas leis mecânicas fundamentais e o cálculo — diferencial e integral — para dessas leis retirar as conseqüências; concebeu a lei da gravitação universal; e chegou às descobertas no campo da ótica, dentre as quais a mais célebre é que a “luz branca” do Sol quebra-se, pelo prisma, em um espectro de luzes coloridas, sofrendo cada cor deflexão em ângulo diferente e característico.

Como físico, Newton tinha todas as qualidades. Era um experimenter cuidadoso e cheio de imaginação, era um gênio matemático de primeira grandeza e possuía a capacidade de concentrar seus dotes em um problema único, dia após dia, ano após ano, se necessário, até descobrir e formular a solução, com ampla generalidade e lúcida elegância. Em 1931, Einstein, escrevendo o prefácio para uma nova edição da ótica de Newton, comentou:

Afortunado Newton, feliz infância da ciência! Quem tiver tempo e tranqüilidade poderá, lendo este livro, reviver as maravilhosas experiências que o grande Newton viveu em seus dias jovens. A natureza era, para ele, um livro aberto, cujos caracteres decifrava sem esforço. As concepções a que recorria para emprestar ordem ao material da experiência pareciam fluir espontaneamente dessa mesma experiência, dos belos experimentos que ele ordenava como brinquedos e descrevia com

²⁹ Citado por Frank E. Manuel, *A portrait of Isaac Newton* (Cambridge, Massachussets, 1968), 80. Nem todos os estudiosos aceitam o brilhante retrato pintado pelo professor Manuel, mas eu o tenho por convincente.

apaixonada riqueza de pormenores. Em uma pessoa, ele combinava o experimentador, o teórico, o mecânico e, o que não é menos, o artístico expositor.

Seria agradável dizer que Newton, como ser humano, se colocava, de alguma forma, à altura da impressionante grandeza de suas criações científicas. Infelizmente, entretanto, não foi esse o caso. Em verdade, Newton — puritano fanático, que parece ter morrido sem conhecer mulher e, provavelmente, abafou tendências homossexuais — podia mostrar-se perverso e mesquinho, dado a violentos acessos de ira (que ele pôde satisfazer largamente, durante o exercício das funções de Guarda da Casa da Moeda, quando dispunha do poder de vida e morte sobre os “falsários e traficantes” que lhe cabia julgar — o crime de moeda falsa era, então, punido com a pena capital, na Inglaterra). Provavelmente, dedicou tanto tempo — talvez mais — à alquimia e à cronologia bíblica quanto à Física. E parece não ter tido escrúpulos para concretizar suas ambições pessoais, freqüentemente mais ligadas a uma posição na sociedade do que a qualquer outra coisa. Parte do milagre newtoniano está em que, a despeito desses desvios psicológicos — e talvez por causa deles — tenha conseguido esse homem canalizar suas energias intelectuais e psíquicas com tal intensidade, e mesmo ferocidade, para chegar a descobertas científicas.

Pasmamos ante o gênio e mais nos maravilhamos porque suas obras foram realizadas apesar de condições desfavoráveis, que teriam esmagado homens de estatura menor. Quando se reconhece a grandeza das forças que poderiam ter provocado a destruição, espantam os atos em que se traduz vontade pura e desejo de superação. Houve, sem dúvida, outras pessoas com a configuração psíquica semelhante à de Newton, das quais nunca se ouviu falar.

Estamos ainda demasiado próximos dos acontecimentos para que possamos confiar em nossos juízos acerca de Einstein como confiamos nos formulados a propósito de Newton, mas quase todos os físicos de hoje concordariam em que o ano de 1905 pode ser considerado o *annus mirabilis* da Física moderna. Cada qual dos quatro trabalhos de Einstein, publicados em 1905, nos *Annalen der Physik*, provocou, sob aspectos diferentes, alteração de nossas concepções a respeito do universo físico. Dois desses trabalhos, os concernentes à teoria especial da relatividade, compõem um todo, em termos de estilo e assunto; o terceiro se ocupa do movimento browniano — o incessante movimento das partículas microscópicas em suspensão nos líquidos; e o último (em verdade, o primeiro a ser publicado) corresponde à criação da Física quântica. Em 1949, Max Born expressou, com eloquência e autoridade, o que todos os físicos tinham vindo a pensar acerca desse trabalho:

Um dos mais notáveis volumes de toda a literatura científica é o volume 17 (4ª. série) dos *Annalen der Physik*, 1905. Contém três trabalhos de Einstein, cada qual deles hoje reconhecido como obra-prima, fonte de um novo ramo da Física. Os três assuntos, por ordem de aparecimento, são: teoria dos fótons, movimento browniano e relatividade...

A relatividade é o último assunto e isso mostra que o espírito de Einstein não estava, por aquele tempo, inteiramente absorvido pelas idéias de espaço, tempo, simultaneidade e eletrodinâmica. A meu ver, ele seria um dos maiores físicos de todos os tempos, ainda que não houvesse escrito uma linha sequer a respeito de relatividade — suposição pela qual me desculpo, absurda que é. Com efeito, a concepção de Einstein a respeito do mundo físico não pode ser dividida em compartimentos estanques e é impossível imaginar que ele houvesse ignorado qualquer dos problemas fundamentais daquela época.

Até agora, pessoa alguma, de real competência, tentou traçar algo que se assemelhasse a um completo retrato psicológico ou psicanalítico de Einstein e só nos últimos anos começaram os estudiosos a analisar a enorme coleção de documentos — cartas, manuscritos inéditos, etc. — que têm à disposição.³⁰ Sejam quais forem as revelações proporcionadas por esses documentos, já é certo que neles nada há que encerre o alarmante caráter dos “Portsmouth Papers” — conteúdo da célebre arca de documentos secretos que Newton reuniu em 1696, quando deixou Cambridge, dirigindo-se a Londres. A arca veio, finalmente, a cair em mãos de John Maynard Keynes — quase um milhão de palavras manuscritas, versando questões de alquimia, história eclesiástica (Newton era, em segredo, um unitarista, ao tempo em que se encarava isso como heresia grave) e apocalíptica bíblica; aos olhos de Newton, tudo surgia como evidência científica, a ser vista nos mesmos termos em que as revelações do prisma. Keynes foi, aparentemente, o primeiro estudioso moderno a, de alguma forma, ver Newton como este realmente era:

No século XVIII e até hoje, Newton veio a ser considerado o primeiro e o maior dos cientistas da Idade Moderna, um

³⁰ Além de centenas de cartas não publicadas, há “onze cadernos de notas, que começam nos dias de estudante de Einstein; alguns diários de viagens; pastas e pastas de manuscritos publicados. Tudo se conservou mais ou menos por acaso; voltando dos Estados Unidos da América no inverno 1932-1933, Einstein, ao chegar à Europa, soube que os partidários de Hitler se haviam apossado da Alemanha. Einstein jamais voltou a pisar em solo alemão e a maior parte da correspondência foi retirada através de intervenção diplomática da Embaixada Francesa”. Gerald Holton, “Influences on Einstein’s Early Work in Relativity Theory”, 62-63.

racionalista, pessoa que nos ensinou a pensar segundo as pautas da razão fria e direta. Não o vejo a essa luz. Não creio que a essa luz possa vê-lo quem haja examinado atentamente o conteúdo da arca por ele arrumada em 1696, quando deixou definitivamente Cambridge e que, embora parcialmente disperso, chegou até nós. Newton não foi o primeiro representante da idade da razão. Foi o último dos mágicos, o último dos babilônios e sumerianos, o último grande espírito a contemplar o mundo visível e intelectual com os mesmos olhos dos que iniciaram a construção de nossa herança mental, cerca de 10.000 anos atrás. Isaac Newton, criança sem pai, nascida no Natal de 1642, foi o último ser a quem os magos poderiam prestar sincera e adequada homenagem.

Embora Einstein seja o único cientista moderno que, do ponto de vista das realizações, cabe comparar a Newton, é difícil apontar muitos traços que eles hajam tido em comum, como homens. Todos os que mantiveram contatos diretos com Einstein deram-se conta da nobreza que dele emanava. Referência habitual é a referência à sua “humanidade” — ou, por banal que soe, aos traços simples e agradáveis de seu caráter. Nenhum ponto de sua vida profissional é marcado pelo amargo espírito de competição, pela pretensão de reclamar invenções científicas, que anuvia e, por vezes, destrói a vida do cientista. Claro está ser possível dizer que suas realizações científicas tiravam a necessidade de ele assim proceder e pode-se acrescentar haver Einstein, diversamente de Newton, vivido em um tempo que fazia da Física uma atividade profissional reconhecida e dotada de um implícito código “cavalheiresco” de ética. (A julgar pelas cartas que deixaram, os cientistas contemporâneos de Newton foram pessoas quase tão desagradáveis quanto ele.) Isso, entretanto, foge ao ponto que nos interessa. Newton também não tinha “necessidade” de recorrer àqueles procedimentos — no sentido de que sua reputação científica jamais correu perigo. Ao fim do século XVII, muito antes de sua morte, reconhecia-se universalmente que ele estava entre os maiores cientistas que o mundo já conhecera. E, não obstante, ele se punha em conflito — o mais selvagem tipo de guerra pessoal — com todos os contemporâneos que, dele se aproximando intelectualmente, insistiam em ser tratados como tais. Newton teve ou adeptos bajuladores, que o tratavam como uma primadona, ou rivais violentos; não teve colaboradores. Entre Einstein e os cientistas seus contemporâneos houve sérias divergências científicas — especialmente quando, ao final da vida, ele rejeitou a teoria quântica — mas o tratamento sempre se fez com respeito mútuo e, da parte de Einstein, era real o prazer de conhecer novas conquistas ou novas idéias. É característico haver sido Einstein o primeiro a reconhecer o valor das idéias acerca da natureza ondulatória da matéria, propostas — sem o apoio de qual-

quer evidência experimental direta — em uma tese de doutoramento apresentada, em 1924, pelo então desconhecido físico francês Louis de Broglie. Posteriormente, Einstein repeliu a interpretação habitual, dada às “ondas de de Broglie”, mas, como o próprio de Broglie escreveu: “O mundo científico pendia, então, de cada palavra de Einstein, que estava no cume da fama. Acentuando a importância da mecânica ondulatória, o ilustre cientista fez muito para apressar-lhe o desenvolvimento. Sem o trabalho por ele escrito, é possível que só com grande atraso viesse minha tese a ser apreciada”.³¹

Dentre as coisas que, além do gênio — signifique isso o que significar — Einstein e Newton parecem ter tido em comum, é a quase incrível capacidade de concentração total em um problema científico. Essa é uma capacidade muito diferente da capacidade de “trabalhar arduamente”, que ambos também tinham. Trabalho intenso, no sentido convencional e quando se trata de um físico teórico, equivale a execução de tarefas e, por vezes, entediante cálculos. Isso, a meu ver, requer menos concentração do que a necessária para dominar intelectualmente um problema e dar-lhe forma que admita computação. Gostam os físicos teóricos de dizer que é muito mais difícil apresentar corretamente uma pergunta do que tentar respondê-la. As descobertas realmente importantes no campo da Física teórica não se originaram de problemas bem colocados. A boa colocação de um problema implica existência de uma teoria capaz de fornecer a linguagem em que vazar as questões. Os manuais de Física estão repletos de problemas bem colocados, cuja solução requer empenho, mas que não são verdadeiramente “profundos”. Exigem, talvez, inusitada justaposição de fórmulas e idéias contidas no livro. A natureza, entretanto, não é um manual e, embora seja possível identificar os antecedentes de uma descoberta como a da lei da gravitação, de Newton, ou como a da teoria especial da relatividade, há saltos mentais presentes na realização da descoberta que a levam para além desses antecedentes — por vezes, de maneira inédita e totalmente impossível de antecipar. No ensaio que escreveu sobre Newton, Lorde Keynes descreve-lhe os poderes de concentração em termos que se aplicam, literalmente, a Einstein:

Creio que poderemos encontrar explicação para sua capacidade intelectual, se lembrarmos seus poderes incomuns de contínua introspecção concentrada. Seria possível encará-lo, e é possível também encarar Descartes, como um experimentalista consumado. Nada mais fascinante que as referências a suas

³¹ Citado por Martin J. Klein, “Einstein and the Wave-Particle Duality”, em *The Natural Philosopher*, 3, 38. O professor Klein, da Universidade de Yale, fez amplo estudo acerca das contribuições dadas por Einstein à teoria quântica e de sua atitude frente à mesma teoria.

criações mecânicas de menino. Há seus telescópios e seus experimentos óticos. Eram realizações notáveis, produtos de um dos aspectos de uma capacidade técnica que se abria em todas as direções, mas não eram, estou certo, expressão de seu dote peculiar, especialmente em comparação com seus contemporâneos. Esse dote peculiar era o poder de manter continuamente preso entre as asas do espírito um problema puramente intelectual, até que ele se tornasse transparente à sua visão mental. Imagino que sua preeminência se devia ao fato de ser dotado dos mais fortes e resistentes músculos de intuição que um homem jamais possuiu. Todos os que se entregaram ao pensamento científico ou filosófico puro sabem como ocorre que, neste momento, o espírito pareça apreender o contorno de um problema e penetrá-lo com seus poderes de concentração, para, no momento seguinte, vê-lo dissolver-se e escapar, deixando-nos como que a apalpar o vazio. Julgo que Newton podia concentrar o pensamento em um problema por horas e dias e semanas, até que a questão lhe fizesse entrega de todos os seus segredos. Então, sendo um matemático genial, podia, para efeito de exposição, apresentar o problema a seu gosto; acima de tudo, era extraordinária sua intuição — “tão feliz em suas conjecturas”, disse de Morgan, “que parecia saber mais do que poderia vir a provar”. As provas, com o valor que se deve reconhecer-lhes, eram preparadas posteriormente — não eram o instrumento da descoberta.

Como Newton, Einstein podia concentrar-se e se concentrava em um único problema por anos.³² A teoria especial da relatividade requereu, segundo todas as referências, quase uma década de trabalho preparatório, embora — como o próprio Einstein depois lembrou — a formulação final e a redação do manuscrito tenham exigido apenas cinco ou seis semanas. A teoria geral da relatividade e da gravitação requereu cerca de sete anos para completar-se, devido a todos os falsos pontos de partida. Einstein trabalhou constantemente na teoria do campo unificado — tentativa de conjugar gravitação e eletromagnetismo — a despeito da oposição crítica da maioria de seus contemporâneos, tão convencidos de que ele seguia trilha errada quanto ele esteve convencido, por mais de trinta anos, de que seguia trilha certa. A obra inicial de Einstein — anterior a seus traba-

³² Einstein disse a um assistente, certa vez: “Deus é inexorável na maneira como distribui seus dons. Concedeu-me a teimosia da mula e, em verdade, nada mais. Deu-me também um faro apurado.” Citado por Klein, “Einstein and the Wave-Particle Duality”, 46.

lhós acerca da teoria geral da relatividade — tinha exatamente esse incrível sentido de “intuição” que Keynes viu em Newton. Quanto à apresentação, a principal diferença é que Newton, especialmente nos *Principia*, adota o rigoroso estilo formal e impessoal de um texto de geometria; lendo os primeiros escritos de Einstein, tem-se — talvez erroneamente — a sensação de estar-lhe acompanhando de perto os processos de pensamento. Esses escritos de Einstein apresentam muitas frases tais como: “Em memória publicada há quatro anos, tentei dar resposta ao problema consistente em saber se a propagação da luz é influenciada pela gravitação. Volto a esse tema porque a apresentação anterior não me satisfaz...” “Experimentamos a contínua sensação de que esses trabalhos foram escritos por um ser humano e que estamos testemunhando sua “luta pessoal” com os enigmas e mistérios do universo natural.

E é de assinalar a feição surpreendentemente não-matemática desses trabalhos. As equações são relativamente poucas — freqüentemente, não chegam a receber número de seqüência. (Nenhuma equação do trabalho de 1905 aparece numerada, em contraste com o trabalho de 1916, onde aparecem setenta e cinco equações numeradas.) Esses trabalhos estão repletos de idéias expressas verbalmente, em termos de experiências hipotéticas simples, permitindo que se visualize a questão, antes e concomitantemente com a expressão matemática. Einstein não era, aparentemente, um calculista particularmente bem dotado e não foram longos cálculos que o levaram aos resultados atingidos. (Repetidamente, dizia ele ter memória má, e memória excepcional é acompanhante freqüente de uma capacidade excepcional de calcular.) Chegou aos resultados atingidos graças a um instinto intuitivo fora do comum acerca de como os resultados deveriam ser. Dada nossa ignorância quanto à maneira de o cérebro humano operar, é difícil conceber que alguém pretenda explicar a criatividade de um cientista como Einstein. O próprio Einstein, entretanto, buscou, por várias vezes, pelo menos descrever o que lhe parecia ser característico em relação a seus processos mentais e dá realce ao papel dos quadros — imagens mentais — em relação às palavras:

Que é, precisamente, “pensar”? Quando recebidas impressões sensoriais, quadros de memória emergem, isto ainda não é “pensar”. E quando esses quadros se acomodam em séries, cada um dos elementos reclamando o outro, isso também ainda não é “pensar”. Quando, porém, um quadro se apresenta em muitas dessas séries, então — precisamente por força dessa manifestação repetida — torna-se ele um elemento de ordenação das mesmas séries, no sentido de que une séries que, por si, não mantêm ligação. Esse elemento se transforma em instrumento, em conceito. Entendo que a passagem da livre associação, ou do “sonhar”, para o pensar se caracteriza pelo papel

mais ou menos dominante que desempenha o “conceito”. Não é de maneira alguma necessário que o conceito apareça preso a um signo sensorialmente cognoscível e possível de reprodução (palavra) ; todavia, quando isso ocorre, o pensamento se torna, por esse meio, comunicável.

Com que direito — perguntará o leitor — em tão problemático terreno, esse homem trata dessa maneira descuidosa e primitiva as idéias, sem fazer sequer o mínimo esforço para evidenciar alguma coisa? Minha defesa: todo nosso pensamento tem a natureza de livre jogo com os conceitos; justificação desse jogo está na medida em que, ajudados por ele, possamos alcançar perspectiva que se alteie sobre a experiência. O conceito de “verdade” não pode ser aplicado a essa estrutura; a meu ver, esse conceito só pode colocar-se em pauta quando já se encontra a nosso dispor uma concordância ampla (convenção) concernente aos elementos e regras do jogo... De minha parte, não duvido de que o pensamento opere, em grande parte, sem recurso a signos (palavras) e seja, em grau considerável, inconsciente. De outra forma, como se explicaria que, por vezes, “conjecturamos” espontaneamente a propósito de alguma experiência? Esse “conjecturar” ocorre, ao que parece, quando uma experiência entra em conflito com um mundo de conceitos que em nós já se acha sedimentado. Sempre que esse conflito é sentido penoso e intensamente, ocorre uma reação que atinge nosso mundo mental de maneira decisiva. O desenvolvimento desse mundo mental é, em certo sentido, um contínuo vôo de imaginação brotado do “conjecturar”.

Todos os que já enfrentaram um problema científico têm experiência desses “vôos de imaginação”. Se a disciplina científica se encontra em estágio de desenvolvimento em que novos e importantes horizontes se abriram — falemos, por exemplo, da Física atômica nos anos 30, após o aparecimento da moderna teoria quântica — Põe-se em pauta a redução dos fenômenos ao molde teórico recentemente criado: a forma de solução dos problemas não se afasta muito da que é própria de um exercício escolar. A criação de uma teoria parece, contudo, requerer uma espécie de redução inteiramente diversa. Neste caso, o criador tem de adaptar os fenômenos a um padrão que só ele é capaz de discernir. Esse padrão brota como que de um sentido “intuitivo” — de uma “visão” — de como deveria ser o mundo. Por diferentes que aparentemente fossem como homens, Newton e Einstein partilhavam do sentimento de serem procedentes suas intuições. Como disse Einstein, certa vez: “Para quem é um descobridor nesse campo, os produtos da própria imaginação parecem tão necessários

e naturais que ele os encara e gostaria de vê-los encarados pelos outros não como criações de pensamentos, mas como realidades dadas”. Depois de terem chegado a certo ponto no processo criador, Newton e Einstein “sabiam” que deveriam estar certos e, pelo menos no caso de Einstein, cabia esperar paciente e confiantemente por experimentos que lhe confirmassem as previsões. Não sei de caso algum em que as intuições de Newton no campo da Física se vissem seriamente contrariadas por desenvolvimentos experimentais realizados durante sua vida. E o mesmo é verdadeiro no que diz respeito à maior parte do trabalho criador de Einstein. E, não obstante, a reação de Einstein à teoria quântica marca violenta oposição entre seu senso de adequação das coisas e o que as descobertas experimentais pareciam estar revelando. Como veremos, essa reação correspondeu a um mergulho mais e mais profundo na solidão de suas próprias intuições.

xiii. O movimento Browniano

Nenhum físico esteve mais ligado à criação da teoria quântica do que Einstein. Os trabalhos que realizou nesse campo teriam correspondido, para qualquer outro físico, a uma completa carreira científica. Todavia, quando, depois de quase trinta anos de esforços, os físicos conseguiram transformar o que parecia um caos intelectual em estrutura científica lógica — estrutura que muitos consideram representar o triunfo supremo do pensamento científico do século XX — Einstein voltou-lhe as costas. Assim, em correspondência, como em artigos, explicou longamente as razões por que rejeitava a teoria, a despeito de que essa teoria, na expressão de Dirac “explica toda a Química (poderíamos, agora, sentir-nos tentados a dizer toda a Biologia) e boa porção da Física”. Lendo as explicações de Einstein, dois pontos nos surpreendem inevitavelmente. Em primeiro lugar, sua incrível teimosia. Ele não se deixaria convencer. Por mais de trinta anos, ouviu argumentos contrários à posição que adotara — ouviu, assimilou, refutou e permaneceu impassível. O segundo ponto que surpreende é a razão última por ele oferecida para repelir a teoria: o que ele repete e repete é tratar-se de uma teoria “incompleta”. Não podia ele aceitar, no plano da teoria física fundamental, uma descrição que abandonava acontecimentos causais “visualizáveis” em favor de probabilidades. De certa forma, permaneceu ele preso, durante toda a vida, à sensibilidade visual e geométrica, que estava entre suas mais claras recordações de infância. Esses temas nos ocuparão mais adiante. Por agora, devemos traçar as linhas que a eles conduzem e isso nos levará de volta a 1905 e às duas outras obras-primas que, naquele ano, Einstein fez publicar nos *Annalen der Physik*.

Dos grandes trabalhos publicados por Einstein em 1905, o de mais fácil compreensão, pelo menos do ponto de vista do significado de seu

conteúdo, é o que se refere ao chamado movimento browniano. Os experimentos sugeridos por esse trabalho foram o que convenceu os céticos — e estes eram muitos, ainda em 1905 — da existência dos átomos. As técnicas estatísticas desenvolvidas por Einstein para fazer face aos problemas postos pelos átomos foram também por ele empregados, mais ou menos por essa época, para estudar os aspectos quânticos da radiação. Em consequência, os trabalhos de 1905, concernentes à teoria quântica e ao movimento browniano, correspondem, em verdade, à aplicação de uma idéia única: descrição matemática de sistemas em que estão presentes números enormes de unidades básicas — átomos ou quanta de luz — por meio da estatística. Como estamos hoje convencidos de que os átomos existem, o movimento browniano é o ponto de partida mais simples, para início de discussão em torno desse ângulo da obra de Einstein.

Robert Brown foi um botânico escocês que, no ano de 1827, realizou os experimentos que hoje têm seu nome. A observação básica foi de extrema simplicidade. Brown examinou, através de um microscópio comum, o comportamento de grãos de pólen — partículas providas de várias plantas e que, no experimento original mediam aproximadamente 1/5.000 de polegada — quando imersos em água. Descobriu ele que essas partículas fazem movimento constante, agitado e aparentemente errático, que nada tem a ver com quaisquer correntes que na água se manifestem. Em palavras de Brown: “Esses movimentos eram tais que bastaram para convencer-me, depois de observações repetidas com frequência, de que não brotavam de correntes existentes no fluido, nem de sua gradual evaporação, mas nasciam da própria partícula”.

E Brown formulou a presunção natural, embora errônea, de que essas partículas microscópicas representavam alguma espécie de novo estado da matéria, a que chamou “molécula ativa”. (A princípio, julgou Brown que elas poderiam ser vivas, mas pôde repetir a experiência com partículas de pólen seco, armazenadas no herbário “por mais de vinte anos”.) Logo estendeu suas investigações a substâncias não-vegetais — partículas microscópicas de manganês, níquel, grafite, antimônio, bismuto, arsênico e outras. E, como registrou, “moléculas ativas foram encontradas em abundância”. Em outras palavras, quaisquer partículas microscópicas em suspensão na água — ou qualquer líquido — executam movimento constante, aleatório, agitado, a que hoje denominamos “movimento browniano”. Embora o fenômeno haja sido muitas vezes estudado no século XIX (em 1865, um grupo de investigadores mostrou que o movimento continuava sempre o mesmo por todo o ano durante o qual eles realizaram o experimento, mantendo o líquido em um recipiente hermeticamente fechado), só meio século depois de Brown haver feito a descoberta é que vários cientistas adiantaram a sugestão qualitativamente correta quanto ao que o movimento browniano representava. Notaram eles que, se o líquido fosse composto de moléculas (não as “moléculas ativas” de Brown, mas molécu-

las no sentido do químico moderno: menor unidade da matéria que compõe o líquido e que tem a característica de exibir-lhe as propriedades químicas) e se essas moléculas se achassem em estado de constante agitação, então, as partículas em suspensão refletiriam essa agitação, pois estariam sendo continuamente bombardeadas, de todos os lados e em todas as direções, pelas moléculas do líquido.

Para nós, habituados que estamos à teoria atômica da matéria, essa explicação poderá parecer quase auto-evidente. Entretanto, embora a hipótese atômica houvesse conseguido grande aceitação por parte de físicos e químicos, ao final do século XIX, continuava a sei apenas isso — uma hipótese, cuja validade universal não era clara, nem inteiramente reconhecida. Além disso, sua conexão com o momento browniano era vaga e os experimentos não concludentes. Ao começo de seu trabalho de 1905, Einstein escreveu:

No trabalho presente, será demonstrado que, segundo a teoria cinético-molecular do calor, corpos de proporções microscópicas, em suspensão nos líquidos, realizam movimentos de magnitude tal que os torna suscetíveis de observação através de microscópio — e isso devido aos movimentos moleculares provocados pelo calor. É possível que os movimentos aqui estudados sejam idênticos aos chamados “movimentos moleculares brownianos”; a informação de que, a propósito destes disponho é, porém, tão falha de precisão que não posso formar juízo sobre o assunto.

A história dos átomos se inicia, como é sabido, com o repetido enunciado que Demócrito formulou no século IV a. C.: “Só existem os átomos e o vazio; tudo o mais é simples opinião”. Claro está que, tomado demasiadamente ao pé da letra, esse enunciado é absurdo. Contudo, sua significação — e esta é a grande contribuição dos atomistas gregos — está na idéia de que, por trás da aparência perturbadoramente complexa das formas da matéria, há uma estrutura subjacente de “átomos” — partículas indivisíveis — que, observando leis simples, nos capacitam a explicar e correlacionar as experiências de nossos sentidos. A natureza conceitual dos átomos alterou-se ao longo dos últimos dois mil anos — fizemo-nos mais sofisticados e são mais sutis os fenômenos a explicar — mas continuamos adeptos da concepção atomista. Sua manifestação última aponta para as chamadas partículas elementares, a partir das quais a matéria se compõe. Os físicos estudiosos da alta energia identificaram, porém, tantas “partículas elementares” que se começou a buscar um substrato de partículas superelementares, que serviriam de base, inclusive, para a formação das antigas partículas elementares, como o nêutron, o próton e os vários mésons. Como a evidência que existe em favor dessas partículas supere-

lementares é, até agora, inteiramente indireta — permitem simplificação da descrição teórica (evidência “direta” seria a produção real dessas partículas em aceleradores de alta energia) — os físicos modernos encontram-se, ironicamente, na posição dos físicos e químicos do século XIX, que estavam inseguros acerca da “existência” dos átomos.

Newton foi, aparentemente, um atomista. Registrou ele, em sua ótica:

Parece-me provável que Deus, ao Começo, tenha criado a Matéria sob a forma de Partículas sólidas, compactas, impenetráveis, móveis, com Tamanhos e Figuras, com outras Propriedades e em tal Proporção para com o Espaço que mais facilitasse a consecução do fim para o qual as havia criado; essas Partículas primitivas, sendo Sólidas, são incomparavelmente mais consistentes que quaisquer dos Corpos porosos que delas se constituem; consistentes a ponto de jamais se desgastarem ou romperem; e nenhum Poder comum tem capacidade de dividir o que, na primeira Criação, o próprio Deus fez um.

Em verdade, até o início do século XVIII, o fundamento que se podia oferecer para a hipótese atomista tinha essa espécie de origem teológica e metafísica. Em essência, dessa hipótese nada derivava que pudesse ser quantitativamente apreciado. Todavia, em 1738, Daniel Bernouilli, membro de uma notável família de matemáticos suíços, publicou um livro intitulado Hidrodinâmica, no qual se continha o primeiro exemplo do que hoje chamaríamos abordagem mecânico-estatística da Física dos gases e no qual se utilizava quantitativamente a hipótese atomista. Bernouilli deu uma demonstração do que é denominado lei de Boyle, para os gases. Robert Boyle, contemporâneo de Newton, havia observado que um gás, mantido a temperatura constante, exerce, sobre as paredes do recipiente que o contém, pressão que aumenta na proporção da contração do volume. (Se comprimirmos um balão cheio de ar, este virá a estourar, pois a pressão aumenta com a redução do volume do balão.) Bernouilli explicou o fenômeno admitindo que o gás é constituído de pequenos “corpúsculos que são impelidos para aqui e para ali, em movimentos muito rápidos...” Segundo essa maneira de ver, a pressão é causada pela colisão das moléculas do gás contra as paredes do recipiente e Bernouilli, analisando a forma como essas colisões aumentam em frequência à medida em que se reduz o volume do recipiente, deduziu a lei de Boyle.

Nenhum outro progresso se registrou no campo da teoria cinética dos gases até meados do século seguinte e, no entretanto, a teoria atomista se transformou em domínio reservado aos químicos. A partir de Boyle, haviam os químicos identificado variadas substâncias a que chamaram “elementos” — para significar que não podiam, por meios químicos, ser reduzidas a outras substâncias. Muitos químicos concluíram que todas

as reações químicas envolviam recombinações desses elementos. Em 1799, J. L. Proust enunciou lei química segundo a qual, nas reações químicas, os elementos se combinam em proporções definidas, de sorte que, se, em uma reação, houver falta ou excesso de um elemento, aquilo que reste a nada se combinará. Em 1808, John Dalton, grande químico inglês, publicou o primeiro volume de *A New System of Chemical Philosophy*, onde explicava essas regularidades químicas a partir da presunção de que cada elemento era constituído de átomos característicos. Sob esse ponto de vista, uma reação química era simples combinação dos átomos dos vários elementos, conforme variadas proporções. Das propriedades dos átomos individuais — tamanho, forma e assim por diante — nada de muito específico podia ser dito.

O avanço significativo, ocorrido a seguir, deveu-se a um estudo dos gases. No início do século XIX, o químico francês J. L. Gay-Lussac verificou que os gases atuam uns sobre os outros de acordo com definidas proporções de volume. (Dois volumes de hidrogênio se combinam com um volume de oxigênio para produzir dois volumes de água.) Isso levou o físico e matemático italiano Amadeo Avogadro à brilhante suposição de que, em condições normais de temperatura e pressão, um volume determinado de todos os gases encerra o mesmo número de partículas. Evitamos empregar a palavra “átomo”, porque a partícula de gás a que é feita referência pode não ser átomo e sim molécula — vários átomos reunidos. (O oxigênio comum, por exemplo, consiste de moléculas compostas de dois átomos.) Avogadro escreveu seu trabalho fundamental em 1811, mas só em 1858 — quando o químico siciliano Stanislao Cannizzaro publicou seu Esboço de um Curso de Filosofia Química, utilizando a forma molecular da hipótese de Avogadro para dar estrutura a uma variedade de dados relativos à química dos gases — foi que essas idéias começaram a receber aceitação. Quase ao mesmo tempo, mas agindo independentemente e empregando métodos diferentes, James Clerk Maxwell e Ludwig Boltzmann formularam os fundamentos da mecânica estatística dessas partículas de gás, generalizando, assim, o trabalho de Bernouilli. A idéia básica foi novamente a de que o comportamento aparentemente ordenado dos gases pode ser reduzido a partir da presunção de eventos moleculares que se dão aleatoriamente. Em outras palavras, imaginava-se o gás como consistindo de moléculas em constante e desordenada colisão. Se fosse possível acompanhá-las, ver-se-ia que cada qual das colisões é governada, dentro dessa formulação clássica, pelas leis da mecânica newtoniana. Na prática, entretanto, é impossível acompanhar cada uma das colisões, pois que são muitíssimas. Em razão disso, Maxwell e Boltzmann criaram métodos para determinar o comportamento médio desse largo número de moléculas. Chegaram a prever que, em um gás típico, à temperatura ambiente, as moléculas se estariam movimentando com velocidade da ordem de mil pés por segundo, se nada lhes embaraçasse o caminho. Sabemos, porém,

pela experiência de todos os dias, que é preciso tempo relativamente grande para que um gás se “misture”, digamos, com o ar. O fato de tratar-se de um processo lento, apesar do rápido movimento das moléculas, deve-se ao fato de uma molécula típica sofrer colisões freqüentes, enquanto se dissemina. O número dessas colisões depende do tamanho das moléculas e do número das moléculas que possam dificultar-lhe o caminho.

Em 1865, estudando os dados existentes a propósito da difusão, J. Lodschtmidt estimou que as ainda hipotéticas moléculas gasosas teriam um diâmetro de aproximadamente $1/50.000.000$ de polegada (cerca de um centésimo milionésimo de centímetro). Lodschtmidt pôde também calcular o número de moléculas existentes em dado volume de gás, em condições normais de temperatura e pressão. (Essas condições foram arbitrariamente fixadas: zero graus centígrados e uma atmosfera de pressão.) Os químicos aceitaram esse volume padrão, de sorte que o gás nele contido traduz, em gramas, o peso molecular desse gás — dezesseis gramas, por exemplo, no caso do oxigênio. O número de moléculas dessa amostra vem a ser, segundo medidas recentes, $6,0249 \times 10^{23}$. Significa isso que, nas mesmas condições, há cerca de $4,5 \times 10^{19}$ moléculas em um centímetro cúbico de gás: moléculas a valer!

Por claro que esse quadro de mecânica estatística possa parecer aos olhos do cientista contemporâneo, era ele, ainda ao fim do século XIX, área sombria e controversa, de modo algum aceito ou mesmo compreendido pelos físicos. Einstein, no isolamento de seu escritório de patentes, em Berna, reinventou, sozinho, o tema. Entre 1902 e 1904, publicou ele três trabalhos que, basicamente, diziam respeito à sua redescoberta das conquistas que já haviam sido conseguidas por Boltzmann e pelo extraordinário físico norte-americano Josiah Willard Gibbs. Gibbs, que realizou seus trabalhos no último quartel do século XIX, vivia, se isso é possível, ainda mais isolado profissionalmente do que Einstein e só quase ao fim desse século tiveram os físicos europeus conhecimento da magnitude das contribuições do norte-americano para o desenvolvimento da mecânica estatística. Einstein observou, mais tarde, que, se tivesse conhecimento da obra de Boltzmann e Gibbs, não teria publicado os trabalhos a que acima se fez referência. Contudo, o fato de Einstein haver redescoberto o assunto transformou-o em mestre absoluto das técnicas de mecânica estatística. Tinha tanta confiança nessas idéias que as aplicou a todos os domínios novos e, como veremos, constituíram elas a base de suas principais contribuições ao campo da Física quântica. Em 1905, Einstein aplicou a mecânica estatística ao movimento browniano dos minúsculos objetos em suspensão nos líquidos.

O maior valor da abordagem de Einstein está em ele haver tratado o movimento browniano de um ponto de vista quantitativo. Uma coisa é sustentar, como se havia feito, que o movimento browniano tem algo em comum com o movimento molecular, mas coisa muito diferente é formu-

lar previsões quantitativas quanto ao que acontecerá. Para simplificar seus cálculos, Einstein imaginou as partículas de Brown em termos de minúsculas esferas, com raios da ordem de dez milésimos de centímetro, embora a molécula típica do líquido em que as muito maiores partículas brownianas se acham em suspensão tenha raio de apenas um centésimo milionésimo de centímetro, pouco mais ou menos. Essas moléculas colidem constantemente e por todos os lados com as partículas brownianas, tendo Einstein admitido que, por força dessas colisões, era igualmente possível que as partículas brownianas se vissem impelidas para qualquer direção. Poderia alguém sentir-se, ingenuamente, levado a supor que uma partícula browniana seria impelida para diante e para trás, sem nunca chegar a ponto algum do líquido. Isso é, entretanto, quase impossível, pois, uma vez que a partícula browniana seja afastada de sua posição original é de imaginar que colisões subseqüentes antes mais a afastem desse ponto do que a façam retornar a ele. Einstein demonstrou que a distância média percorrida pela partícula browniana cresce proporcionalmente à raiz quadrada do tempo decorrido, de sorte que, havendo tempo suficiente, a partícula irá ou será levada, pelos impactos das moléculas, a pontos arbitrariamente distantes de sua posição original.³³ O fato de ser a raiz quadrada do tempo que entra em conta deve-se ao aleatório caráter estatístico das colisões. Essa raiz quadrada é traço básico e muito característico do movimento browniano e corresponde ao aspecto surpreendente e novo da predição de Einstein. Significa, por exemplo, que, em quatro segundos, a partícula browniana não irá quatro vezes mais distante do que vai em um segundo — apenas duas vezes mais. Em particular, Einstein previu que, sendo normal a temperatura da água, uma partícula browniana atingirá distância média de aproximadamente dez milésimos de centímetro em um segundo.

Em 1908, o grande físico experimental francês J. B. Perrin submeteu a teste e confirmou a fórmula de Einstein. E, mais ainda, observando, efetivamente, as distâncias percorridas pelas partículas brownianas, pôde

³³ Para as partículas brownianas esféricas, a equação de Einstein assume a forma

$$\Delta = k \sqrt{\frac{T}{r\eta}} t$$

essa equação, Δ é o deslocamento médio, t é o tempo, k é uma constante universal para todos os líquidos, T é a temperatura do líquido, r é o raio da partícula browniana esférica e η é um número característico para cada líquido e que lhe mede a viscosidade. É clara a significação intuitiva desses fatores. Quanto mais elevada a temperatura, mais agitado é o movimento molecular e, por consequência, mais freqüentes e mais violentas serão as colisões das partículas. De outro lado, quanto maior a partícula e mais viscoso o líquido, menos facilmente poderá ele ser agitado por colisões.

ele deduzir, com aproximação, o número de moléculas existentes, por centímetro cúbico, no líquido em que se moviam. Esse número concorda, em essência, com o número de Avogadro para os gases.

Tudo isso convenceu os céticos remanescentes de que era cientificamente válida a hipótese atomista. Um dos casos mais interessantes é o do físico-químico alemão, de origem russa, Friedrich Wilhelm Ostwald. Ostwald, considerado um dos fundadores da moderna Física-Química, defendia a opinião de que os químicos só devem estudar o que é mensurável — a transferência de energia em reações químicas — e não formular o que tinha por hipóteses vagas acerca de coisas como os átomos, que não eram diretamente observáveis. A esse respeito, seguia Mach (Mach também descrevia os átomos e também se viu convencido pelo movimento browniano). Não obstante, ao fim da Primeira Guerra Mundial, em nova edição de seus *Lineamentos de Química*, Ostwald escreveu:

Estou agora convencido de que recentemente nos tornamos senhores de evidência experimental a propósito da natureza granulada ou discreta da matéria, evidência que a hipótese atomista buscou em vão por centenas e milhares de anos. De uma parte, o isolamento e contagem dos íons gasosos... e, de outra parte, a concordância entre os movimentos brownianos e as exigências da hipótese cinética... tornam cabível que o mais cauteloso dos cientistas fale, hoje, na prova experimental da natureza atomista da matéria. A hipótese atomista vê-se, dessa forma, erigida à posição de uma teoria científica bem fundada.

Bizarro adendo a esses fatos veio a ser recentemente conhecido. Entre as primeiras cartas escritas por Einstein e ainda hoje conservadas, está a que dirigiu a Ostwald, no dia 19 de março de 1901, pleiteando um emprego. Einstein tinha visto recusada a posição de assistente, para a qual se candidataria na Politécnica de Zurique e, sem trabalho, lembrou-se de escrever a Ostwald, não somente por ser este um cientista eminente, mas também porque sustentava, àquela época, idéias positivistas machianas, de que se aproximavam as do próprio Einstein. (Em edição anterior de seu livro, Ostwald havia negado a existência do éter.) Não houve, entretanto, resposta favorável a essa carta de Einstein, nem a uma segunda, escrita no dia 3 de abril, nem a uma terceira, escrita, sem que Einstein soubesse, por seu pai, no dia 13 de abril. Nesse carta, Hermann Einstein dizia que seu filho prezava Ostwald “acima de todos quantos se dedicavam ativamente ao cultivo da Física”. Dificilmente se poderia dizer que faltou visão a Ostwald, pois que, em 1901, a única publicação de Einstein — a propósito de ação capilar — não dava indicação especial de qualquer eminência futura e, por outro lado, seu registro escolar na Politécnica pouco o recomendava.

Examinando a carreira de Einstein, especialmente em seu começo, somos continuamente surpreendidos pelas dificuldades que os contemporâneos tiveram para acomodá-lo dentro dos quadros da realidade científica. Ao tempo da Primeira Guerra Mundial, todo físico sabia ser Einstein um gênio criador, mas sua obra fugia tanto ao convencional que seria difícil encontrar um físico que a houvesse absorvido e apreciado em sua totalidade. Talvez que isso se devesse, em parte, à decepcionante simplicidade de seus primeiros trabalhos — os resultados pareciam “cair do céu”, em vez de decorrerem de longas cadeias de elaborados cálculos. Além disso, Einstein estava sempre adiante dos resultados experimentais que confirmavam suas previsões ou — para dizê-lo mais precisamente — podia, por estar certo de sua intuição a propósito de princípios gerais, escolher resultados experimentais que sentia serem corretos, apartando-os do resto que, mais ou menos, ignorava.

A atitude dos meios científicos em relação a Einstein parece claramente ilustrada pelo fato de ter vindo a receber o Prêmio Nobel. Em função de tudo quanto até aqui foi dito, o leitor haverá certa mente colhido a impressão de que, se existiu físico merecedor do Prêmio Nobel, esse físico foi Einstein. Por padrões normais, qualquer dos trabalhos por ele publicados em 1905 poderia ter-lhe assegurado esse Prêmio. Contudo, quando Einstein, finalmente, veio a receber o Prêmio Nobel em 1922, recebeu-o não por seus trabalhos acerca da relatividade ou do movimento browniano — que eram, na época, bem assentados ramos da Física — mas por seu trabalho a propósito do quantum, assunto em torno do qual pairava, naquele tempo, confusão quase total. Praticamente tudo o que diz respeito aos pormenores dessa concessão — exceto os méritos do beneficiário — parece extremamente estranho.

Antes de tudo, o comitê só anunciou sua decisão no dia 10 de novembro de 1922, embora o prêmio se referisse a 1921. Einstein só o recebeu efetivamente em abril de 1923, quando medalha e diploma lhe foram entregues pelo embaixador da Suécia em Berlim. Mais estranhas ainda foram as palavras: “A REAL ACADEMIA SUECA, em reunião de 9 de novembro de 1922, tendo em vista as estipulações constantes do testamento e declarações de última vontade de Alfred Nobel, datados de 27 de novembro de 1895, decidiu, independentemente do valor que (após eventual confirmação) possa ser atribuído à teoria da relatividade e gravitação, conceder o prêmio que, no ano de 1921, deve distinguir a pessoa que, no campo da Física, haja chegado à mais importante invenção ou descoberta, a Albert Einstein, por ser a pessoa de mais alto merecimento no terreno da Física teórica, especialmente em razão da formulação da lei concernente ao efeito fotoelétrico”. O efeito fotoelétrico era assunto que havia ocupado apenas *um parágrafo* do primeiro dos grandes trabalhos de 1905, sob o título “A propósito de um ponto de vista heurístico no que diz respeito à criação e transformação da luz”. Era como se a Aca-

demia Sueca estivesse tentando livrar-se do espectro especulativo da teoria da relatividade.

A razão da aparente cautela estava, sem dúvida, ligada aos termos do testamento de Nobel. Como é bem sabido, Alfred Nobel, químico e engenheiro que inventou e patenteou a dinamite e outros explosivos relativamente “seguros”, fazendo com isso grande fortuna, deixou a maior parte de seu dinheiro para a constituição de prêmios anuais a serem concedidos “àqueles que tenham prestado os maiores benefícios à humanidade”, no campo das disciplinas indicadas. Essas palavras, pelo menos no que respeitava aos prêmios de Física, atuavam no sentido de limitar o assunto das descobertas possíveis de contemplar. A maioria dos prêmios — desde a primeira concessão em 1901 até a concessão a Einstein — foi atribuída por trabalhos no campo da Física experimental, e alguns deles — como o de 1912, recebido por Nils Gustaf Delén, pela “invenção de reguladores automáticos de faróis e bóias luminosas, utilizáveis durante a noite ou em ocasiões de escassa visibilidade” — pouco pareciam relacionar-se com a ciência. Os comitês mostravam-se, em geral, hesitantes no conceder prêmios a trabalhos de cunho especulativo, a menos que houvesse confirmação experimental insuscetível de dúvida. Aparentemente, ainda em 1922, o comitê julgava a teoria da relatividade como algo de caráter demasiado especulativo para preencher os requisitos do testamento de Nobel.

Como procuramos sublinhar, irônico é que, para os físicos da época, a teoria quântica — de que o efeito fotoelétrico é um aspecto — tinha feição muito mais especulativa que a da teoria da relatividade e era muito menos compreendida. Para ter idéia da confusão que reinava, basta a leitura de um livro como *Elétron*, escrito, em 1917, pelo renomado físico norte-americano Robert A. Millikan. (Millikan recebeu o Prêmio Nobel em 1923, em parte por seu trabalho que confirmava a teoria de Einstein acerca do efeito fotoelétrico — boa parte do qual fora realizada dez anos antes.) Em 1917, Millikan escrevia:

Apesar do acerto aparentemente completo da equação de Einstein (que descrevia o efeito fotoelétrico), que pretendia traduzir a teoria física do efeito fotoelétrico, a expressão simbólica é considerada tão insustentável que, segundo creio, o próprio Einstein não mais a defende [não se explica de onde Millikan tirou essa idéia que, tanto quanto posso dizer, carece de base; Einstein só rejeitou a teoria quântica depois de 1926 e isso nada teve a ver com seus trabalhos de 1905], e assim vemo-nos na posição de alguém que ergueu uma estrutura perfeita e, em seguida, retirou-lhe os fundamentos, sem que isso provocasse a queda do edifício. Permanece ele completo, havendo, aparentemente, resistido bem aos testes a que foi submetido, mas sem que possamos enxergar-lhe os alicerces. Esses alicerces devem,

naturalmente, existir e descobri-los constitui o mais fascinante problema da Física moderna. O experimento ultrapassou a teoria ou, melhor dito, descobriu, orientado por teoria errônea, relações que parecem de grande interesse e importância, mas cujas razões não foram ainda totalmente compreendidas.

xiv. O Quantum

O quantum — mais precisamente, o quantum de ação — foi criado e introduzido na Física, em 1900, pelo alemão Max Planck. De alguma forma, era de esperar que a teoria do quantum nascesse com o século novo. De todas as teorias que até agora examinamos, é a única a se projetar de maneira radicalmente nova para além das fronteiras da Física clássica. Os conceitos da Física quântica situam a Física do século XX fora dos quadros de tudo o que a precede. Essa observação poderá parecer estranha, depois de se haver exposto as conclusões surpreendentes permitidas pela teoria da relatividade. Contudo, as teorias da relatividade, tanto a especial como a geral, se colocam em um contexto filosófico de descrição causal de acontecimentos que se dão no espaço e no tempo — ou no espaço-tempo. O espaço-tempo de Einstein consiste de pontos cuja posição no tempo e no espaço são determinados por procedimentos clássicos e recurso a réguas e relógios de um tipo que os físicos do século XIX manejariam à vontade. A teoria quântica, pelo menos sob sua configuração moderna, desenvolvida na década de 1920, nega a validade subjacente dessas descrições e, assim fazendo, altera e influencia toda a base epistemológica da ciência.

Como se pode imaginar, a aceitação total dessas idéias revolucionárias só veio a ocorrer lentamente e contemplamos repetidamente o espetáculo curioso de precursores que avançam e depois recuam, mantendo-se arredios, enquanto a seguinte geração de cientistas se deixa empolgar. Planck, por exemplo, foi um dos primeiros, dentre os grandes físicos, a aceitar a teoria especial da relatividade. Passou a ocupar-se dela quase imediatamente. Ela se acomodava à sua visão filosófica. Entretanto, a propósito dos trabalhos exploratórios de Einstein em torno dos quanta — dos quanta de Planck, nada menos — a propósito do trabalho que levou os quanta ao campo da Física, Planck escreveu: “(o fato de) haver, por vezes, errado o alvo em suas especulações, tal como ocorreu, por exemplo, em sua teoria dos quanta de luz, não pode, em verdade, ser levantado contra ele”.³⁴ E o próprio Einstein, em 1926, depois de Werner Heisenberg haver divisado a abertura que levaria à mecânica quântica, escrevia a Max Born:

³⁴ Essa frase aparece na proposta apresentada por Planck e vários colegas, no sentido de que Einstein fosse admitido na Real Academia Prussiana de Ciências, em 1913. Ver, por exemplo, J. Bernstein, *A Comprehensible World*, 120.

“A mecânica quântica reclama grande atenção. Mas uma voz interior me diz que esse não é o verdadeiro Jacó. A teoria esclarece muito, porém não nos aproxima dos segredos do Velho. De qualquer maneira, estou convencido de que Ele não se entrega ao jogo de dados”.³⁵

Recentemente, veio a ser conhecida relação ainda mais estranha entre Einstein e a teoria quântica. Dentre todos os aspectos oferecidos por essa teoria, o mais característico de sua metodologia é o “princípio da incerteza” de Heisenberg, que indica a precisa limitação das medidas em escala atômica. O fato de existirem limitações dessa ordem, impostas pela própria teoria à medida de, por exemplo, posições e momentos de partículas perturbou profundamente Einstein. O ponto não podia ser conciliado com a visão que ele tinha da Física, em termos de estrutura geométrica do espaço-tempo. Fez ele várias tentativas fracassadas para refutar as relações de incerteza e, gradualmente, alterou a posição, passando a afirmar que as relações eram “incompletas” — fase intermediária entre a Física clássica e algumas sínteses últimas, onde estão presentes conceitos clássicos de campo e a geometria do espaço-tempo. Irônico é que Heisenberg diz ter colhido inspiração para formular o princípio da incerteza em uma conversa que manteve com Einstein, no ano de 1926. Heisenberg ainda achava que “Einstein sustentava as concepções positivistas preconizadas por Mach — a idéia de que todas as quantidades que integram uma teoria física devem ter ‘definições operacionais’, em termos de instrumentos de medida — que caracterizaram a análise conducente à teoria especial”. Não se dera conta de que Einstein havia abandonado essa posição muitos anos antes, quando procurava formulação final para a teoria da gravitação. Assim, grande foi o espanto de Heisenberg, quando Einstein indagou: “Mas você acredita seriamente que só magnitudes observáveis devem integrar uma teoria física?” Ao que Heisenberg replicou, com alguma surpresa: “Não foi precisamente assim que o senhor agiu com respeito à relatividade? Afinal de contas, o senhor sublinha o fato de que não é permissível falar em tempo absoluto simplesmente porque o tempo absoluto não pode ser observado e o fato de que só são relevantes, para a determinação do tempo, as indicações dos relógios, estejam estes no sistema de referência móvel ou no sistema em repouso.”

E recorda Heisenberg que Einstein respondeu: “É possível que eu tenha usado esse tipo de raciocínio que, nem por isso, deixa de ser absurdo. Talvez eu pudesse ser mais diplomata, dizendo que é heurísticamente útil conservar no espírito aquilo que efetivamente se observou. Mas, em princípio, é errado tentar alicerçar uma teoria apenas em magnitudes ob-

³⁵ A carta original foi escrita em alemão. As duas traduções dadas a público diferem um tanto no estilo, mas não quanto ao conteúdo essencial. A por nós apresentada foi colhida em Martin J. Klein, “Max Born on His Vocation”, *Science*, 169 (1970), 361.

serváveis. Em verdade, o contrário é que acontece. É a teoria que decide o que podemos observar...” Essa frase — *é a teoria que decide o que podemos observar* — permaneceu na mente de Heisenberg e tornou-se o tema que o levou à formulação do princípio da incerteza.

Voltemos, agora, a Planck e ao quantum. Planck era uma das pessoas menos radicais que se possa imaginar. Descendia de uma antiga família alemã de acadêmicos, funcionários públicos e advogados. Seu pai foi professor de Direito em Kiel, cidade que viu Planck nascer, em 1858. “O que me conduziu”, escreveu ele,

“à ciência e, desde a juventude, me encheu de entusiasmo foi o fato — que não é auto-evidente — de as leis do pensamento se conformarem com a legalidade presente nas impressões que recebemos do mundo exterior, tornando, assim, possível que o homem consiga informar-se dessa legalidade pelo simples exercício do pensamento. (Essa idéia foi enunciada por Einstein, no célebre aforismo: “Pode-se afirmar que o eterno mistério do mundo é sua compreensibilidade.”) É da mais alta significação que o mundo exterior represente algo absoluto e independente de nós, com que nos confrontamos; e a busca das leis que governam esse absoluto pareceu-me o trabalho mais fascinante a que dedicar a vida”.

Ao início de sua carreira científica, Planck surpreendeu-se com o fato de as grandes leis da termodinâmica, envolvendo energia e entropia, apresentarem esse caráter absoluto. Por esse motivo, ele, de começo, rejeitou as idéias de Maxwell e, especialmente, as de Boltzmann, segundo as quais as leis da termodinâmica indicavam apenas o comportamento médio ou mais provável dos sistemas constituídos de elevado número de partículas. Para Boltzmann, que, em meados dos anos 1880, havia aprofundado essas idéias, um sistema como o gás evolve no tempo, encaminhando-se para configurações de maior e maior probabilidade. Durante o curso dessa evolução, o sistema pode “flutuar” em torno de configuração improvável, mas a evolução continuará a processar-se no sentido do provável. Aos olhos de Planck, essas considerações de probabilidades violavam o ideal de “absoluto” e, por isso, inicialmente, rejeitou-as. Contudo, no início do século, sob pressão de novos resultados experimentais, viu-se obrigado a mudar de opinião.

Os acontecimentos que levaram aos quanta de Planck começaram de maneira aparentemente inócua. Vários físicos e, particularmente, Gustav Kirchhoff e Josef Stefan iniciaram, em meados do século XIX, a abordagem teórica e experimental do problema da chamada radiação de “corpo negro”. Em situação experimental típica, aquece-se, até determinada temperatura, um recipiente em que se fez vácuo parcial. Os átomos que

constituem o material das paredes do recipiente — assim vemos, hoje, o fenômeno — começam a vibrar com o aquecimento, e essas vibrações, ou oscilações, levam à emissão de radiação eletromagnética. Essa radiação choca-se contra as paredes do recipiente, estabelecendo-se, afinal, uma situação de equilíbrio. A radiação, no interior do recipiente, apresenta várias frequências — cores, se quisermos — que se distribuem segundo espectro que os físicos denominam espectro “normal” ou espectro “do corpo negro”. Fazendo um orifício no recipiente e colhendo amostra da radiação, pode sua distribuição ser medida. Kirchhoff demonstrou que o espectro independe do material de que se constituam as paredes. Tinha, portanto, o caráter “absoluto”, que atraía Planck. Ao fim dos anos 1890, o físico alemão Wilhelm Wien chegou a uma expressão matemática muito simples — imaginou-a — que parecia traduzir os resultados experimentais relativos à forma do espectro; e Planck “se pôs a trabalhar pressurosamente”, buscando justificar, a partir de primeiros princípios, o espectro de Wien. Ao fim do século XIX, Planck julgou haver encontrado solução e, em 1899, encaminhava aos *Annalen der Physik* um trabalho que, a seu ver, encerrava a questão. Entretanto, ao tempo em que corrigia as provas desse trabalho, novos resultados experimentais começaram a surgir e, em nota acrescentada ao original, Planck assinalava que a distribuição de Wien parecia não aplicar-se, em especial, à faixa final do espectro, à correspondente aos mais longos comprimentos de onda — isto é, aos mais vermelhos.

Por volta de outubro de 1900, Planck havia reconhecido a errônea dos argumentos que desenvolvera em prol da lei de Wien e chegara a uma fórmula nova — também sem justificação teórica — que parecia adequar-se a todos os experimentos. Em verdade, como recordou Planck, tão logo ele anunciou a nova fórmula em um congresso de físicos, viu-se ela confirmada.

Na manhã seguinte, recebi a visita de meu colega Rubens. Veio para dizer-me que, após o encerramento do congresso, ele havia, na mesma noite, colocado a fórmula em confronto com os resultados de suas medidas, verificando existir, em todos os pontos, satisfatória concordância... Medidas posteriores também confirmaram, uma após outra, minha fórmula de radiação — quanto mais acurados os métodos de medida utilizados, mais precisa se revelava a fórmula.

E assim continua a ocorrer até hoje.

Nada disso tinha, até essa altura, qualquer relação com os quanta. As relações se manifestaram ao ser dado o passo seguinte, ao tentar Planck derivar sua fórmula. Para essa derivação, ele verificou, relutantemente, que tinha de adotar os métodos estatísticos de Boltzmann — acrescentando, porém, importante presunção. Para chegar à sua fórmula,

ele havia sido forçado a admitir que os osciladores atômicos que formavam as paredes dos recipientes de radiação, ao emitirem e absorverem radiação, só podiam alterar a energia segundo unidades quantizadas. Imagem que Einstein gostava de usar era a de que, à semelhança da cerveja de barril, que só pode ser comprada e vendida em garrafas, assim também a energia de radiação só podia ser retirada dos osciladores atômicos em porções determinadas, especificadas — os quanta de energia.

De início, pareceu a Planck que o resultado obtido se devia a alguma falha no método de derivação e que trabalho mais aprofundado permitiria afastar os quanta e conservar a fórmula. Dedicou os dez anos seguintes a tentativas nesse sentido. E como escreveu depois — Planck faleceu em 1947 —

Minhas fúteis tentativas de acomodar o quantum elementar de ação à teoria clássica prosseguiram por muitos anos e muito esforço me custaram. Diversos colegas viram meu procedimento como algo que se aproximava da tragédia. Penso de outro modo. O esclarecimento completo que dessa forma consegui foi valiosíssimo. Sei agora que o quantum elementar de ação desempenhou, em Física, papel muito mais significativo do que eu, de início, estava inclinado a supor.

O ponto de partida de Einstein foi muito menos ambicioso e muito menos radical, embora ele, pelo hábito de acompanhar os desenvolvimentos até o fim, independentemente de onde o levassem, haja alterado para sempre nossa visão do mundo físico. Einstein começou por aceitar a lei de Wien — essencialmente idêntica à fórmula de Planck para os comprimentos de onda mais curtos, mais próximos do violeta — como fato experimental comprovado; e perguntou-se o que isso significava com respeito à radiação surgida no recipiente. (Só vários anos depois é que Einstein tentou derivar a fórmula completa de Planck — derivação hoje reproduzida por todos os manuais de Física quântica.) Utilizando seu conhecimento de mecânica estatística, pôde ele demonstrar, a partir da lei de Wien, que a radiação no interior do recipiente admitia o mesmo tratamento matemático que admitiria se fosse constituída de quanta. Em outras palavras e segundo imagem de Einstein, não se deva apenas que a cerveja de barril fosse vendida apenas em garrafas, mas ocorria que a cerveja do barril consistia tão-somente de quantidades correspondentes a garrafas. Não havia como escapar a essa conclusão, caso, em função dos experimentos, se admitisse a lei de Wien — ou a equivalente lei de Planck para os curtos comprimentos de onda — e se aplicasse a mesma forma de raciocinar que se tinha mostrado tão frutífera no campo da mecânica estatística dos gases e dos líquidos, a mesma forma de raciocinar que Einstein havia usado em sua teoria do movimento browniano. Tendo assentado esse ponto, Einstein colocou a pergunta seguinte — o que Planck não fez — no sentido

de saber se a descoberta tinha implicações sobre outros fenômenos, onde ocorresse interação de radiação e matéria. Encontrou vários exemplos dessas implicações e entre eles estava o efeito “fotoelétrico”.

O efeito fotoelétrico impôs-se à atenção dos físicos, pela primeira vez, nos últimos anos do século passado. Notou-se que luz ultravioleta — muito alta frequência — incidindo sobre as superfícies de certos metais provocava, de tempos em tempos, a ejeção, a partir do metal, de um elétron de alta energia. Peculiar era que — presumindo-se, especialmente desde Maxwell, ser a radiação eletromagnética constituída de ondas — não se podia entender por que, tendo uma onda energia suficiente para deslocar um elétron, não deslocava ela todos os elétrons situados em seu caminho. Era como se um grupo de nadadores estivesse alinhado em uma praia, exposto a ondas que, pela violência aparente, poderiam derrubá-los todos, mas que, em lugar disso, só uma vez ou outra derrubava um dos nadadores, deixando os demais intactos. Em 1902, Philipp Lenard — que ganhou o Prêmio Nobel em 1905 e que, mais tarde, veio a tornar-se fanático nazista e uma das vozes mais hostis à “Física judaica” — fez a importante observação de que, aumentada a intensidade da luz — graças, por exemplo, a colocar-se a sua fonte em posição mais próxima à das placas de metal — não aumentava a energia dos elétrons ejetados, mas apenas seu número. Do ponto de vista ondulatório, isso era um mistério. Voltando a usar a analogia dos nadadores, seria como se, aumentada a força da onda, o efeito não fosse o de derrubar mais violentamente os nadadores, mas, antes, o de derrubar maior número deles, com impacto exatamente igual ao causado pela onda menor.

Foi esse conjunto de fatos que Einstein procurou explicar por meio dos quanta, fazendo uso de importante ponto que havia emergido de seus cálculos. Tinha ele demonstrado — e era também característica da derivação do espectro do corpo negro, feita por Planck — que a energia de um quantum de luz é proporcional à sua frequência. Significava isso, por exemplo, que os quanta de luz azul encerram mais energia que os quanta de luz vermelha, e que os raios X possuem energia ainda maior, pois sua frequência é superior a qualquer frequência de luz visível. A equação básica da luz assume, então, a forma simples $E = hv$, onde E é a energia do quantum, v é a frequência e h é uma nova constante natural, hoje denominada constante de Planck. (Se E for medida em ergs e a frequência em segundos, a constante de Planck terá, de acordo com recentes cálculos, o valor de $6,62559 \times 10^{-27}$ erg-segundo, com pequeno erro experimental nas duas últimas casas. Esse é um número “pequeno” e explica por que os fenômenos quânticos são de proporção que os torna insuscetíveis de observação na vida comum.)

Aceita a hipótese quântica, tornava-se, de imediato, explicável o resultado de Lenard. Segundo o novo quadro, quando ocorrem esses efeitos, a luz atua não sob a forma de ondas, mas como uma coleção de quanta de

energia discreta. Enquanto a luz é de frequência única — é azul, digamos — todos os quanta encerram a mesma energia. Se a fonte de luz crescer de intensidade, só poderá produzir mais quanta portadores da mesma energia. Quando um quantum de luz colide com um elétron, pode perder toda a sua energia para o elétron — à semelhança de bolas de bilhar que se chocam — e, quanto mais intensa a fonte, mais quanta haverá e maior número de colisões será suscetível de ocorrer.

Embora os resultados de Lenard estivessem em concordância qualitativa com essas idéias, os primeiros experimentos quantitativos só foram feitos dez anos depois, por Millikan, e os resultados conhecidos em 1916. Millikan era um experimentador extraordinariamente bem dotado e, ao realizar os experimentos, teve de manter as superfícies metálicas no vácuo, a fim de evitar que se cobrissem de impurezas que poderiam bloquear a ejeção de elétrons do metal. Construiu ele, dentro de um recipiente de vidro em que fez o vácuo, uma “barbearia” em miniatura, com uma “navalha” de controle remoto, que ele podia utilizar para “barbear” as superfícies de metal. Fazendo variar, ao longo de ampla gama, a cor da luz incidente, pôde ele submeter a teste completo e bem sucedido a equação de Einstein.

Como vimos, esse não era um resultado que Millikan saudasse com muito entusiasmo, pois lhe parecia, como parecia à maioria dos físicos, inclusive Einstein, que o fato só tornava mais denso o mistério que rodeava a natureza da luz. Até o começo do século XIX, os físicos, de modo geral, haviam admitido que a luz consistisse de partículas energéticas (exceção notável foi, no século XVII, o físico Christian Huygens, que deu os primeiros passos importantes no sentido de uma teoria ondulatória da luz e viu sua obra ignorada, devido à influência de Newton, que acolhia a idéia de partículas), mas novos experimentos, iniciados na Inglaterra, por Thomas Young, e continuados, na França, por Augustin Fresnel e outros, pareciam afastar, de uma vez por todas, as teorias que postulavam partículas luminosas. Todos esses experimentos apresentavam um tema comum — a “interferência”. Quando duas ondas se superpõem no espaço, interferem uma com a outra, significando isso que se combinam para produzir um movimento ondulatório que difere dos movimentos das ondas individuais. Em certos pontos da onda que surge — se a porção inferior de uma onda se superpõe à crista da outra — as amplitudes podem cancelar-se e torna-se nula a amplitude da onda resultante. Essa fenômeno foi verificado por Young, que fez a luz atravessar dois pequenos orifícios de uma tela e notou que o efeito combinado era o surgimento de faixas alternadas de luz e sombra, brotadas da interferência construtiva e destrutiva dos dois conjuntos de ondas luminosas. E Young pôde valer-se dessa técnica para medir o comprimento de onda de vários tipos de luz visível.

Ao longo do século XIX, essa técnica se aperfeiçoou e o conjunto da

ciência ótica se construiu em torno da teoria ondulatória da luz, que pareceu ter encontrado sua formulação final nas equações de Maxwell. Desnecessário é dizer que Einstein tinha perfeito conhecimento do êxito da teoria ondulatória, quando escreveu o trabalho sobre os quanta de luz. Em verdade, ele inicia esse trabalho dizendo redondamente: “A teoria ondulatória, operando com o auxílio de funções espaciais contínuas, mostrou-se correta no representar fenômenos puramente óticos e, provavelmente, não cederá lugar a qualquer outra teoria.”

Contudo (prossigue ele), deve-se ter em mente que as observações óticas dizem respeito a valores temporais médios e não a valores instantâneos, sendo possível — a despeito da completa verificação experimental da teoria da difração, reflexão, refração, dispersão e assim por diante — que a teoria da luz, que utiliza funções espaciais contínuas, possa colocar-se em conflito com as observações, se a aplicarmos aos fenômenos de geração e transformação da luz.

Parece-me, com efeito, que observações a propósito da “radiação de corpo negro”, da “fotoluminescência”, da geração de raios catódicos (elétrons) através da radiação ultravioleta e de outros grupos de fenômenos relacionados com a geração e transformação da luz, poderão ser melhor compreendidas, se admitirmos que a energia da luz se distribui descontinuamente no espaço. Nos termos da presunção que ora se propõe, a energia existente em um raio de luz que emana de uma fonte puntiforme não se distribui continuamente sobre volumes de espaço cada vez maiores, mas consiste de um número finito de quanta de energia, localizados em pontos do espaço, que se movimentam sem subdividir-se e que só são absorvidos e emitidos como unidades.

Durante os vinte anos seguintes, Einstein dedicou grande parte do tempo a tentar compreender esse caráter “esquizofrênico” da luz. (O leitor haverá, talvez, notado que a esquizofrenia já está inserta na equação fundamental da energia dos quanta, $E = h\nu$, pois a frequência ν é um conceito ondulatório, mas também caracteriza a feição de “partícula” de energia do quantum.) O trabalho por ele realizado dividiu-se, aparentemente, em duas partes: a parte que Einstein publicou e que dizia respeito a descobrir novas aplicações das idéias quânticas a outros fenômenos, e a parte que não publicou, por não se ter coroado de êxito e que dizia respeito a descobrir algum tipo de teoria fundamental, capaz de incorporar esses dois aspectos da luz, permitindo uma descrição única. Da primeira parte, as duas porções mais interessantes são, provavelmente, a teoria quântica de Einstein acerca dos “calores específicos” dos sólidos e o estudo da faixa do es-

pectro de radiação correspondente aos comprimentos de onda longos. O calor específico diz respeito à capacidade que têm os objetos de absorver calor e ver assim elevada a sua temperatura — aumento da temperatura de um corpo ao receber uma quantidade específica de calor. Einstein descobriu que algumas anomalias observadas no processo de absorção de calor a baixas temperaturas poderiam ser explicadas através do uso dos osciladores quantizados de Planck, utilizados como absorventes de calor. Dessa maneira, foi lançado o alicerce do moderno desenvolvimento da teoria quântica dos sólidos, e o fato de, em 1907 — quando Einstein, pela primeira vez, dedicou atenção ao assunto — já existirem experimentos corroboradores foi o motivo inicial de o interesse de muitos físicos se terem voltado para a hipótese quântica.

A segunda porção importante do trabalho disse respeito à faixa espectral correspondente, na fórmula de Planck, aos comprimentos de onda longos. Tratava-se da extremidade do espectro oposto àquela de que Einstein se ocupara em 1905. Em verdade — e Planck não havia considerado esse ponto quando compôs seu trabalho — uma teoria que se adequava a essa extremidade do espectro havia sido elaborada por Lorde Rayleigh e, mais tarde, ligeiramente modificada pelo astrônomo inglês James Jeans, em 1900. O traço importante do resultado que atingiram é ele ser consequência inevitável da Física clássica. Se a constante de Planck, que é característica dos quanta, for igualada a zero na fórmula por ele proposta, chega-se à lei de Rayleigh-Jeans. Einstein avançou um passo. Recorrendo novamente a argumentos de mecânica estatística, demonstrou que essa extremidade do espectro brota da natureza ondulatória da luz. Assim, de maneira surpreendente, o espectro do corpo negro viu inseridos em sua estrutura tanto o aspecto ondulatório da luz quanto o seu aspecto de partículas.

Alguma percepção acerca do estado de espírito em que se encontrava Einstein, enquanto enfrentava o problema dos quanta, pode ser conseguida, se se fizer referência a uma passagem pitoresca e a uma carta. A primeira foi contada por Philipp Frank:

Por esse tempo (Einstein achava-se em Praga)... começou ele a sentir-se preocupado pelos paradoxos brotados da natureza dual da luz... Seu estado de espírito quanto ao problema pode ser percebido através do relato do seguinte incidente:

O escritório de Einstein, na Universidade, dava para um parque onde havia belos jardins e árvores frondosas. Notou ele que, de manhã, ali só passeavam mulheres e, à tarde, passeavam apenas homens e que algumas daquelas pessoas caminhavam sós, mergulhadas em profunda meditação, enquanto outras se reuniam em grupos e se empenhavam em discussões acaloradas. Procurando informar-se a propósito daquele estranho

jardim, veio a saber que pertencia a um asilo de loucos da província da Boêmia. Os que passeavam no jardim eram doentes, inofensivos pacientes que não precisavam viver em confinamento. Quando, pela primeira vez, fui a Praga, Einstein mostrou-me o jardim, deu-me as explicações referidas e disse, em tom brincalhão: “Aqueles são os loucos que não se ocupam da teoria quântica”.

A carta foi escrita um pouco antes, em 1908, e endereçada a um colaborador chamado J. J. Laub:

Dedico-me incessantemente ao problema da constituição das radiações e, a esse propósito, correspondo-me com H. A. Lorentz e Planck. O primeiro é espantosamente profundo [Lorentz tinha, na época, cinquenta e cinco anos e era considerado o maior físico teórico vivo; Einstein tinha vinte e nove e continuava a trabalhar no Bureau de Patentes] e, ao mesmo tempo, muito afável. Planck mostra-se também muito amável em sua correspondência. Tem um defeito, entretanto: sente dificuldade de orientar-se dentro dos quadros do pensamento alheio. Compreensível, portanto, que faça objeções improcedentes a meu último trabalho acerca da radiação. Nada disse, entretanto, em contestação a minhas críticas. Espero que as tenha lido e admitido. Essa questão do quantum é tão importante e difícil que todos deveriam empenhar-se nela. Já consegui elaborar algo que pode relacionar-se com o assunto, mas tenho razões para continuar pensando que é coisa sem préstimo.

Em 1911, Einstein havia deixado a Universidade de Zurique para se dirigir a Praga, porém, no outono de 1912, voltava a Zurique na condição de professor da Politécnica por onde se formara, sem qualquer distinção especial, mais de dez anos antes. Permaneceu em Zurique menos de dois anos e, em abril de 1914, mudava-se para Berlim, onde ficaria até deixar definitivamente a Alemanha, em 1932.

Durante esse tempo, Max Born ia a Berlim com frequência; nominalmente, ele ocupava uma cadeira na Universidade, mas a maioria das atividades acadêmicas havia sido suspensa, depois da mobilização militar de agosto de 1914. Não obstante, com a presença de Einstein, Planck e, logo depois, de Erwin Schroedinger, Berlim se tornou e permaneceu até meados dos anos 1920 (quando o centro de gravidade pendeu para o lado de homens mais moços que se encontravam em Gottingen e Copenhague) o mais importante núcleo de Física teórica de todo o mundo — e não foram mencionados os grandes físicos e químicos experimentais que lá se achavam. O colóquio de físicos de Berlim contava com a presença semanal

de eminentes cientistas — e jamais uma assembléia semelhante se reuniu, por qualquer tempo, antes ou depois.

Planck e Einstein encontravam-se a intervalos regulares, na Academia de Berlim e entre eles desenvolveu-se amizade que se projetava para muito além do intercâmbio de idéias científicas. E, contudo, seria difícil imaginar dois homens que tivessem mais diferentes atitudes diante da vida: Einstein, um cidadão do mundo, pouco apegado às pessoas que o rodeavam, alheio ao passado emocional da sociedade em que vivia; Planck firmemente preso às tradições de família e de nação, patriota ardente, orgulhoso da grandeza da história alemã e conscientemente prussiano em sua atitude para com o Estado. Contudo, essas diferenças pouco importavam, quando comparadas ao que os dois tinham em comum: fascinado interesse pelos segredos da natureza, convicções filosóficas semelhantes e profundo amor pela música. Frequentemente, executavam, em conjunto, música de câmara — Planck, ao piano e Einstein, ao violino, ambos absortos e felizes. Planck era pianista excelente e, a pedido, tocava quase que qualquer peça clássica, na maioria das vezes, de cor. Gostava também de improvisar sobre um tema que lhe fosse proposto ou sobre velhas canções populares alemãs, que amava ternamente.³⁶

Desde que, em começos de 1920, se organizaram as primeiras manifestações de anti-semitismo na Alemanha, Einstein mostrou-se sensível aos perigos da ascensão do nazismo. Planck, de outra parte e quicá em razão de seu sentido de patriotismo ou de sua idade avançada, subestimava o poder e a duração do movimento nazista. Desprezava os nazistas e estava convencido de que representavam uma fase passageira. Por volta de 1933, teve uma audiência com Hitler, objetivando assegurar o prosseguimento da carreira de um colega judeu, o célebre químico Fritz Haber (Haber, durante a Primeira Guerra Mundial, havia feito descobertas no domínio dos explosivos, às quais Born atribuía a possibilidade dada à Alemanha de estender a guerra). Hitler teve tal ataque de ira que, em palavras de Born, “Planck nada pôde fazer, senão ouvir em silêncio e retirar-se”. Depois disso, Planck abandonou a esperança de alterar o regime e resignou-se a viver na Alemanha da melhor maneira possível. Sua casa e biblioteca foram destruídas por ataques aéreos durante a Segunda Guerra Mundial, e seu filho Erwin foi executado pelos nazistas, depois de haver participado do atentado contra Hitler, em julho de 1944. Planck viveu o resto de seus dias em Gottingen, onde faleceu aos oitenta e oito anos de idade.

³⁶ Necrológio de Max Born para Planck.

xv. Os anos intermediários

Os dias de após-Primeira Guerra Mundial foram difíceis para Einstein. Adoeceu muitas vezes. A inflação alemã tornou precária a sua situação financeira, especialmente porque sustentava a primeira esposa e dois filhos, que viviam na Suíça; a atmosfera geral da Alemanha parecia-lhe ameaçadora e desagradável. Não fosse por lealdade a Planck e a alguns outros companheiros, ele teria emigrado para a Holanda, indo juntar-se a seu bom amigo Paul Ehrenfest, em Leyden. Ehrenfest, nascido em Viena, no ano de 1880, havia encontrado Einstein, pela primeira vez, na cidade de Praga, em 1912, e ficara tão impressionado que decidira transferir-se para Zurique, a fim de com ele trabalhar. Einstein encontrou em Ehrenfest um crítico científico entusiasta, mas honesto e rigoroso, e entre os dois homens se desenvolveu profunda amizade — pelo menos, tão profunda quanto o permitia a natureza de Einstein. Depois de Ehrenfest haver-se fixado em Leyden, Einstein visitou-o com frequência. Uma das visitas ocorreu em 1916, logo depois de Einstein ter dado forma final à teoria geral da relatividade. Além de encontrar-se com Ehrenfest, Einstein muito desejava conversar com Lorentz que, tendo pouco mais de sessenta anos, continuava, apesar de nominalmente aposentado, a trabalhar intensamente em pesquisas. Ehrenfest descreveu esse encontro entre Einstein e Lorentz:

De acordo com seus hábitos, Lorentz, ao jantar, preocupou-se, antes de tudo, em fazer com que Einstein se sentisse envolvido por uma atmosfera de simpatia humana calorosa e alegre. Depois, sem pressa, subimos para o escritório simples e confortável de Lorentz. A cadeira mais cômoda foi cuidadosamente colocada ao lado da grande mesa de trabalho e reservada para o hóspede estimado. Calmamente e para cortar qualquer impaciência, foi oferecido um charuto a Einstein e, somente a essa altura, começou Lorentz a formular, tranquilamente, uma questão refinadamente burilada, a propósito da deflexão da luz em um campo gravitacional. Einstein ouviu a exposição, sentado comodamente, fumando, inclinando a cabeça com satisfação, encontrando prazer na maneira magistral que Lorentz usara para redescobrir, estudando suas obras, as enormes dificuldades que ele tivera de vencer, antes de poder levar os leitores ao ponto de destino pela rota — utilizada em seus trabalhos — mais direta e menos espinhosa. Mas, à medida que Lorentz prosseguia, Einstein começava a dar baforadas menos frequentes e se endireitava na cadeira. Quando Lorentz terminou, Einstein inclinou-se sobre o pedaço de papel em que ele havia escrito fórmulas matemáticas, ao longo da exposição. O

charuto foi abandonado e, pensativamente, Einstein torcia, com o dedo, um tufo de cabelo sobre a orelha direita. Lorentz sentava-se sorridente, diante de um Einstein completamente perdido em meditação — exatamente como um pai olha um filho particularmente querido, seguro de que este vencerá a dificuldade que lhe foi proposta, mas interessado em saber como o fará. Passou-se bom tempo, mas, de repente, a cabeça de Einstein levantou-se alegremente — havia conseguido! Ainda discutiram um pouco, apartando-se mutuamente; desacordo parcial, rápido esclarecimento, completa compreensão e dois homens examinando, com brilho nos olhos, a riqueza cintilante da teoria nova.

Pouco surpreende que, ao fim da vida, Einstein haja escrito, a respeito de Lorentz, o trecho seguinte: “Para mim, pessoalmente, ele significou mais que todos os outros que encontrei na jornada desta vida”. E pouco surpreende que Einstein se tenha sentido tentado a estabelecer-se em Leyden, no ano de 1919, depois que Ehrenfest lhe deu notícia de um, oferta que lhe asseguraria bem-estar financeiro e possibilidade de usar o tempo a seu critério, “contanto que se possa dizer — Einstein está em Leyden, em Leyden está Einstein”. Alguns dias depois, Einstein escreveu:

Tão fabulosa é sua oferta e tão amigas e cheias de afeição as suas palavras que dificilmente você imaginará quanto sua carta me pôs confuso. Você sabe, naturalmente, como eu aprecio Leyden. E como gosto de todos vocês. Minha situação não é, entretanto, tão fácil, a ponto de eu poder simplesmente acompanhar a inclinação de meus sentimentos. Estou incluindo uma carta que Planck me escreveu, quando eu me encontrava em Zurique. Depois de recebê-la, eu prometi a ele que não abandonaria Berlim, a não ser que as condições fossem tais que ele próprio encarasse o afastamento como natural e adequado. Dificilmente você imaginará os sacrifícios que têm sido feitos — sendo a situação financeira tão desfavorável — para que eu possa permanecer e sustentar minha família em Zurique. Seria duplamente mesquinho de minha parte que, exatamente quando minhas esperanças políticas vêm sendo concretizadas, eu me afastasse, sem motivo e, talvez, parcialmente, por conveniência material, daquelas pessoas que me têm dedicado amor e amizade, para as quais minha partida seria duas vezes mais dolorosa nesta época de suposta humilhação. Você não calcula como, neste lugar, me cercam de afeto; há sempre alguém para limpar as gotas de suor que me porejam da testa.

E, assim, Einstein continuou em Berlim, mas aceitou um cargo especial de professor, que o levava a visitar Leyden durante algumas semanas por ano.

Na mesma carta dirigida a Ehrenfest, Einstein pergunta: “Soube você, por acaso, de alguma coisa a respeito da expedição inglesa interessada no eclipse solar?” Foi essa expedição, como vimos, a primeira a obter dados confirmatórios da curvatura da luz por efeito do Sol. A carta de Einstein foi escrita no dia 12 de setembro de 1919 e, no dia 27, ele recebia notícia de Lorentz, dando por comprovada a teoria. Isso tornou Einstein, de uma hora para outra, figura de todos conhecida; e, talvez por esse motivo e por ele ser judeu, o fato coincidiu com os primeiros ataques políticos, anti-semitas, organizados contra a teoria da relatividade. Passadas várias décadas, todo esse horrível episódio começa a assumir a forma de um terrível sonho que só com grande dificuldade conseguimos associar ao real. Nas pessoas que o viveram, especialmente em Einstein, que era um judeu e um humanitarista, ficaram cicatrizes que jamais desapareceram. Em 1946, quando o físico alemão Arnold Sommerfeld — que havia sido antinazista, mas que, à semelhança de Planck, permanecera na Alemanha — escreveu a Einstein, sugerindo que ele renovasse sua filiação à Academia Bávara, de onde fora expulso em 1933, Einstein respondeu: “Os alemães trucidaram meus irmãos judeus; nenhuma outra relação terei com eles, nem mesmo através de uma academia relativamente sem expressão. Tenho sentimentos diferentes em relação às pessoas que, tanto quanto era possível, permaneceram resolutamente contrárias ao nazismo. Alegro-me por saber que o senhor esteve entre elas”.

Em 1920, surgiu, na Alemanha, uma Liga anti-Einstein, que oferecia substanciais quantias de dinheiro a todos quantos escrevessem refutações à obra de Einstein. No dia 24 de agosto de 1920, a Liga patrocinou uma reunião no Salão Filarmônico de Berlim, reunião em que se vendiam suásticas e panfletos anti-semitas e à qual Einstein esteve presente, vendendo-se pessoalmente atacado e atacada sua obra. Alguns de seus colegas reagiram, por meio de carta enviada ao *Berliner Tageblatt* e, poucos dias mais tarde, o próprio Einstein redigiu irritada carta, publicada pelo *Berliner Tageblatt* — e isso chocou profundamente Ehrenfest, que achava que Einstein deveria tentar ignorar o assunto, por indigno de sua atenção. Desde essa época, até deixar a Alemanha, em 1932, Einstein foi alvo de crescente campanha orientada contra ele e sua obra.

Alusão, por breve que seja, ao destino que a ciência sofreu na Alemanha dos anos 1930 é coisa que entristece profundamente. Em 1933, Philipp Lenard podia escrever no *Völkische Beobachter*:

O mais sério exemplo da perigosa influência dos círculos judeus sobre o estudo da natureza foi proporcionado por Herr Einstein, com suas toscas teorias matemáticas, que consistem

de alguns conhecimentos antigos e de acréscimos arbitrários. Essa teoria vem-se desagregando gradualmente, o que é o destino de todos os produtos alheios à natureza. Mesmo os cientistas que, sob outros aspectos, construíram obra sólida não podem fugir à censura por haverem permitido que a teoria da relatividade pusesse pé na Alemanha, em razão de não terem visto ou não terem desejado ver quão errado é, inclusive em campo alheio ao da ciência, olhar esse judeu como um bom alemão.

Dois anos depois, Lenard fez o discurso inaugural, ao se instalar um novo instituto de Física:

Espero que o instituto se ponha como um pendão de batalha contra o espírito asiático no campo da ciência. Nosso Führer varreu esse mesmo espírito do campo da política e da economia nacional, onde tem o nome de marxismo. No terreno da ciência natural, entretanto, devido à importância exagerada que se dá a Einstein, ele ainda permanece. Importa reconhecer que é indigno de um alemão ser seguidor intelectual de um judeu. A ciência natural merecedora desse nome é de origem inteiramente ariana e os alemães devem, também hoje, encontrar o caminho que os leve a penetrar o desconhecido. Heil Hitler.

Em 1939, apesar de declarações como as do Ministro de Educação nazista, Bernhard Rust — “o nacional socialismo não é inimigo da ciência, mas tão-somente das teorias” — a ciência, na Alemanha, estava destruída. Só agora se recupera. A maioria dos grandes , cientistas alemães — judeus ou não-judeus — emigrou. Alguns poucos, pertencentes à velha geração, como foi o caso de Max von Laue, conseguiram sobreviver, a despeito de clara posição antinazista; outros, como Heisenberg e von Weizsäcker, embora nunca se filiassem ao Partido Nazista, fizeram todas as concessões necessárias para poderem continuar trabalhando. Von Weizsäcker, eminente físico nuclear, era filho do secretário de Ribbentrop e, pertencendo a uma família de diplomatas, procurou vários acordos com o Partido, a fim de que os resultados da teoria da relatividade, divorciados de Einstein e da “Física judaica”, pudessem ser ensinados e empregados no campo da pesquisa. Em 1943, von Laue foi censurado por haver feito uma conferência na Suécia e mencionado a teoria da relatividade, sem acrescentar que os físicos alemães dela se “dissociavam expressamente”. Von Weizsäcker aconselhou o grande físico a responder que a teoria tinha, efetivamente, sido desenvolvida, de forma ampla, pelos arianos Lorentz e Poincaré, anteriormente a Einstein. Von Laue ignorou o conselho amigo e enviou um artigo abertamente desafiador a um periódico, ocupando-se da teoria: “Será essa a minha resposta”, escreveu ele a von Weizsäcker.

Por essa época, alterou-se a posição de Einstein diante de muitas questões morais e políticas. Embora nutrisse sentimentos pacifistas, instou os países europeus a se rearmarem. Em 1933, escreveu a um pacifista francês:

O que vou lhe dizer muito o surpreenderá. Até muito recentemente, nós, na Europa, estávamos em condição de supor que a oposição pessoal à guerra constituía efetiva luta contra o militarismo. Hoje, enfrentamos situação inteiramente diversa. No coração da Europa, há uma potência, a Alemanha, que se está valendo de todos os meios para chegar à guerra. Imagine-se a Bélgica ocupada pela Alemanha de nossos dias! Tudo seria muito pior do que em 1914 e, já naquele tempo, tudo foi mau. Digo-lhe, portanto, sinceramente: fosse eu belga e não me recusaria ao serviço militar, nas presentes circunstâncias; ao contrário, eu o prestaria alegremente, convencido de que estava concorrendo para salvar a civilização européia...

Não significa isso que eu esteja abandonando princípios que, até agora, defendi. Minha grande esperança é a de não estar longe o tempo em que recusar-se ao serviço militar se constituirá, de novo, em maneira eficaz de servir à causa do progresso humano.

Quanto mais se dava conta do anti-semitismo dos alemães, tanto mais Einstein se aproximava de seus compatriotas judeus. Retrato muito comovente de Einstein é o tirado em uma sinagoga de Berlim, no ano de 1930. Ali está ele, sentado — cético e livre-pensador que era e continuou a ser até o fim da vida — com o cabelo rebelde escapando do tradicional yamulke preto, segurando o violino, preparado para tocar em um concerto organizado para levantar fundos em benefício dos judeus. Em plano posterior, vê-se a congregação dos fiéis, cujo destino só pesarosamente se pode imaginar. A despeito de seus sentimentos fortemente antinacionalistas, Einstein, nos anos 20, começou a apoiar publicamente o sionismo, pois via, nesse movimento, uma trilha de sobrevivência e de esperança para os judeus da Europa. Após a morte de Chaim Weizmann, em 1952, Einstein recebeu convite para se tornar o segundo presidente de Israel.

Respondeu:

Sinto-me profundamente comovido com a oferta do Estado de Israel e, a um tempo, triste e envergonhado por não poder aceitá-la. Durante toda a vida, lidei com matérias objetivas e, assim, falta-me tanto aptidão natural quanto experiência para lidar adequadamente com pessoas e para desempenhar funções oficiais. Só por essas razões eu deixaria de ser indicado para

executar os deveres próprios dessa alta posição — ainda mesmo que a idade não me viesse crescentemente minando as forças. Muito me aborrecem essas circunstâncias porque a relação com o povo judeu se tornou o mais forte laço humano a que me sinto preso desde que me dei conta da situação precária em que nos encontramos em meio às nações.

xvi. Os dados de Deus

Até meados dos anos 1920, Einstein deu contribuições positivas fundamentais para o progresso da teoria quântica, embora, depois de 1925 — quando a teoria, aparentemente, conseguia decisivo avanço nas mãos de Heisenberg, Pauli, Born, Bohr, Dirac, Schroedinger e outros — ele se tenha voltado contra ela. Talvez que uma futura geração de físicos venha a reconhecer que as intuições de Einstein estavam corretas — mas isso, hoje, não parece provável.

A grande obra de Einstein durante os anos 20 diria respeito à mecânica estatística quântica dos gases, àquilo que atualmente chamamos, estatística Bose-Einstein. S. N. Bose, físico hindu, que tra balhava em Dacca, enviou a Einstein, em 1924, curto manuscrito em inglês; em junho desse ano o prestigioso *Zeitschrift für Physik* recebia uma comunicação invulgar: um trabalho intitulado “A lei de Planck e a hipótese dos quanta de luz”, assinado por Bose, mas apresentado por Einstein. Einstein se havia de tal modo impressionado com a leitura do manuscrito que o traduzira, ele próprio, para o alemão e o enviara à revista, no interesse de Bose.

Bose havia descoberto método de operar estatística quântica e o aplicara para obter uma nova derivação da fórmula de Planck referente à radiação. Einstein percebeu que os mesmos métodos poderiam ver-se aplicados aos gases comuns, mas que assim agir seria dar por implícito que a “partícula” componente desses gases se comportaria, estatisticamente, à semelhança de quanta de luz e, portanto, deveria ou poderia — desde que, ao tempo, não se contava com evidência experimental — exibir também características ondulatórias. Efetuava esses cálculos quando recebeu uma cópia da tese de de Broglie, onde — por outros motivos — o autor formulava a mesma conjectura e, nas palavras de Einstein, “levantava uma ponta do grande véu”.

Em 1925, Einstein depositava suficiente confiança no esquema, para sentir-se autorizado a escrever: “Um feixe de moléculas de gás que passe através de um orifício deve, portanto, sofrer difração análoga à de um raio de luz”. Que isso realmente acontece foi confirmado por C. J. Davisson e L. H. Germer e — independentemente — por G. P. Thomson, em célebres experimentos realizados em 1927. (Esses experimentos utilizaram elétrons, mas o princípio é o mesmo.) Significava isso que não somente a luz é esquizofrênica, apresentando aspectos de partícula e de onda, mas que são igualmente esquizofrênicas “partícu-

las” como o elétron. Em determinadas circunstâncias, os elétrons agem como “ondas”, isto é, feixes de elétrons podem interferir entre si, como interferem feixes de ondas de luz.

Em 1925, Erwin Schroedinger e Heisenberg realizaram a grande conquista teórica de que se originou a moderna mecânica quântica. De início, pareceu que cada qual deles houvesse chegado a uma nova teoria, de sorte que existissem duas teorias quânticas distintas. Contudo, Schroedinger logo demonstrou que as duas eram, matematicamente, equivalentes. Chegou ele à equação que descrevia o comportamento das ondas de de Broglie ou — como ele insistia em chamá-las — das “ondas de de Broglie-Einstein”. Registrou Schroedinger: “Minha teoria originou-se da tese de de Broglie e de breves, mas sagazes, observações de Einstein”. Einstein recebeu com entusiasmo o primeiro trabalho de Schroedinger e escreveu-lhe: “O plano de seu trabalho mostra verdadeiro gênio”.³⁷

Tanto Einstein como Schroedinger deixaram de aceitar a conquista seguinte, realizada por Born e seu colega Pascual Jordan. Referia-se esse trabalho ao que se supunha que as ondas representassem. A primeira interpretação, que remontava a de Broglie, era a de que, de alguma forma, as ondas orientavam a trajetória das partículas. Tratava-se de um quadro que se apoiava estreitamente em Física clássica. Born e Jordan sustentavam, porém, que ele pecava por incoerência e que a única interpretação possível de dar às ondas era a de que, a partir delas — a partir da fórmula matemática a elas emprestada pela equação de Schroedinger — só cabia calcular o comportamento provável das partículas e nada mais.

O ponto pode ser ilustrado graficamente pelos quanta de luz. Como vimos, se um raio de luz atravessa pequeno orifício, projeta-se, por causa dos efeitos de interferência, um padrão de difração sobre a tela que se haja colocado do outro lado do orifício. O mesmo experimento pode ser realizado fazendo-se com que os quanta de luz, cada um por sua vez, atravessem o orifício. Cada quantum de luz fará a travessia e atingirá um ponto da tela. Segundo a interpretação Born-Jordan, não se pode predizer o que ocorrerá com um particular quantum de luz, ao atingir ele o orifício. Só se pode enunciar o que é mais provável ocorrer — o que é determinado pela função ondulatória de Schroedinger.

Em verdade, segundo a teoria, o quantum de luz atingirá, mais provavelmente, o ponto da tela em que, de acordo com a concepção ondulatória, o padrão de difração é mais brilhante. Isso afasta a esquizofrenia onda-partícula, mas à custa de repelir uma descrição determinista dos even-

³⁷ Grande parte da correspondência entre Einstein e Schroedinger a propósito da teoria quântica foi republicada, em tradução, por Martin J. Klein, *Letters on Wave Mechanics* (Nova Iorque, 1967). Essa observação foi acrescentada em pós-escrito a uma carta que Einstein dirigiu a Schroedinger aos 16 de abril de 1926.

tos físicos. Determinismo estrito, no sentido a que os cientistas se haviam habituado, desde Newton até Einstein, tinha de ser abandonado, e isso Einstein e Schroedinger não puderam aceitar. Como disse Einstein repetidamente: “Deus não joga dados com o mundo.”

Os passos seguintes foram dados por Heisenberg e Bohr, no instituto de Bohr, em Copenhague, que Heisenberg visitava e onde se hospedava com frequência. A principal impulsionadora do trabalho era a idéia de que a dualidade onda-partícula não constituía um traço accidental da Física atômica, mas era um fator básico da natureza, que podia ser feito remontar a uma cuidadosa análise do significado de “medida” em escala atômica — o que Heisenberg expressava em termos de seu “princípio da incerteza”. O mais famoso exemplo elementar é o do “microscópio de Heisenberg”. Trata-se de um dispositivo imaginário, capaz de gerar quanta de luz de comprimento de onda tão curto que, em princípio, caberia usá-lo para tentar medir as posições dos elétrons nos átomos. Heisenberg sustentava que esses quanta deveriam ser portadores de tal energia que, após cada medida, o elétron seria expulso do átomo — a idéia de uma “órbita” de elétrons era absurda, pois que impossível de medir. Podia-se prever, usando a função de onda de Schroedinger, onde, no átomo, o elétron poderia ser encontrado com mais facilidade — mas só isso e nada mais. Bohr enxergou aí algo de maior profundidade: toda uma visão filosófica nova, que ele denominou “complementariedade” e que lhe pareceu esclarecedora das limitações que pesam sobre o uso dos conceitos, não somente em Física, mas ainda em toda a ciência e filosofia. (Um de seus exemplos favoritos era o do caráter aparentemente complementar da “justiça” e do “amor” na estrutura dos sistemas éticos e morais.)

Desde o início, Einstein repeliu o princípio da incerteza. Como escreveu a Schroedinger, em 1928: “A tranquilizadora filosofia — ou religião — de Heisenberg-Bohr é tão delicadamente concebida que, por algum tempo, proporciona ao verdadeiro crente um travesseiro agradável, que ele não abandona com facilidade. Deixemo-lo, pois, jazer ali”. Como se pode imaginar, Einstein não gostava de ver “os verdadeiros crentes” — entre os quais, depois de algum tempo, estava a maioria dos físicos — descansar nos travesseiros. Começou, quase de imediato, a apontar aparentes paradoxos da teoria, aos quais Bohr respondeu um a um, mesmo avós a morte de Einstein. Assinalam, com frequência, as pessoas que conheceram Bohr que era como se, a cada dia, ele recomeçasse a reexaminar, desde o princípio, todos os seus argumentos, em diálogos reais ou imaginários com Einstein, para ter a certeza de que nada havia escapado. Em 1948, Bohr escreveu magistral sumário das discussões mantidas com Einstein ao longo dos anos e concluiu, dizendo: “Fossem nossos encontros breves ou longos, sempre deixaram em meu espírito funda e duradoura impressão e, escrevendo este relato, continuo, por assim dizer, a discutir, todo o tempo, com Einstein, ainda quando me ocupo de tópicos aparen-

temente muito afastados dos especiais problemas por nós debatidos”. Bohr recordou uma das mais importantes dessas discussões, que teve por palco a Conferência Solvay, realizada em Bruxelas, em 1930. Para essa ocasião, Einstein havia concebido um notável dispositivo imaginário, envolvendo relógios e réguas — tal vez com base na experiência que tivera, examinando patentes em Berna — dispositivo que parecia violar o princípio da incerteza. Após uma noite em claro, Bohr notou que Einstein havia esquecido de levar em conta o efeito de sua própria descoberta, segundo a qual os relógios trabalham mais lentamente quando expostos a um campo gravitacional, mantendo-se ileso o princípio da incerteza.

Todos os princípios envolvidos nesse debate — que se prolongou por quase três décadas — permaneceram intocados até o fim. (Ehrenfest, que conheceu bem os dois homens e testemunhou muitas das discussões, sentia-se atormentado por conflito íntimo, incapaz de decidir com quem estava a razão e isso, concorda-se geralmente, foi um dos motivos que o levaram ao suicídio, em 1933.) Max Born sintetizou a posição de muitos físicos, ao escrever a respeito de Einstein, em 1948: “Ele viu, mais claramente que qualquer predecessor, o fundo estatístico das leis físicas e foi um pioneiro na luta pela conquista da indevassada região dos fenômenos quânticos. Não obstante, quando, mais tarde, a partir de sua própria obra, emergiu uma síntese dos princípios estatísticos e quânticos, que pareceu aceitável a quase todos os físicos, ele se manteve afastado e cético. Muitos de nós vemos isso como uma tragédia — para ele, pois tateia seu caminho no isolamento, e para nós, pois que perdemos o orientador e porta-bandeira”. Pouco antes de ter escrito esse trecho, Born havia recebido uma carta em que Einstein dizia: “Tornamo-nos antípodas em nossa visão da ciência. Você acredita em um Deus que joga dados, e eu, em leis perfeitas no mundo das coisas que existem como objetos reais, leis que procuro apreender de maneira furiosamente especulativa”.

xvii. O urânio e a rainha dos belgas

Em 1932, Einstein não mais estava seguro na Alemanha — pode, inclusive, ter sido o alvo de uma incursão nazista — e, em 1933, havia-se estabelecido em Princeton. Ali, durante os vinte e dois anos seguintes, ele passou os invernos trabalhando — em geral, sozinho e, às vezes, auxiliado por jovens assistentes — na tentativa de elaborar uma teoria de campo unificado; e passava os verões trabalhando, tocando música de câmara com os vizinhos e velejando em lugares como Peconic, onde havia alugado uma casa de temporada. No verão, recebia alguns visitantes e, entre estes, esteve, em 1937, C. P. Snow, que registrou vívida impressão do encontro:

De perto, a cabeça de Einstein era como eu a havia imaginado: esplêndida, com o grande toque humanizador do comediante. Fronte ampla, coberta de sulcos; auréola de cabelos

brancos; olhos cor de chocolate, imensos e salientes. Não sei dizer o que poderia ter esperado de tal rosto, se já não soubesse o que esperar. Um suíço arguto disse, certa vez, que ele tinha o brilho da face de um bom artesão, que Einstein lembrava o velho relojoeiro de uma cidadezinha, dado, talvez, a caçar borboletas aos domingos.

O que me surpreendeu foi o seu físico. Voltava do bote e só estava usando um calção. Era um corpo sólido, musculoso; começava a engordar à altura do diafragma e na parte superior dos braços, á semelhança de um esportista de meia-idade, mas era um homem invulgarmente forte. Cordial, simples, comunicativo.

Dois anos depois, em meados de julho de 1939, os físicos Leo Szilard e Eugene Wigner fizeram uma visita a Einstein em Nassau Point, nas vizinhanças de Peconic, visita que, talvez simplificando em demasia, diremos ter desencadeado os acontecimentos que levaram ao início da era atômica. Tanto se tem escrito a respeito do assunto e Einstein nele se tem visto envolvido para além do razoável que talvez convenha tentar esclarecer o ocorrido.

Como é sabido, em 1938, Otto Hahn e Fran Strassmann e a física austríaca Lise Meitner do Kaiser Wilhelm Gesellschaft, em Berlim, “descobriram” a fissão nuclear. Em verdade, a fissão tinha sido conseguida, já em 1934, por Fermi, na Itália, e por Irene e Frederic Joliot-Curie, na França, mas a realização só foi corretamente interpretada em 1938, por Lise Meitner e seu sobrinho, Otto Frisch, que, antes de quaisquer outros, se deram conta de que os experimentos de Hahn e Strassmann significavam que se havia conseguido romper o núcleo atômico. Lise Meitner havia fugido para a Suécia — era judia — e só através de correspondência com Hahn soube do resultado dos experimentos em que estivera trabalhando com ele e Strassmann. Hahn surpreendeu-se diante do fato de que, bombardeando o urânio com nêutrons lentos, surgiam núcleos de bário. De onde teria surgido o bário? Lise Meitner e Frisch logo imaginaram que deveria ter acontecido de os núcleos de urânio se haverem rompido durante o processo, isto é, os núcleos deveriam ter-se “fissionado” — palavra por eles inventada para descrever o ocorrido. Notícia da descoberta foi logo transmitida a Bohr, em Copenhague, onde Frisch estava trabalhando. Em janeiro de 1939, físicos norte-americanos foram cientificados da fissão, depois de Bohr haver com eles discutido o assunto, em uma reunião científica realizada em Washington; pouco depois, vários deles obtinham a confirmação em seus próprios laboratórios. Einstein não tinha relação alguma com a questão e, em verdade, se havia mostrado cético quanto à utilidade prática da energia nuclear. Segundo consta, uns poucos anos antes, ele teria dito que tentativa em tal sentido se assemelhava, a seu ver, à

de “matar pássaros no escuro, em uma região em que os pássaros são poucos”. O que preocupava Szilard e Wigner era saberem que, se a Alemanha pretendesse construir uma bomba, iria necessitar de grande quantidade de urânio — e depois de Hitler haver-se apossado da Checoslováquia, na primavera de 1939, um de seus primeiros atos foi o de proibir exportação do urânio das minas checas: segura indicação de que os alemães lhe reconheciam a importância. Szilard sabia que Einstein mantivera estreita amizade com a família real belga e que escrevia, periodicamente, à rainha Elizabeth. O que pretendiam, ele e Wigner, era informar Einstein acerca da situação do urânio, a fim de que escrevesse à rainha — pois a Bélgica exercia controle sobre os importantíssimos depósitos de urânio do Congo Belga — no sentido de impedir que esses depósitos caíssem em mãos dos alemães e de manter aberta uma rota de suprimento para os Estados Unidos da América. Esse foi o assunto da conversa de julho, quando se decidiu que Einstein escreveria uma carta que, depois de liberada pelo Departamento de Estado, seria enviada à rainha.

Por esse tempo, Szilard estava preocupado porque os recursos financeiros de que dispunha o Departamento de Física da Universidade de Colúmbia — onde ele e Fermi trabalhavam — não eram suficientes para custear a pesquisa que vinham fazendo a respeito de fissão. Szilard recebeu a sugestão de pôr-se em contacto com Alexander Sachs, banqueiro e economista, que era conselheiro de Roosevelt, com o objetivo de, eventualmente, obter ajuda federal para o prosseguimento da pesquisa. Foi Sachs, aparentemente, quem primeiro se apercebeu da magnitude do problema e mostrou a conveniência de submetê-lo à atenção pessoal de Roosevelt. Pouco depois, Szilard e Edward Teller, então professor visitante em Colúmbia, voltaram a Long Island, onde Einstein ditava o primeiro esboço, em alemão, da carta que dirigiria a Roosevelt. Aos 2 de agosto, duas semanas após a primeira visita, Szilard havia preparado uma tradução inglesa modificada, que foi aprovada e assinada por Einstein e dada a Sachs, para ser entregue a Roosevelt. A versão final dizia:

Senhor Presidente

Trabalho recente, realizado por E. Fermi e L. Szilard e a mim dado a conhecer em manuscrito, leva-me a esperar que, em futuro imediato, o elemento urânio possa ser transformado em nova e importante fonte de energia. Certos aspectos da situação parecem exigir atenção e, se necessário, ação rápida por parte da Administração. Creio, portanto, ser meu dever pedir-lhe que atente para os seguintes fatos e recomendações.

Nos últimos quatro meses, fez-se provável — em razão dos trabalhos de Joliot, na França, e de Fermi e Szilard, nos Estados Unidos — que venha a ser possível provocar reações nucleares em cadeia, atingindo vasta massa de urânio, com o que

seriam geradas grande quantidade de energia e grande quantidade de elementos semelhantes ao rádio. É quase certo que isso possa ser feito em futuro imediato.

Esse novo fenômeno levaria á construção de bombas e é concebível — embora muito menos certo — que poderia surgir um novo tipo de bombas extremamente poderosas. Uma única dessas bombas, transportada por barco ou feita explodir em um porto, destruiria todo o porto e locais vizinhos. Não obstante, é possível que tais bombas venham a ser muito pesadas para admitirem transporte por ar.

Os Estados Unidos da América só dispõem de minérios de urânio pobres e em quantidades reduzidas. Há bom minério no Canadá e na antiga Checoslováquia, porém a mais importante fonte de urânio é o Congo Belga.

Tendo em vista a situação, talvez seja desejável haver contacto permanente entre a Administração e o grupo de físicos que, no país, vem estudando as reações em cadeia. Meio possível de alcançar esse desiderato seria a indicação, para essa tarefa, de pessoa que goze de sua confiança e que, talvez, não devesse atuar em caráter oficial. As obrigações seriam as seguintes:

1. Estabelecer contacto com os Departamentos, mantendo-os informados de desenvolvimentos registrados e recomendar ação governamental, dando particular atenção ao problema de assegurar suprimento de minério de urânio para os Estados Unidos da América.

2. Apressar os trabalhos experimentais que atualmente vêm sendo feitos dentro dos limites de recursos dos laboratórios da Universidade, assegurando, se isso for necessário, fundos mais amplos, através de contactos com particulares que se mostrem dispostos a contribuir para a causa e, talvez, recorrendo também a laboratórios industriais que dispõem do equipamento necessário.

Entendo que a Alemanha suspendeu a venda do urânio das minas de que se apossou na Checoslováquia. Ter ela assim agido talvez se ligue ao fato de o filho do Subsecretário de Estado da Alemanha, von Weizsäcker, atuar junto ao Kaiser Wilhelm Institut, em Berlim, onde alguns dos trabalhos norte-americanos a respeito do urânio vêm sendo agora repetidos.

Muito atentiosamente,

A. EINSTEIN.

Só no dia 11 de outubro teve Sachs, finalmente, ocasião de entregar a Roosevelt a carta de Einstein e alguns outros documentos encaminhados por Szilard. No dia 19 de outubro, Roosevelt enviou a Einstein uma breve nota, dizendo que “julguei os dados de tal importância que reuni uma comissão, formada pelo diretor do Bureau of Standards e por um representante do Exército e da Marinha, a fim de examinar aprofundadamente as possibilidades brotadas de sua sugestão relativa ao elemento urânio”. Logo depois, foi constituído o Advisory Committee on Uranium e o resto é conhecido. Einstein teve contacto não-formal com esse comitê, do qual não era membro; esse contacto cessou em abril de 1940, quando Einstein deixou de prestar-lhe colaboração ativa. Por essa época, o trabalho se havia ampliado e assumido nova feição e Einstein, ao que consta, não teve mais relação direta com o projeto da bomba atômica. (Durante a guerra, Einstein atuou como consultor da Marinha, mas essa função nada tinha a ver com bombas atômicas, de vez que a Marinha não participou das pesquisas.) É de admitir que Einstein não poderia ter sido muito útil a um projeto como o de Los Alamos, pois o trabalho se relacionava principalmente com engenharia nuclear e Física nuclear, campos em que não era especializado. Talvez tenha imaginado ou sabido do que se passava, mas nunca foi consultado sobre o projeto de Los Alamos.

A primeira utilização efetiva da bomba atômica, no Japão, foi uma surpresa para Einstein e encheu-o de angústia. Ao ouvir as notícias de Hiroshima, disse simplesmente “Oh, weh!” — “Que des graça!” Desse momento até o fim da vida, ele devotou seu tempo e seu prestígio — através de cartas, mensagens, artigos e entrevistas — à causa de evitar que a humanidade se autodestrua em holocausto nuclear. Lendo esses documentos, mesmo os que remontam a 1945, surpreende-nos ver como são contundentes, lúcidos e “de enorme visão”. Einstein não era, de maneira nenhuma, o confuso idealista que algumas vezes aparentou ser. Reconhecia claramente que o único segredo verdadeiro tinha-se revelado em Hiroshima, quando se provou que a bomba atômica podia ser construída, sendo apenas uma questão de tempo o vir ela a ser construída por outros. Sua idéia básica era a de utilizar a vantagem temporária e o horror que a bomba havia causado à humanidade, para impor alguma espécie de ordem mundial significativa. Escreveu ele, em 1945: “Como não me parece que a bomba atômica venha a ser uma dádiva em futuro próximo, devo dizer, hoje, que ela é uma ameaça. Talvez convenha ser assim. Talvez a raça humana se intimide e leve aos negócios internacionais uma ordem que, sem a pressão do medo, indubitavelmente não se estabeleceria”. Einstein se ressentia profundamente com a idéia de que, de alguma forma, era o “pai” ou o “avô” da bomba atômica e repetiu várias vezes que, se não fosse a ameaça representada pela Alemanha, ele nada teria feito para apressar o processo que levou à criação dessa bomba.

Ao fim da vida, Einstein adoecia com freqüência e, diante da ascen-

são das forças que, nos Estados da América, levaram ao “mccarthysmo”, sentiu-se cada vez mais distante da política e da sociedade norte-americanas. Em 1951, escreveu, como tantas outras vezes, à rainha-mãe da Bélgica, uma das poucas pessoas a quem ele expressava seus sentimentos mais íntimos:

Prezada Rainha

Sua saudação calorosa me deu enorme prazer e reavivou lembranças felizes. Cheios de amargos desapontamentos, dezoito ásperos anos se passaram. Todo conforto e alegria vieram daquelas poucas pessoas que permaneceram corajosas e coerentes. Devido a essas poucas pessoas é que não nos sentimos totalmente estranhos neste mundo.

A senhora é uma delas.

Embora tenha sido possível, afinal e a enorme custo, derrotar os alemães, os caros norte-americanos passaram a ocupar o lugar deles. Quem os trará de volta ao bom senso? Repete-se a calamidade alemã de uns poucos anos atrás: as pessoas aqui escem sem resistir e se alinham com as forças do mal. E olhamos impotentes.

Conquanto muito me agradasse, provavelmente não reveerei Bruxelas. Por causa de um especial tipo de popularidade que adquirir, qualquer coisa que eu faça pode transformar-se em ridícula comédia. Quer isso dizer que devo permanecer próximo de minha casa e nunca sair de Princeton.

Abandonei o violino. Com o passar dos anos, tornava-se cada vez mais insuportável ouvir o que eu próprio tocava. Espero que não lhe tenha acontecido o mesmo. O que permaneceu foi a disposição de enfrentar difíceis problemas científicos. A fascinante magia desse trabalho continuará a empolgar-me até meu último suspiro.

Com os melhores votos,

A. EINSTEIN.

Einstein morreu no dia 18 de abril de 1955. Poucos meses antes da morte, havia escrito a um amigo:

Não obstante, a alguém curvado pela idade, a morte vem como um alívio; sinto isso profundamente, agora que envelheci e passei a olhar a morte como uma dívida antiga que é preciso, afinal, saldar. Contudo, instintivamente, faz-se quanto é possível para delongar esse acontecimento. Tal é o jogo que a natureza joga conosco. Podemos achar graça por assim ser, mas não conseguimos libertar-nos do instinto a que todos estamos presos.

Tivesse Einstein vivido alguns anos mais e talvez visse com prazer o renovado interesse que a atual geração de físicos e astrônomos devota à relatividade geral e à gravitação. Nenhum outro campo da ciência oferece algo tão excitante e misterioso como o que é desvelado pelas descobertas da nova astrofísica. Há os pulsars, que a maioria dos astrônomos julga constituir matéria tão afetada pela gravitação que só permanece a parte rica em nêutrons, formando uma estrela densamente compacta, de uns poucos quilômetros de diâmetro. Os “buracos negros”, , campos gravitacionais provocados por estrelas que sucumbem e que são tão poderosos que nenhuma luz consegue deles escapar, estão entre as mais atraentes e importantes especulações astrofísicas baseadas na teoria da relatividade e ainda não diretamente confirmadas. E há os misteriosos sinais, talvez originários da radiação gravitacional de estrelas que desaparecem. A existência deles também foi prevista pela teoria da relatividade, mas nenhum dos fenômenos referidos havia sido observado antes da morte de Einstein. A maioria dos físicos acredita agora — uma vez mais — que a gravitação pode proporcionar-nos maior proximidade dos segredos do Velho, pondo-se em união com a teoria quântica de uma forma que não foi, até o momento, visualizada. Einstein absorveu-se, de fato, na “fascinante magia” de seu trabalho, até o “último suspiro”. Ao lado de sua cama de hospital, na noite em que morreu, ficaram as páginas em que fazia um inacabado cálculo relativo à teoria do campo unificado. Sua intenção era a de continuar o trabalho na manhã seguinte.

Principais obras de Einstein

Einstein on Peace, orgs., Otto Nathan e Heinz Norden, Nova Iorque: Schocken Books, 1960.

Essays in Science. Nova Iorque: Philosophical Library, 1934.

Investigations on the Theory of the Brownian Movement, org. R. Fürth. Nova Iorque: Dover, 1956.

Letters on Wave Mechanics with Erwin Schroedinger, Max Planck e H. A. Lorentz, org. K. Przibrann, trad. para o inglês por M. J. Klein. Nova Iorque: Philosophical Library, 1967.

Out of My Later Years. Nova Iorque: Philosophical Library, 1950. *Relativity*. Nova Iorque: Crown, 1961. Não existe melhor introdução à teoria; o livro mereceu dezesseis reedições desde que foi pela primeira vez publicado, em 1916. Logo depois de escrevê-lo, Einstein disse a Philipp Frank que estava convencido de o livro ser tão simples a ponto de qualquer estudante secundário, como sua enteada, poder entendê-lo. Quando Einstein se afastou da sala, o Professor Frank perguntou à senhorita Einstein se essa declaração correspondia à verdade. Respondeu ela que havia entendido tudo, exceto a significação de “sistema de referência” — que, escusa de dizer, é a idéia técnica central.

The Meaning of Relativity, com artigos de H. A. Lorentz, H. Weyl, H. Minkowski. Nova Iorque: Dover, 1952. A maior parte dos trabalhos importantes de Einstein acerca da relatividade está colecionada nesse livro, em tradução inglesa.

A versão original do artigo de Einstein, publicado em 1905, nos *Annalen der Physik* não é possível encontrar. Muitas bibliotecas de Física têm os *Annalen* desde 1905, mas verifica-se que o “volume de Einstein” — o nº 17 — falta misteriosamente. Em consequência, a maioria dos leitores do trabalho o conhece através de traduções, em geral feitas por físicos. É fácil admitir que as notas de pé de página que figuram nessas traduções foram inseridas por Einstein, quando, em verdade, não o foram. Uma tradução comumente usada é, por exemplo, a que figura neste livro. Nela, as notas de pé de página foram acrescentadas pelo grande físico alemão Arnold Sommerfeld, que estabeleceu relações com a literatura da época, literatura que Einstein não podia conhecer em 1905. Sou grato ao Professor G. Holton e A. Miller por me haverem advertido acerca desse ponto e por separarem das demais as pouquíssimas notas de pé de página redigidas pelo próprio Einstein.

On the Method of Theoretical Physics. Conferência Herbert Spencer, pronunciada no dia 10 de junho de 1933. Oxford: Oxford University Press, 1933.