

res de estrelas, abrigando cerca de três trilhões de estrelas, e adornada por um jato de plasma azul-branco expelido de seu núcleo com a velocidade de um raio.

Além de Virgo estão os aglomerados de Perseu, Coma e Hércules, e além deles, tantos outros aglomerados e superaglomerados de galáxias que seriam necessários volumes apenas para catalogá-los. Há estrutura até mesmo nessas escalas enormes; os superaglomerados parecem organizados em gigantescos domínios que se assemelham às células de uma esponja. Mais além disso, a luz das galáxias extremamente distantes, percorrendo os contornos do espaço curvo, torna-se tão fragmentada quanto o reflexo da Lua num lago sobre o qual sopra uma brisa leve. Lá, à espera de algum futuro Hubble ou Herschel, estão muitas histórias de coisas passadas, ou que se estão passando, ou que virão a passar.

NOTAS

1. In Smith, Robert, 1982, p. 4.
2. *Popular Astronomy*, vol. 34, 1926, p. 379, citando um artigo de jornal de Boston, in Warner, 1968, p. 10.
3. In MacPherson, 1933, p. 161.
4. In Owen Gingerich, "Unlocking the Chemical Secrets of the Cosmos", *Sky and Telescope* jul. 1981, p. 13.
5. In Abeti, 1952, p. 192.
6. William Huggins e Lady Huggins, *The Scientific Papers of Sir William Huggins* (Londres, Wesley & Son, 1909), p. 106, in Smith, 1982, pp. 2-3.
7. In Smith, 1982, p. 43.
8. In Lang e Gingerich, 1979, p. 523.
9. *Ibid.*
10. *Ibid.*, p. 525.
11. Shapley, carta a Russell, 31 de março de 1920, in Smith, 1982, p. 66.
12. Edwin Hubble, "Cepheids in Spiral Nebulae", *Publications of the American Astronomical Society*, vol. 5, 1925, pp. 261-264.
13. In Smith, 1982, p. 114.
14. Shapley a Hubble, 27 de fevereiro de 1924, in Smith, 1982, p. 119.
15. In Dick, 1984, p. 147.
16. Edwin Hubble, "NGC6822, A Remote Stellar System", *Astrophysical Journal*, vol. 62, p. 432.

10

O CÉU DE EINSTEIN

Eu quero saber como Deus criou este mundo. Não estou interessado neste ou naquele fenômeno, no espectro deste ou daquele elemento. Quero conhecer os pensamentos Dele, o resto são detalhes.

Einstein

Uma vez reconhecida a validade deste modo de pensar, os resultados finais parecem quase simples; qualquer aluno inteligente pode compreendê-los sem muito esforço. Mas os anos de pesquisa no escuro em busca de uma verdade que se sente, mas não podemos expressar; o intenso desejo e as alterações de confiança e dúvida, até que chegemos à claridade e ao entendimento, só são conhecidos daquele que os experimentou.

Einstein

De uma maneira muito semelhante à forma pela qual a explicação dada por Newton à gravitação e à inércia fez avançar a física até o ponto em que ela podia abranger uma Terra móvel num sistema solar heliocêntrico, a relatividade de Einstein permitiu à física ocupar-se de velocidades muito maiores, de distâncias maiores e de energias mais furiosas, encontradas no universo mais amplo das galáxias. Se o domínio de Newton foi o das estrelas e planetas, o de Einstein estendeu-se dos centros das estrelas para a geometria do cosmos como um todo.

Para provocar uma expansão tão grande do âmbito da ciência, Einstein foi obrigado a abandonar as concepções de espaço e tempo de Newton. Espaço e tempo newtonianos eram inflexíveis e inalteráveis; formavam uma moldura dentro da qual todos os acontecimentos tinham lugar e em relação à qual tudo podia ser medido sem ambigüidades. "O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com coisa alguma externa, permanece sempre igual e inalterável", escreveu Newton. "... O tempo matemático, absoluto, verdadeiro, por

si mesmo e pela sua própria natureza flui igualmente, sem relação com qualquer coisa externa.”¹ Einstein decretou que tal suposição era ao mesmo tempo supérflua e errônea. A teoria especial da relatividade revelou que o ritmo no qual o tempo flui e a extensão das distâncias medidas através do espaço variam, dependendo das velocidades relativas daqueles que os medem. A teoria geral da relatividade descreveu o espaço como sendo curvo, e deduziu da curvatura espacial os fenômenos que a dinâmica newtoniana tinha atribuído à força da gravidade.

Einstein cresceu numa época em que a concepção clássica do espaço, se não do tempo, já estava sendo modificada. Para explicar como o espaço “absoluto” podia ter qualquer realidade — e, o que era mais pertinente, como a luz e a força da gravidade podiam ser transmitidas através do espaço vazio que se para estrelas e planetas — Newton e seus seguidores tinham postulado que o espaço está impregnado de uma substância invisível, um *éter*. A palavra foi tomada de Aristóteles, que a usou para o elemento celeste de que estrelas e planetas eram feitos, e como o *éter* antigo, o novo, atualizado, era uma matéria maravilhosamente transparente e livre de atrito, estático e imutável, não só permitia o movimento desimpedido dos planetas e estrelas, como também penetrava levemente por eles — como uma brisa através de um bosque, segundo as palavras do físico inglês Thomas Young.*

A sedutora idéia de que o espaço está impregnado de um *éter* começou a enfrentar problemas quando se tornou possível tomar medidas precisas da velocidade da luz. A luz se transmite a uma velocidade finita, fato que já tinha sido compreendido desde a década de 1670, quando o astrônomo dinamarquês Olaus Romer detectou variações periódicas no tempo em que Io, a mais interior das quatro brilhantes luas de Júpiter, entrava em eclipse: os eclipses ocorriam antes do que se esperava quando Júpiter estava relativamente perto da Terra, e depois, quando Júpiter estava mais distante. Romer compreendeu que a discrepância devia ser causada pelo tempo necessário para que a luz percorresse a distância mutável de Júpiter até a Terra. Partindo do que era então conhecido como a distância absoluta de Júpiter, ele pôde calcular a velocidade da luz com uma aproximação de cerca de 30% do valor exato (que é de 300.000km/s).

Galileu tentou certa vez determinar a velocidade da luz. Colocou dois homens com lanternas fechadas no alto de um morro a uma distância de cerca de 1,5km e depois mediu o intervalo decorrido entre o momento em que o primeiro homem abria o obturador de sua lanterna, e o segundo, respondendo a um sinal seu, abria o obturador da segunda lanterna, mandando um feixe de luz de volta ao primeiro. A descoberta de Romer deixou clara a razão pela qual Galileu falhou: o intervalo que tentou medir (sem um cronômetro) era inferior a cem milionésimos de um segundo.

O resultado de Romer também mostrava uma maneira de medir a velocidade da Terra em relação ao espaço absoluto. Se a luz se propagava por um *éter*

* Se, em lugar disso, a Terra arrastasse o *éter* junto com ela, como um navio que recolhe coisas da água à medida que atravessa o mar dos Sargãos, então a aberração da luz estelar que Bradley tinha observado (o efeito de mover-se através da luz estelar como uma mulher correndo na chuva) não ocorreria.

estacionário, o movimento absoluto da Terra em relação a esse *éter* podia ser detectado medindo-se as variações na velocidade observada da luz. Imaginemos que a Terra fosse um barco a vela num lago de *éter*, e pensemos na luz vinda de duas estrelas em lados opostos do céu como ondas partindo de duas pedras lançadas no lago, uma à frente do barco, outra atrás dele. Se estivéssemos no convés e medíssemos a velocidade de cada uma dessas ondas, veríamos que as provenientes da pedra lançada à frente pareceriam mais rápidas do que as vindas por trás. Medindo a diferença nas velocidades observadas das ondas vindas de frente e de trás, poderíamos calcular a velocidade do barco. Da mesma forma, supunha-se que a velocidade do movimento da Terra poderia ser determinada observando-se as diferenças na velocidade das ondas de luz que se propagavam através do *éter* estacionário, vindas das estrelas à frente e atrás.*

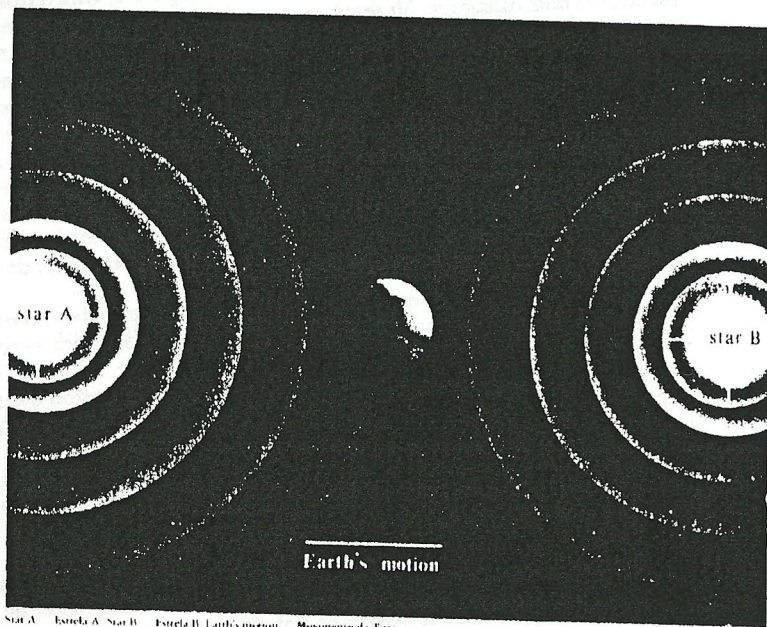
Medir esse “movimento do *éter*” — como foi chamado, embora o que devesse estar se movendo não fosse o *éter*, mas a Terra — seria um problema delicado, é claro, já que a velocidade da Terra equivale a apenas uma fração minúscula da velocidade da luz. Mas na segunda metade do século XIX a tecnologia já tinha avançado a um grau de precisão suficiente para tornar possível essa tarefa. A experiência crítica foi realizada na década de 1880 pelo físico Albert Michelson (que dedicou sua carreira ao estudo da luz, disse, “por ser tão divertido”) e o químico Edward Morley.

A aparelhagem Michelson-Morley, instalada num laboratório no porão da Western Reserve University, em Cleveland, Ohio, baseava-se no princípio da interferometria. Um feixe de luz era dividido e os dois raios disso resultantes eram refletidos em ângulos retos, depois recombinados e postos em foco numa ocular. A idéia era que o movimento da Terra através do *éter* estacionário se evidenciaria como uma modificação no padrão de interferência produzido quando um dos raios de luz, o que teve de viajar no vento *éter*, se atrasasse em relação ao outro. Como Michelson explicou o princípio à sua filha, a jovem Dorothy: “Dois raios de luz disputam entre si uma corrida, como dois nadadores, um deles lutando contra a correnteza, enquanto o outro, cobrindo a mesma distância, atravessava a correnteza em ângulo reto. O segundo nadador sempre ganhará, se *houver alguma correnteza no rio*.”³ Como sabemos que a Terra se move, teria de haver *alguma* correnteza — desde que, como Michelson e a maioria dos outros físicos acreditava, existisse algo como o *éter*, que delineava o ponto de referência do espaço absoluto newtoniano.

Para minimizar as vibrações exteriores, o interferômetro flutuava no mercúrio. Para modificar sua orientação em relação ao movimento da Terra, ele girava nesse banho de mercúrio. Michelson passou dias olhando pela ocular do interferômetro, que se movimentava lentamente, buscando a modificação reveladora nos padrões de interferência que mostrasse o movimento da Terra pelo *éter*. Para sua grande decepção, não viu nenhuma modificação. A conclusão era tão inevitável quanto desagradável a Michelson: não havia nenhum “movimento do *éter*” detectável.

A princípio, poucos teóricos estavam preparados para abandonar a hipótese do *éter*, e vários tentaram conciliá-la com o resultado nulo da experiência

* Adotei esta metáfora a partir de outra, empregada pelo colega de Einstein, Banesh Hoffmann.²



Star A Estrela A Star B Estrela B Earth's motion Movimento da Terra.

A teoria do éter sustentava que se a velocidade da luz era constante em relação a um éter estacionário, que existia por toda parte, então quando a Terra em sua órbita afastava-se da estrela A e em direção à estrela B, a velocidade observada da luz vinda da estrela B seria superior à velocidade da luz vinda da estrela A.

Michelson-Morley. Seus esforços deram origem à estranha idéia de que a aparelhagem experimental — e, na verdade toda a Terra — se contraía na direção do seu movimento, na medida exata para cancelar os efeitos de sua velocidade através do éter. “A única solução que posso ver”, disse o físico irlandês George FitzGerald “é que a igualdade das trilhas [da luz] deve ser inexata.”⁴ Em outras palavras, os dois feixes de luz pareciam ser de igual extensão, porque seu comprimento era deformado pelo próprio movimento da Terra que pretendiam detectar. Como disse FitzGerald: “O bloco de pedra [que servia de base à aparelhagem] deve ser deformado, modificado pelo seu movimento ... a pedra teria de encolher na direção do movimento, e aumentar nas duas outras direções.”⁵ O físico holandês Hendrik Antoon Lorentz chegou, independentemente, à mesma hipótese, e desenvolveu-a com detalhes matemáticos.

Esse fenômeno, a “contração de Lorentz”, iria aparecer, em diferentes formas, como o elemento-chave na teoria especial da relatividade. O físico francês Henri Poincaré, um dos poucos cientistas importantes a levar a sério a contração de Lorentz, aproximou-se de sua formulação em termos que eram matematicamente equivalentes à teoria de Einstein. Poincaré falou, intuitivamente, de um

“princípio de relatividade” segundo o qual nenhum objeto podia exceder a velocidade da luz.⁶ A maioria dos pesquisadores, porém, achou estranho, a ponto de desesperar-se com isso, que a velocidade da Terra faça com que todo o planeta se contraia como uma laranja espremida nas mãos de um gigante, e o próprio Lorentz abandonou logo a idéia. “Creio que ele deve ter sentido medo”, especulou anos depois o físico Paul Dirac. “... Não creio que se possam ter grandes esperanças sem que estas se misturem com grandes receios.”⁷

Einstein entra em cena. Ele nasceu em 1879 em Ulm, onde Kepler andara certa vez em busca de um tipógrafo, com o manuscrito das Tábuas Rodolfianas debaixo do braço. Menino de vontade forte, mas sonhador, Einstein só falou aos três anos, tendo conservado para sempre um pouco da intensa introspecção do menino calado. Antiautoritário por intuição, rebelou-se contra a disciplina exterior, hábito que irritou muitos de seus professores. (Anos depois, ele diria, ironizando, que “para castigar-me pelo desprezo pela autoridade, o destino fez de mim uma autoridade”).⁸

Aos 16 anos Einstein escapou das limitações do Ginásio Luitpold, em Munique — onde seu professor de grego lhe disse: “Você nunca será nada”, ganhando com isso, involuntariamente, um lugar na história — ao convencer um médico a dar-lhe um certificado de que o regime da escola o estava levando à beira de um esgotamento nervoso.⁹ Fracassou no exame vestibular para a universidade, passou um ano numa escola preparatória e formou-se pelo Instituto Politécnico Federal em Zurique, em 1900, com notas boas, mas não excepcionais, tendo habitualmente faltado às aulas para tocar violino, passar o tempo nos cafés e passear no lago Zurique num bote alugado, com sua noiva, Mileva Maric, a única aluna da Politécnica.

Não conseguindo um emprego como cientista, e nem mesmo como professor secundário, Einstein anunciou-se como professor de matemática e física, acrescentando: “Aulas experimentais gratuitas.”¹⁰ Os poucos alunos que o procuraram viram nele um professor estranho, alegre e brilhante, mas inclinado a desviar-se por misteriosas avenidas de inspiração, com uma rapidez que os deixava para trás. Einstein acabou encontrando um lugar de “perito técnico, terceira classe” no departamento suíço de patentes, em Berna. Casou-se com Mileva em 1903 e tiveram um filho em 1904, o primeiro de dois. (Sua primeira filha nasceu antes do casamento e acredita-se que tenha morrido pequena, talvez de escarlatina; não existem cartas entre Einstein e Mileva sobre isso.) Suas esperanças de conseguir um aumento para manter melhor a família foram alcançadas quando, em 1906, foi promovido a perito técnico de segunda classe.

Com seu topete de cabelo negro, seu olhar claro e penetrante, e sua dedicação à literatura, música e filosofia, Einstein assemelhava-se, naquela época, tanto a um poeta como a um cientista. Também não era particularmente bem informado sobre o progresso da física. Seus esforços para acompanhar o desenvolvimento da literatura científica foram prejudicados pelo fato de que a biblioteca técnica geralmente estava fechada quando ele saía do trabalho. Seus escritos técnicos, embora ocasionalmente interessantes, limitavam-se em geral ao tipo de especulações sobre o infinito e a entropia que podem ser encontradas nos cadernos de milhares de estudantes de pós-graduação.

Einstein era indiferente às convenções, tinha o riso fácil e era inimigo natural das pompas e cerimônias. Quando um amigo o convenceu a comparecer

às festividades, na universidade em Genebra, do 350º aniversário de sua fundação por Calvino, ele caminhou entre os professores togados, na procissão acadêmica, usando um velho chapéu de palha e um terno amassado, não dispondo de vestimentas mais adequadas; e mais tarde recordou que no banquete que se seguiu "disse a um patricio genebrino sentado ao meu lado: 'Sabe o que Calvino teria feito se ainda estivesse aqui?... Teria mandado queimar-nos pelo pecado da gula.' O homem não disse mais nenhuma palavra".¹¹ Era, em suma, um boêmio e um rebelde, um jovem muito vivo, mas ninguém imaginaria que viria a distinguir-se na ciência.

Não obstante, em 1905 os pensamentos de Einstein começaram a cristalizar-se, e só naquele ano escreveu quatro trabalhos que marcaram época e transformaram a paisagem científica. O primeiro, publicado três dias após seu 26º aniversário, contribuía para lançar as bases da física quântica. Outro modificaria o curso da teoria atômica e da mecânica estatística. Os outros dois anunciavam o que se tornaria conhecido como teoria especial da relatividade. Quando Max Planck, diretor editorial dos *Anais de Física* alemães, levantou os olhos ao terminar a leitura do primeiro trabalho sobre relatividade, sabia imediatamente que o mundo estava mudado. A era de Newton terminava, e uma nova ciência surgia para substituí-la.

Visto retrospectivamente, tudo isso é claro, e indicações do gênio científico podem ser percebidas nas atividades do jovem Einstein. Foi uma criança tranquilamente religiosa, que aos 11 anos compunha pequenos hinos em louvor a Deus, que cantava a caminho da escola. Aos 12, porém, como se recordou muitos anos depois,

maravilhei-me uma segunda vez, e de uma maneira totalmente diferente, com um pequeno livro que tratava da geometria plana euclidiana, que me chegou às mãos no começo do ano letivo. Ali estavam afirmações, como por exemplo a intersecção das três alturas de um triângulo num ponto, que — embora não fossem evidentes — podiam mesmo assim ser provadas com tal certeza que qualquer dúvida parecia impossível. Essa lucidez e certeza causaram-me uma impressão indescritível.¹²

Mais tarde, Einstein consideraria essa conversão da religião tradicional para o que chamou de seu "sagrado" texto de Euclides, como duas maneiras de lutar pela mesma libertação:

É perfeitamente evidente para mim que o paraíso religioso da juventude, assim perdido, foi uma primeira tentativa de libertar-me das cadeias do "meramente pessoal", de uma existência dominada pelos desejos, esperanças e sentimentos primitivos. Lá fora estava esse imenso mundo, que existe independentemente de nós, seres humanos, e que está à nossa frente como um grande, um eterno enigma, apenas parcialmente acessível à nossa inspeção e reflexão. A contemplação desse mundo me acenava como uma libertação... A estrada para esse paraíso não era tão confortável e atraente como o caminho para o paraíso religioso. Revelou-se, porém, fidedigna, e jamais lamentei tê-la escolhido.¹³

Até mesmo a falta de precocidade de Einstein parece, vista retrospectivamente, um dom disfarçado. Ele sentia que se tinha "desenvolvido tão lentamente que só comecei a pensar no espaço e tempo quando já tinha crescido. Em consequência, mergulhei mais fundo nesse problema do que o teria feito uma criança normal". Qualquer que fosse a causa, ele certamente possuía poderes excepcionais de concentração. Como Newton, que atribuía suas descobertas relacionadas com problemas profundos ao hábito de "pensar neles sem cessar", Einstein era implacavelmente tenaz numa linha de pensamento que lhe atraísse a atenção.* E como Galileu, combinava o gosto pelas questões filosóficas fundamentais com a apreciação da importância de testar empiricamente as suas idéias. "A observação direta dos fatos sempre teve para mim uma espécie de atração mágica", disse ele.¹⁵

A odisséia intelectual que levou Einstein à teoria especial da relatividade — e dela à teoria geral, que tiraria da infância a cosmologia teórica — começou quando ele tinha apenas 5 anos de idade. Estava doente, de cama, e o pai mostrou-lhe uma bússola de bolso, para distraí-lo. Ele perguntou o que fazia a agulha apontar para o norte, e ouviu a resposta de que a Terra está envolta num campo magnético, ao qual reage a agulha. Ficou espantado. Parecia um "milagre", como lembrou muitos anos depois, que um campo invisível, abstrato, pudesse governar o comportamento de uma agulha de bússola, muito real. "Alguma coisa profundamente oculta tinha de estar por trás das coisas", pensou ele.¹⁶

Alguns anos depois ficou sabendo o que poderia ser aquela "alguma coisa", ao ler uma descrição didática da teoria do campo eletromagnético de James Clerk Maxwell, que baseou sua teoria no trabalho experimental do cientista inglês Michael Faraday. Os dois, como Einstein observou mais tarde, estavam tão relacionados quanto Galileu e Newton — "o primeiro, em cada um desses pares, percebia as relações intuitivamente, e o segundo formulava essas relações de maneira exata e as aplicava quantitativamente".¹⁷ Faraday, filho de um ferreiro, tinha sido aprendiz de um encadernador de Londres. Leu livros de ciência popular em seus momentos de folga e quando um amigo o levou para ouvir uma série de conferências públicas do químico Sir Humphrey Davy, Faraday tomou nota delas, imprimiu-as, encadernou-as em couro e as mandou para Davy, que em troca o contratou como assistente de laboratório na Royal Institution of Great Britain. Ali Faraday permaneceu nos 46 anos que se seguiram, acabando por substituir Davy como seu diretor. Era uma figura edisoniana, com os cabelos brancos partidos no meio, sobre olhos arregalados e maçãs do rosto caídas, os

* O matemático norte-americano Ernst Straus presenciou um exemplo da tenacidade de Einstein certa tarde, quando trabalhava como seu assistente no Instituto de Estudos Avançados, em Princeton, na década de 1940. "Tínhamos terminado o preparo de um trabalho e estávamos procurando por um clipe de papel", escreve Straus. "Depois de abrir várias gavetas, finalmente encontramos um, muito encurvado para poder ser usado. Assim, pusemo-nos a procurar uma ferramenta para endireitá-lo. Abrindo outras gavetas, acabamos encontrando uma caixa de cliques novos. Einstein imediatamente começou a dar a um deles a forma de uma ferramenta para endireitar o clipe usado. Quando lhe perguntei o que fazia, respondeu: — Quando persigo uma meta, é difícil afastar-me dela."¹⁴

ombros curvados pelo trabalho e as mãos grandes enterradas nos aparelhos de laboratório, embora sorrisse com a mesma frequência com que Edison esbravejava.

No curso de mais de 15.000 experiências, Faraday descobriu que a eletricidade e o magnetismo são transmitidos por meio de linhas de força invisíveis dispostas no espaço — ou seja, por campos. (Os estudantes que hoje espalham pedaços de ferro sobre um papel colocado sobre ímã em forma de ferradura para observá-los traçarem as linhas do campo magnético, estão reproduzindo uma velha experiência de Faraday.) O que ele deu à ciência foi uma mudança fundamental de ênfase, passando do mecanismo visível, o ímã ou bobina elétrica, para o campo invisível que a cerca e transmite a força elétrica ou magnética. Com isso teve início a teoria do campo, que hoje explora processos que vão da escala subatômica até a escala intergaláctica, e retrata todo o mundo material como sendo uma grande ilusão, tecida no tear dos campos de força. Einstein seria o seu Bach.

Embora Faraday estabelecesse a existência dos campos elétrico e magnético, faltava-lhe a percepção matemática necessária para escrever uma descrição quantitativa deles. Isso coube a Maxwell. De ossos finos como um pássaro, com olhos confiantes e distantes, e um rosto infantil, Maxwell sentia-se à vontade nos castelos matemáticos inacessíveis a Faraday. Pensador metódico, estudou a eletricidade e o magnetismo lendo os trabalhos de Faraday — a conselho de Lorde Kelvin, para conhecer os campos através da visão de Faraday — e só depois os submeteu à lâmpada de arco de suas habilidades matemáticas. O resultado, escreveu Maxwell a Kelvin em 1854, foi "ter sido recentemente recompensado ao ver a massa confusa começar a esclarecer-se sob a influência de algumas idéias simples."¹⁸

Foi o início da abstração do conceito de campo, passo que significou o fim da ciência puramente mecanicista e levou aos vãos matemáticos, não visualizáveis mas muito mais flexíveis, da relatividade e da física quântica. Faraday leu os trabalhos que Maxwell lhe mandou com o assombro com que a pessoa sem ouvido musical ouve os quartetos de Beethoven, compreendendo que são belos mas sem ser capaz de compreender como. "Quase tive medo quando vi tal capacidade matemática exercida sobre o assunto, e em seguida maravilhei-me ao ver que o assunto resistia tão bem" —, escreveu Faraday a Maxwell. Em outra carta, ele perguntava, de maneira comovente, e como uma tentativa:

Quando o matemático que investiga ações e resultados físicos chegou às suas conclusões, não poderiam elas ser expressas numa linguagem comum, com a mesma totalidade, clareza e simplicidade que nas fórmulas matemáticas? Se assim fosse, não seria uma grande felicidade, para aqueles como eu, expressá-las dessa forma? — traduzindo-as do seus hieroglifos.¹⁹

Cortesmente, Maxwell colocou algumas de suas explicações da teoria do campo em linguagem que Faraday pudesse compreender, mas sua teoria só alcançava realmente voo quando reduzida às puras equações. Com o equilíbrio e o vigor de uma fuga, essas equações demonstravam que a eletricidade e o magnetismo são aspectos de uma mesma força, o eletromagnetismo, e que a própria

luz é uma variedade dessa força.* Uniram-se assim os estudos, antes separados, da eletricidade, magnetismo e óptica.

Quando o jovem Einstein encontrou as equações de Maxwell, elas lhe pareceram, como ele disse, "uma revelação". Ali estava uma explicação precisa e simétrica do campo invisível que governava a agulha da bússola. Animava o espaço, podia "tecer uma teia pelo céu", como tinha dito Maxwell, e suas equações diferenciais traçavam os contornos dessa teia com um requintado equilíbrio e precisão.

"O que fez com que essa teoria parecesse revolucionária", recordou-se Einstein, "foi a transição de forças a distância para os campos como variáveis fundamentais."²⁰ Já não era necessária a idéia do éter como transmissor da luz através do espaço: o campo eletromagnético podia fazer isso. Tal fato não havia sido percebido pelos físicos clássicos, mais antigos, inclusive o próprio Maxwell, e que tinham uma visão do mundo mecanicista, inflexível, e nela os campos, tomados em si mesmos, pareciam demasiado imateriais para serem reais. Tinha sido pelo consenso entre esses físicos que a hipótese do éter ganhara vida, um navio-fantasma vivo graças a fogos-fátuos por muito tempo ainda, depois que as equações de Maxwell e a experiência de Michelson-Morley haviam tirado o vento de suas velas. Einstein, pouco se importando com a tradição, abandonou o éter e focalizou a sua atenção no campo.

Mas se aceitarmos ao mesmo tempo as equações de Maxwell e o espaço absoluto de Newton, o resultado é um paradoxo. Os gigantes da física compreendiam isso, e esta era uma das razões que tinham para subestimar a importância das equações de campo de Maxwell, Einstein, desconhecendo-os, descobriu por si mesmo o paradoxo, aos 16 anos. Estava, na época, matriculado numa escola preparatória em Aarau, na Suíça, onde gostava de dar caminhadas acompanhando as curvas do rio. (Anos depois, escreveria um trabalho definindo como os rios fazem curvas.) Certo dia, Einstein perguntou-se o que veria, se perseguisse um feixe de luz com a velocidade da própria luz. A resposta, segundo a física clássica, era que: "eu devia observar esse feixe de luz como um campo eletromagnético espacialmente oscilatório em repouso. Mas tal coisa não parece existir, seja à base da experiência, seja de acordo com as equações de Maxwell."²¹ A velocidade era inerente à luz; fora, afinal de contas, pela sua velocidade que a luz revelara a Maxwell sua identidade como campo eletromagnético. Mas se vivemos num espaço absoluto, newtoniano, demarcado pelo éter, deveria ser possível alcançar um feixe de luz e com isso roubá-lo de sua velocidade. Alguma coisa tinha de sobrar, na física de Newton ou na de Maxwell.

* Maxwell descobriu que a velocidade com que se propagam os campos eletromagnéticos é igual à razão entre a força elétrica exercida por duas cargas elétricas em repouso e a força magnética que exercem em movimento. Com isso era nada menos do que velocidade da luz, Maxwell concluiu que a luz é, em si, um campo eletromagnético. Como as explicações populares da teoria especial da relatividade dão por vezes a impressão errônea de que a velocidade da luz é um limite arbitrário da velocidade, como o fixado pelas autoridades para a velocidade nas estradas, é útil lembrar a descoberta de Maxwell — que a velocidade da luz resulta de uma constante fundamental nas equações que descrevem o comportamento dos campos eletromagnéticos.

Einstein conhecia outro paradoxo eletrodinâmico, que tinha surgido em seu quintal, literalmente, nos dínamos de ferro e cobre que seu pai e seu tio Jakob tinham feito numa oficina elétrica atrás da casa da família, nos subúrbios de Munique. O princípio do dínamo, estabelecido por Faraday, era que o campo criado por um ímã rotativo gerava uma corrente elétrica numa teia de arame circundante. Essa descoberta tinha um tremendo potencial prático: a energia de uma máquina a vapor ou de um raio podia ser captada para produzir eletricidade, que seria então transmitida por linhas elétricas, para acionar máquinas e iluminar ruas de cidades a quilômetros de distância. Embora a família de Einstein não tivesse ganho nunca muito dinheiro com eles, os dínamos estavam na linha de frente da tecnologia contemporânea, e gigantescos dínamos a vapor estavam sendo encomendados e fabricados, a um custo considerável.* Mas seu desempenho não podia ser previsto com exatidão, enquanto o comportamento do campo eletromagnético no interior do dínamo fosse tão mal conhecido. Segundo a teoria existente, o campo móvel poderia ser explicado de acordo com uma série de regras, se fosse visto da perspectiva do ímã rotativo do dínamo, e com outra série, se visto do ponto de vista da bobina elétrica estacionária. Cada dínamo era um mistério giratório.

A situação era economicamente difícil para os industriais. A Einstein, parecia pouco estética. "A idéia de que se tratava, ali, com dois casos fundamentalmente diferentes era-me intolerável", escreveu. "A diferença entre esses dois casos não podia ser real, mas sim, na minha convicção, apenas uma diferença na escolha do ponto de referência."²³

Tais questões ainda lhe ocupavam o espírito quando completou seu ano de escola preparatória, mas se esperava encontrar orientação para resolvê-las no Instituto Politécnico, desiludiu-se logo. Seu professor de física, Heinrich Friedrich Weber, capaz, mas conservador, estava fascinado pelos dínamos, devia a sua cátedra à filantropia do fabricante de dínamos Werner von Siemens, e era tão dedicado ao estudo da eletricidade que se submetia repetidamente a choques elétricos de mil volts, e mais, de corrente alternada — e isso como parte de uma tentativa de determinar quanta voltagem um ser humano podia suportar.** Mas Weber, mergulhado nas tradições da física clássica, não falava nunca em Maxwell ou Faraday. Einstein perdeu logo o interesse e começou a faltar às

* Um sentimento do fascínio pelo dínamo foi preservado pelo historiador norte-americano Henry Adams em seu *The Education of Henry Adams*. Ao descrever sua visita à "grande sala de dínamos" na Exposição de Paris em 1900, ele diz: "Para Adams, o dínamo tornou-se um símbolo do infinito. À medida que ele se habituou à grande galeria das máquinas, começou a ver o dínamo de 12m como uma força moral, tal como os cristãos antigos viam a Cruz. O próprio planeta parecia menos impressionante, em sua revolução anual ou diária, antiquada, deliberada, do que essa enorme roda."²²

** Pesquisas como a de Herr Weber estavam sendo prontamente aplicadas à execução de condenados e ao castigo de presidiários que se comportavam mal. A primeira electrocução de um criminoso nos Estados Unidos ocorreu em 1890, menos de dez anos depois de ter começado a operar a primeira usina de energia elétrica no país; o método pretendia ser humano, mas a vítima levou quinze minutos para morrer. Soldados alemães que tiveram problemas nervosos no campo de batalha, na Primeira Guerra Mundial, receberam choques de eletricidade e foram mandados de novo à frente. Se voltavam à retaguarda, recebiam choques ainda mais severos, num círculo vicioso de medo e dor que levou alguns deles ao suicídio.²⁴

suas aulas. Estudava física sozinho e realizava experiências nos excelentes laboratórios da Politécnica. Uma delas resultou numa explosão que feriu seriamente a sua mão e quase destruiu as instalações.

O professor Weber revidou, fazendo o que podia — e que era muito — para impedir que Einstein conseguisse um emprego depois de formado. Assim estigmatizado, Einstein nada conseguiu. A desagradável experiência dos estudos intensivos para os exames finais deixara-o, de qualquer modo, incapaz para pensar em ciência durante todo um ano, e ele passou esse tempo lendo filosofia e tocando violino. Quando retomou o estudo da física, não teve grande estímulo do mundo exterior. Apresentou sua tese sobre a cinética dos gases à Universidade de Zurique, mas não recebeu nenhum doutorado. Escreveu alguns artigos científicos, que quase nada valiam. Mesmo assim, embora lamentando ser uma decepção para seus pais, Einstein continuou serenamente confiante em si mesmo. "Tenho algumas idéias esplêndidas", escreveu ao amigo Marcel Grossman, "que agora só precisam da devida incubação."²⁵

Foi com a ajuda do pai de Grossman que Einstein conseguiu o emprego no departamento de patentes, e embora possamos balançar a cabeça ante o espetáculo de tão grande homem num cargo tão pequeno, Einstein recordava-se dele como "minha melhor época".²⁶ Gostava de contemplar os aparelhos que lhe eram submetidos a exame, achava que o preparo de críticas aos pedidos de patentes ajudava-o a aprender a expressar-se concisamente, e gostava da companhia do amigo Michele Angelo Besso, com quem discutia filosofia, física e tudo mais que havia debaixo do sol. "Eu não poderia ter encontrado melhor interlocutor em toda Europa", disse.²⁷

Por insistência de Besso, Einstein leu os trabalhos do físico e filósofo austríaco Ernst Mach, um dos poucos pensadores científicos importantes a criticar o paradigma mecânico em que se baseava a crença num espaço newtoniano impregnado de éter. "*Os mais simples princípios mecânicos são de caráter muito complicado*", escreveu Mach. "*...Não podem, de forma alguma, ser considerados como verdades matematicamente estabelecidas, mas apenas como princípios que não só admitem controle constante pela experiência, como na realidade o exigem.*"²⁸ (Grifo de Mach.) Crítico ferrenho do espaço newtoniano em geral e da hipótese do éter em particular, Mach procurou substituir essas "obscurezas metafísicas", como as chamou, por preceitos mais econômicos, ancorados com firmeza nos dados sensórios das observações. O espaço, argumentou ele, não é uma coisa, mas uma expressão de inter-relações entre acontecimentos. "*Todas as massas e todas as velocidades, e em consequência todas as forças, são relativas*", disse.²⁹ Einstein concordou, e foi estimulado a tentar escrever uma teoria que construísse o espaço e o tempo a partir apenas dos fatos, como recomendava Mach. Não conseguiu nunca satisfazer totalmente a esses critérios — é possível que nenhuma teoria funcional o consiga — mas a tentativa contribuiu para impeli-lo para a relatividade.

O aparecimento da teoria especial da relatividade foi tão pouco convencional quanto o seu autor. O artigo de 1905 que primeiro formulou a teoria assemelha-se ao trabalho de um doido: não tem citações de obras científicas e menciona a colaboração de uma pessoa apenas, Besso, que não era cientista. (Na época, Einstein não conhecia cientistas.) A primeira conferência de Einstein em Zurique, explicando a teoria, foi feita não numa universidade, mas no audi-

tório do Sindicato dos Carpinteiros; ele falou por uma hora, e de repente interrompeu-se para perguntar as horas, explicando que não tinha relógio. Mesmo assim, ali começou a reformulação dos conceitos de espaço e tempo.

Com a teoria especial da relatividade, Einstein resolveu por fim o paradoxo que lhe tinha ocorrido aos 16 anos, de que as equações de Maxwell falhavam se fosse possível perseguir um feixe de luz com a velocidade da luz. E o resolveu concluindo ser impossível chegar à velocidade da luz — que, realmente, a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores, qualquer que seja o seu movimento relativo. Se, por exemplo, um físico estivesse a bordo de uma nave espacial voando em direção à estrela Vega a uma velocidade de 50% da luz, e medisse a velocidade da luz proveniente de Vega, veria que tal velocidade é exatamente a mesma que observariam os seus colegas lá na Terra.

Para quantificar essa estranha situação Einstein foi obrigado a empregar as contrações de Lorentz. (Na época, ele conhecia pouco de Lorentz, a quem mais tarde viria a considerar como “o maior e mais nobre homem de nossa época ... uma obra de arte viva”).³⁰ Nas mãos de Einstein, as equações de Lorentz especificam que à medida que um observador aumenta de velocidade, suas dimensões, bem como as de sua nave espacial e de quaisquer aparelhos de medição a bordo, se reduzirão ao longo da direção de seu movimento, exatamente nas proporções necessárias para tornar a medida da velocidade da luz sempre a mesma. Seria essa, portanto, a razão pela qual Michelson e Morley não tinham encontrado traços do “movimento do éter”. De fato, o éter é supérfluo, como são supérfluos o espaço e o tempo absolutos de Newton, pois não há necessidade de nenhum ponto de referência imóvel: “Ao conceito de repouso absoluto não correspondem propriedades dos fenômenos, nem na mecânica, nem na eletrodinâmica.”³¹ O que importa são os fatos observáveis, e nenhum fato pode ser observado enquanto a luz (ou as ondas de rádio, ou outra forma de radiação eletromagnética) que dá notícias suas não chegar ao observador. Einstein substituiu o espaço de Newton por uma rede de feixes de luz; era deles a grade absoluta, dentro da qual o próprio espaço se tornava flexível.

Os observadores em movimento sofrem também uma redução da passagem do tempo. Um astronauta que viajasse a 90% da velocidade da luz envelheceria com a metade da rapidez dos seus colegas lá na Terra, de modo que numa vigésima reunião de astronautas interestelares, aqueles que tivessem servido mais a bordo de naves espaciais relativistas seriam os mais jovens. Também a massa torna-se plástica dentro da moldura dos feixes de luz; os objetos que se aproximam da velocidade da luz sofrem um aumento de massa. Os efeitos da dilatação relativista do tempo, do aumento de massa e da mudança de dimensões são mínimos em velocidades comuns, como as da Terra em sua órbita, ou do Sol pelo espaço (razão pela qual não tinham sido observados antes) mas tornam-se acentuados com o aumento da velocidade, e chegam ao infinito à velocidade da luz. Se a Terra pudesse acelerar-se até essa velocidade (feito que exigiria uma energia infinita), sofreria uma contração, transformando-se numa hóstia bidimensional de massa infinita, na qual o tempo teria parado — o que é uma maneira de dizer que a aceleração até a velocidade da luz é impossível.

Esses efeitos não são ilusórios, nem simplesmente psicológicos: são tão reais quanto a pedra chutada pelo Dr. Johnson em sua famosa refutação do bispo Berkeley, e foram confirmados em dezenas de experiências. O aumento relativista

na massa das partículas que se movimentam a uma velocidade próxima à da luz não só é observado em aceleradores de partículas, como também é ele que dá às partículas em aceleração a maior parte de seu impulso. A dilatação relativista do tempo foi testada fazendo-se voar relógios atômicos à volta do mundo em aviões comerciais: verificou-se que os relógios se atrasavam exatamente na fração de tempo especificada pela teoria. Um controlador de terra da NASA certa vez ameaçou deixar os astronautas no espaço pela fração de um centavo do seu salário de voo, para compensar a redução do tempo que sofreram em consequência de sua velocidade em órbita.

Essa e outras implicações da relatividade especial pareceram a princípio ao público leigo, e também a muitos cientistas, como excepcionalmente estranhas.* Mas se a abordagem de Einstein foi radical, sua intenção foi essencialmente conservadora. Como está implícito no título de seu artigo original sobre a relatividade, “Sobre a eletrodinâmica dos corpos móveis”, seu objetivo era redimir as leis da eletrodinâmica, para que se evidenciasse o seu funcionamento em qualquer situação imaginável, não apenas num tranquilo laboratório de Zurique, mas também nos dinamos que giravam e nos mundos móveis que se cruzavam a velocidades espantosas. A palavra *relatividade*, criada não por Einstein, mas por Poincaré e aplicada à teoria pelo físico Max Planck, é algo enganosa, sob esse aspecto. Ressaltando sua função conservadora, Einstein preferia chamá-la de *Invariantentheorie* — “teoria da invariância”.

Apesar disso, a relatividade lança a sua ampla teia, abrangendo o estudo não só da luz e do espaço e tempo, como também da matéria. O impacto dessa teoria vem do fato de que o eletromagnetismo está implícito não só na propagação da luz, mas também na arquitetura da matéria. O eletromagnetismo é a força que mantém os elétrons em suas órbitas em torno de partículas nucleares para fazer os átomos, que une os átomos para formar moléculas e junta as moléculas para formar objetos. Tudo que é concreto, das estrelas e planetas até esta página e o olho que a lê, encerram eletromagnetismo nas fibras de seu ser. Modificar a concepção do eletromagnetismo é, portanto, reconsiderar a própria natureza da matéria. Einstein percebeu essa ligação apenas três meses depois da primeira exposição da relatividade especial, e publicou um artigo intitulado “Depende o conteúdo de inércia de um corpo do seu conteúdo de energia?” A resposta era sim, e desde então nosso mundo tem sido mais triste e mais sábio.

No primeiro artigo, como já vimos, Einstein demonstrou que a massa inercial de um objeto aumenta quando ele absorve energia. Segue-se que sua massa *decrece* quando ele *irradia* energia. Isso é válido não só para uma nave espacial planando em direção às estrelas, como também para um objeto em repouso. Uma câmera perde massa (muito pouco) quando o *flash* estoura, e as pessoas cujo retrato está sendo tirado ganham um pouco mais de massa, em troca. Massa e energia são intercambiáveis, e o eletromagnetismo é que faz a troca entre elas.

* Einstein compartilhou, quanto a isso, o destino de Newton, cujas idéias foram habitualmente consideradas como incompreensíveis. Um estudante que viu Isaac Newton passar em sua carruagem teria dito: “Ali vai o homem que escreveu um livro que nem ele mesmo, nem ninguém mais, consegue compreender.”

Einstein, refletindo sobre esse fato, concluiu que a energia e a massa inercial são a mesma coisa, e expressou sua identidade na equação

$$m = \frac{E}{c^2}$$

na qual m é a massa de um objeto, E o seu conteúdo em energia, e c a velocidade da luz. Ao compor esta pequena equação singularmente econômica, que unifica os conceitos de energia e matéria, e relaciona ambas com a velocidade da luz, Einstein estava inicialmente preocupado com a massa. Se, em lugar desta, visarmos à energia, a equação assume uma forma mais conhecida e mais ameaçadora:

$$E = mc^2$$

Vista dessa perspectiva, a teoria diz que a matéria é energia congelada. Essa é, evidentemente, a chave da energia nuclear e das armas nucleares, embora Einstein não tivesse pensado nessas aplicações, na época, e as rejeitasse como não sendo práticas, quando propostas por outros. Nas mãos dos astrofísicos, a equação seria usada para compreender os processos termonucleares que dão energia ao Sol e às estrelas.

Apesar de todas as suas realizações protéticas, a relatividade especial nada dizia sobre a gravitação, a outra força em grande escala conhecida no universo. A teoria especial tem relação com a massa *inercial*, a resistência oferecida pelos objetos às modificações de seu movimento — ao seu “peso”, por assim dizer. A gravidade age sobre os objetos de acordo com sua massa *gravitacional* — isto é, seu “peso”. A massa inercial é o que sentimos ao empurrar uma mala sobre um chão encerado; a massa gravitacional é o que sentimos quando levantamos a mala. Parece haver uma distinção entre elas: a massa gravitacional manifesta-se apenas na presença da força da gravidade, ao passo que a massa inercial é uma propriedade permanente da matéria. Coloquemos a mala numa nave espacial, e uma vez em órbita ela nada pesará (isto é, sua massa gravitacional medirá zero), mas a massa inercial continuará a mesma: teremos de fazer o mesmo esforço para movimentá-la pela cabina, e um vez em movimento, ela terá o mesmo momento que se estivesse deslizando sobre o chão, na Terra.*

Não obstante, por alguma razão, a massa inercial e gravitacional de qualquer objeto são equivalentes. Coloquemos a mala na balança do aeroporto e ve-

* Fui submetido a uma demonstração inesperada desse efeito certo dia, a bordo de um avião DC-3, numa violenta tempestade sobre as Bahamas, quando a balança de ferro de um médico, com cerca de um metro de altura, soltou-se de suas amarras no fundo da cabina. O avião caiu então num chamado “vácuo”, deixando tudo momentaneamente sem peso, e a balança ergueu-se no ar e flutuou na minha direção. Empurrei-a com os pés, sentindo assim, rapidamente, a sua massa inercial, na ausência de sua massa gravitacional. O fato de ser o objeto ameaçador um aparelho de medir o peso deu à lição uma certa intensidade irônica.

rifiquemos que pesa 15kg: isso é resultado de sua massa gravitacional. Em seguida, coloquemos a mala sobre uma superfície de gelo, ou qualquer outra superfície deslizando, isenta de atritos, prendendo uma balança de molas à alça, puxando a balança até que ela se acelere na mesma proporção em que cairia (ou seja, $9,8\text{m/s}^2$, na Terra) e a balança registrará novamente 15kg. Isso é o resultado de sua massa inercial. Realizaram-se experiências com alto grau de precisão, em todo tipo de material, em muitos pesos diferentes e a massa gravitacional de todo objeto revela-se sempre como exatamente igual à sua massa inercial.*

A igualdade entre a massa inercial e a massa gravitacional tem sido uma parte integral, embora pouco notada, da física clássica, há séculos. Pode ser vista, por exemplo, na explicação da descoberta de Galileu de que a bala de canhão e a bola do jogo conhecido como *boccie* caem com a mesma velocidade, apesar de seu peso diferente. Isso acontece porque a bala de canhão, embora tenha maior massa gravitacional e devesse (ingenuamente) cair mais depressa, tem também uma maior massa inercial, que faz com que se acelere mais lentamente. Como essas duas quantidades são equivalentes, elas se neutralizam, e a bala de canhão, em consequência, não cai mais depressa do que a bola de *boccie*. Mas na mecânica newtoniana o princípio da equivalência era tratado como simples coincidência. Einstein ficou intrigado. Aqui, pensou ele, “deve estar a chave de um entendimento mais profundo da inércia e da gravidade”.³² Sua investigação o colocou na acidentada estrada que levaria à teoria geral da relatividade.

A primeira visão que Einstein teve do problema ocorreu certo dia de 1907, no que ele chamou de “o pensamento mais feliz de minha vida”. A lembrança desse momento continuou viva, décadas depois:

Eu estava sentado numa cadeira no departamento de patentes em Berna, quando de repente ocorreu-me uma idéia: “Quem estiver em queda livre não sentirá o seu próprio peso.” Fiquei surpreso. Esse pensamento simples causou-me profunda impressão. Impeliu-me na direção de uma teoria da gravitação.³³

Para compreendermos por que esse quadro aparentemente simples agitou tanto Einstein, imaginemos que despertamos e nos vemos flutuando, sem peso, num elevador de carros totalmente fechado, sem janelas. Uma série diabólica de instruções, pregadas na parede, nos informa que há dois elevadores iguais — um solto no espaço longínquo, onde não está sujeito a nenhuma influência gravitacional significativa, e outro, atraído pelo campo gravitacional do Sol, que mergulha rapidamente para seu fim. Só seremos salvos se pudermos *provar* (não supor) em qual elevador estamos — no que flutua a uma gra-

* As experiências definitivas foram realizadas pelo barão Roland vom Eötvös, em Budapeste, em 1889 e 1922. Eötvös suspendeu objetos de várias composições em fios e procurou desvios nesses fios de prumo causados por diferenças entre sua massa gravitacional (que estava sendo puxada diretamente por baixo) e sua massa inercial (que estava sendo puxada para os lados, pela rotação da Terra). “Em caso algum”, escreveu ele, “foi possível descobrir qualquer desvio detectável da lei de proporcionalidade da gravitação e inércia”. É o que continua a ocorrer hoje, embora uma recente reprodução da experiência produzisse anomalias sutis que não pudessem ser imediatamente explicadas.

vidade zero, ou no que cai num forte campo gravitacional. O que Einstein compreendeu naquele dia, no departamento de patentes, foi que *não podemos* sentir nenhuma diferença, nem através de nossos sentidos, nem por meio de experimentos. O fato de estarmos imponderáveis não significa que estejamos livres da gravidade; poderíamos estar em queda livre. (A "imponderabilidade" sentida pelos astronautas em órbita é precisamente desse tipo: embora estejam dentro do campo gravitacional da Terra, não sentem nenhum peso — isto é, nenhum efeito da gravidade — porque eles, e sua nave espacial, estão caindo constantemente.) O campo gravitacional, portanto, tem apenas uma existência *relativa*. Lembramos a piada sobre o homem que cai do telhado de um edifício alto e, vendo um amigo olhando horrorizado de uma janela, grita-lhe de passagem: "Estou bem, até agora" Sua idéia era a mesma de Einstein — a de que o campo gravitacional não existe para ele, enquanto continuar em seu sistema inercial. (O passeio lá embaixo, infelizmente, está em seu próprio sistema inercial.) A mesma ambigüidade ocorre na situação oposta: suponhamos que ao acordar nos vemos de pé no elevador, em nosso peso normal. Desta vez, as instruções dizem que estamos 1) a bordo de um elevador parado no andar térreo de um edifício de escritórios na Terra, ou 2) pairando num espaço com gravidade zero, num elevador preso por um cabo a uma nave espacial que o arrasta a uma aceleração constante, pressionando-nos contra o chão com uma força igual à da gravidade da Terra — a um "G", como dizem os pilotos de jato. Mais uma vez, não podemos fazer suposições sobre qual é o caso.

Einstein raciocinou que se os efeitos da gravidade forem criados pela aceleração, a própria gravidade poderia ser considerada como uma espécie de aceleração. Mas aceleração através de que sistema de referência? Não poderia ser o espaço tridimensional habitual: os passageiros do elevador no arranha-céu de Nova York não estão, afinal de contas, voando pelo espaço em relação à Terra.

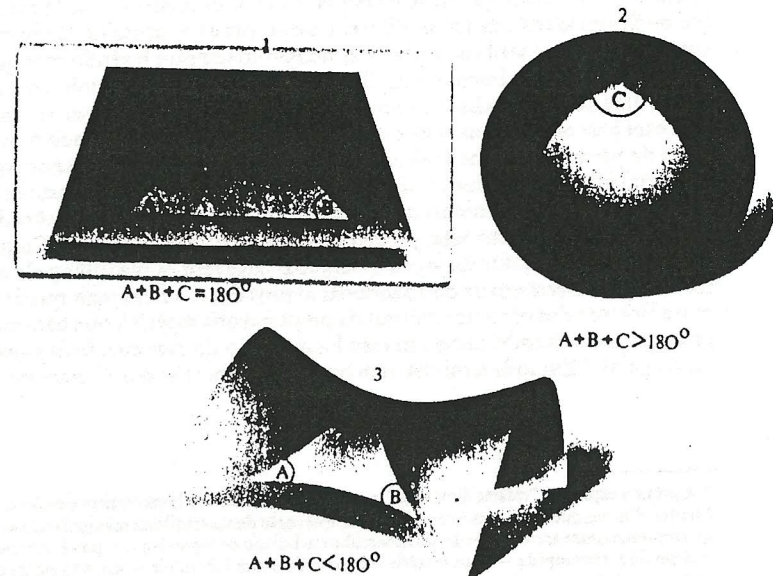
A procura de uma solução levou Einstein a examinar o conceito de um *continuum* espaço-tempo de quatro dimensões. Dentro deste contexto, a gravitação é aceleração, a aceleração dos objetos ao deslizarem ao longo de "linhas de universo" — trajetória de menor ação traçada sobre as inclinações de um espaço tridimensional que é curvo na quarta dimensão.

Um precursor disso foi Hermann Minkowski, que foi professor de matemática de Einstein no Instituto Politécnico. Minkowski lembrava-se de Einstein como de um "preguiçoso" que raramente comparecia às aulas, mas compreendeu logo a importância de seu trabalho, embora a princípio o considerasse apenas como um aperfeiçoamento de Lorentz. Em 1908 Minkowski publicou um artigo sobre a teoria de Lorentz que limpou muitos dos excessos de matemática que obscureciam a formulação original da relatividade especial por Einstein. Demonstrou que o tempo podia ser tratado como uma dimensão num universo quadridimensional. "A partir de agora o espaço em si mesmo, e o tempo em si mesmo, estão destinados a se transformar em meras sombras, e só uma espécie de união entre os dois preservará uma realidade independente", previu Minkowski.³⁴ Suas palavras foram proféticas, e a teoria especial da relatividade tem sido, desde então, vista em termos de um "continuum espaço-tempo". A princípio, Einstein rejeitou a formulação de Minkowski como excessivamente pedante, dizendo como pilhéria que mal reconhecia a sua própria teoria, quando os matemáticos dela se apoderavam. Mas acabou compreendendo que se desejava

explorar a ligação entre peso e inércia, faria bem em percorrer o caminho desbravado por Minkowski.

O *continuum* espaço-tempo de Minkowski, embora adequado à relatividade especial, não sustentaria o que se tornou conhecido como relatividade geral. Seu espaço era "chato" — isto é, euclidiano. Se a gravidade fosse interpretada como uma forma de aceleração, esta teria de ocorrer ao longo das ondulações do espaço curvo. Assim, Einstein foi levado, embora com relutância, ao território proibido da geometria não-euclidiana.

A geometria euclidiana, como todo estudante secundário de matemática sabe, tem características diferentes, dependendo de ser desenvolvida em duas dimensões (geometria "plana") ou três (geometria "sólida"). Num plano, a soma dos ângulos de um triângulo é 180° , mas se acrescentarmos uma terceira dimensão, podemos imaginar superfícies como a de uma esfera, na qual os ângulos de um triângulo somam *mais* de 180° , ou uma hipérbole em forma de sela, na qual os ângulos somam *menos* de 180° . A distância mais curta entre dois pontos, num plano, é uma linha reta, mas numa esfera ou hipérbole, as distâncias mais curtas são linhas *curvas*. Nas geometrias não-euclidianas uma quarta di-



Os triângulos no espaço bidimensional plano têm ângulos internos que somam sempre 180° . Mas quando o espaço duplo é curvado numa terceira dimensão, os ângulos sempre totalizam ou menos de 180° (se a curvatura é hiperbólica, ou "aberta") ou mais de 180° (se a curvatura é esférica, ou "fechada"). Da mesma forma, a geometria do universo tridimensional pode ser plana (euclidiana), ou aberta ou fechada (não-euclidiana), quando vista no contexto do espaço-tempo quadridimensional de Einstein.

mensão é acrescentada, e as regras são modificadas de maneira igualmente coerente, para permitir a possível curvatura do espaço tridimensional dentro de um teatro quadridimensional. Duas categorias de espaço curvo podem então ser imaginadas (ou pelo menos calculadas): esférico, ou espaço "fechado", no qual a tridimensionalidade obedece a regras geométricas análogas às da bidimensionalidade na superfície de uma esfera, e hiperbólico, ou espaço "aberto", análogo à superfície de uma hipérbole tridimensional. (Podemos também desenvolver uma geometria quadridimensional chata, euclidiana, mas nesse caso as regras não mudam, tal como a geometria plana de duas dimensões obedece às mesmas regras, se os planos estiverem nos lados de um cubo tridimensional.)

Na época em que Einstein entrou em cena, as regras da geometria de quatro dimensões tinham sido elaboradas — as do espaço quadridimensional esférico por Georg Friedrich Riemann, e as das hipérbolas quadridimensionais por Nikolai Ivanovich Lobachevski e János Bolyai. Toda a questão, porém, ainda era considerada, na melhor hipótese, como difícil e obscura, e na pior, como quase que de má reputação.* O lendário matemático Karl Friedrich Gauss tinha sustado a publicação de seus trabalhos sobre geometria não-euclidiana por medo de ser ridicularizado pelos colegas, e Bolyai concluiu sua pesquisa no campo contra a opinião do pai, que o advertiu: "Pelo amor de Deus, por favor, abandone-a. Tenha dela o mesmo medo que das paixões sensuais, pois também ela pode consumir todo o seu tempo e privá-lo da saúde, paz de espírito e felicidade na vida."³⁶

Einstein lançou-se pelo caminho que o pai de Bolyai temia pisar. Com a ajuda de seu velho companheiro de escola Marcel Grossman — "Ajuda-me, Marcel, ou ficarei louco", escreveu. Einstein lutou com as complexidades do espaço curvo, procurando atribuir a quarta dimensão ao tempo e fazendo com que toda a questão, infernalmente complicada, desse certo. Já então tinha começado a desfrutar de reconhecimento profissional, tinha deixado o departamento de patentes para aceitar uma série de cargos de professor que culminou numa cátedra de pesquisa pura na Universidade de Berlim, e estava realizando importante trabalho na mecânica quântica e em meia dúzia de outros campos. Mas continuava a voltar ao enigma da gravitação, tentando encontrar padrões de beleza e simplicidade entre altas pilhas de papéis cobertos de equações. Como um explorador perdido que vai jogando fora suas bagagens numa trilha pelo deserto, ele sentiu necessidade de abandonar alguns de seus bens mais queridos — entre eles, um dos preceitos centrais da própria teoria especial, que para sua alegria acabaria voltando como um caso local dentro do esquema mais amplo da teoria geral. "Em toda a minha vida nunca trabalhei tão duro", escreveu a um

* A própria expressão "quarta dimensão" lembrava os entusiasmos de excêntricos e extáticos como Charles Hinton, que buscavam intensificar a compreensão de suas sutilezas manipulando 81 cubos que representavam as unidades de um hiper-cubo euclidiano de 3-por-3-por-3-por-3. A carreira de Hinton foi interrompida — e sua matéria sofreu ainda maior ignomínia — quando ele foi condenado por bigamia, por ter posto em prática a filosofia do amor livre de seu pai, que gostava de dizer que "Cristo foi o Salvador dos homens, mas eu sou o salvador das mulheres, e não o invejo nem um pouco"! Hinton filho morreu durante um banquete da Sociedade de Investigação Filantrópica, em Washington, D.C., logo depois de levantar um brinde em honra à feminilidade³⁵.

amigo. "...Comparada com este problema, a teoria da relatividade original é brincadeira de criança."³⁷ Em nenhum outro momento da História encontra-se um trabalho intelectual mais continuado e heróico do que o de Einstein em busca da relatividade geral, nem que tenha produzido maiores resultados.

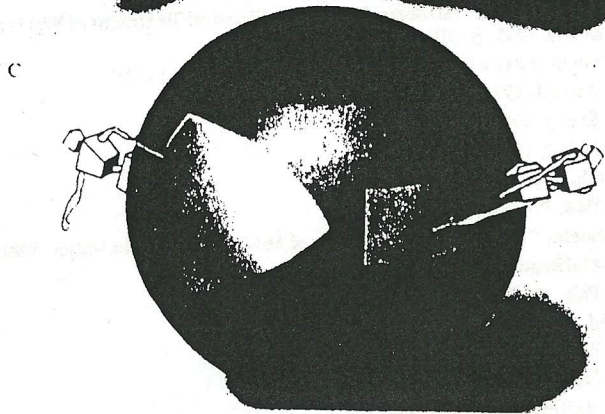
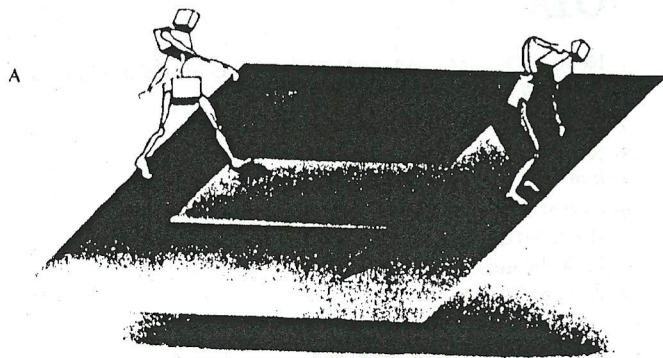
Ele completou sua teoria em novembro de 1915 e a publicou na primavera seguinte. Embora suas equações sejam complexas, a concepção geral é espantosamente simples. A força da gravidade desaparece e é substituída pela geometria do próprio espaço: a matéria curva o espaço, e o que chamamos de gravitação é apenas a aceleração dos objetos ao deslizarem pelo "tobogã" descrito pelas suas trajetórias no tempo, através das ondulações do espaço. Os planetas deslizam ao longo de paredes internas de uma depressão no espaço criada pelo gordo e maciço Sol; aglomerados de galáxias repousam em buracos espaciais como pepitas na peneira de um garimpeiro.

Ao casar a física gravitacional com a geometria do espaço curvo, a relatividade geral emancipou a cosmologia do antigo dilema de saber se o universo é infinito e ilimitado, ou finito e limitado. Um universo infinito não seria apenas grande, mas *infinito*, e isso criava problemas. A força gravitacional gerada por um número infinito de estrelas seria, em si mesma, infinita, e esmagaria portanto a ação local da gravidade; essa perspectiva perturbou tanto Newton que ele recorreu à invocação da graça infinita de Deus para resolvê-la. Além disso, a luz de um número infinito de estrelas poderia transformar o céu noturno numa brasa de luz, e não obstante, o céu noturno é escuro.* A alternativa, porém — um universo euclidiano finito com uma beirada — também encerrava poucos atrativos. Como Liu Chi formulou a questão, na China do século XIV: "O céu tem um limite, que coisas estariam fora dele?"³⁹ A dificuldade de imaginar um fim para o espaço tinha sido expressa já no século V a.C. pelo colega de Platão, Arquistas, o Pitagórico; e Lucrécio assim a resumiu:

Vamos supor por um momento que o universo é limitado. Se um homem chegar à beirada do limite extremo e lançar uma veloz lança, preferem que essa lança, jogada com grande força, vá para onde foi mandada e voe para longe, ou acham que alguma coisa pode detê-la e opor-se à sua trajetória?⁴⁰

A relatividade geral resolveu o problema estabelecendo que o universo podia ser finito — isto é, podia conter um número finito de estrelas num volume de espaço finito — e ao mesmo tempo, ilimitado. A chave para essa interpretação estava na argumentação de Einstein de que, como a matéria deforma o espaço, a soma total da massa de todas as galáxias poderia ser suficiente para deformar o espaço à sua volta. O resultado seria um cosmos esférico, quadridimensional, fechado, no qual qualquer observador, em qualquer ponto do universo, veria as galáxias se estenderem para o espaço longínquo em todas as dire-

* Esse enigma perturbador, conhecido hoje como o paradoxo de Olbers, segundo o astrônomo alemão do século XIX, Wilhelm Olbers, teve descoberta independente por outros astrônomos, entre os quais Halley, que sobre ele falou numa reunião da Royal Society, em 1721. Newton presidiu essa reunião, mas por alguma razão, nunca escreveu sobre o paradoxo. O historiador de ciência Michael Hoskin disse que o velho estava cochilando quando Halley falou³⁸.



Os habitantes bidimensionais de um universo finito devem enfrentar o paradoxo de uma "beirada" do seu cosmos. Mas se acrescentarmos uma dimensão, curvando o plano no qual eles vivem e transformando-o numa esfera, seu mundo, embora ainda finito, torna-se ilimitado. A relatividade geral revela uma perspectiva semelhante para a geometria quadridimensional do universo habitado por nós, criaturas tridimensionais: daí o universo "fechado, ilimitado", de Einstein.

ções, e concluiria, corretamente, que não há fim no espaço. Não obstante, o volume de espaço num universo fechado seria, ainda assim, finito: um aventureiro com tempo a perder poderia por fim visitar todas as galáxias, embora sem chegar nunca ao extremo do espaço. Assim como a superfície da Terra é finita, mas ilimitada em duas dimensões (podemos andar por onde quisermos sem chegar à beirada da Terra), assim também um universo quadridimensional fechado é finito mas ilimitado para nós, que o observamos em três dimensões.*

A questão de ser o universo hiperbólico e aberto, ou esférico e fechado, continua sem resposta, como iremos ver. Graças a Einstein, porém, o problema já não é obscurecido pelo paradoxo. Ao introduzir a perspectiva científica de um cosmos finito, ilimitado, a teoria geral de Einstein inicia um diálogo significativo entre a mente humana e os enigmas do espaço cosmológico.

A teoria era bela, mas seria verdadeira? Tendo chegado ao alto da montanha, Einstein tinha toda a confiança, quanto a isso. A relatividade geral explicava uma precessão na órbita do planeta Mercúrio, que ficara inexplicada na mecânica newtoniana, e ele não tinha dúvidas de que resistiria também a outras provas. Como escreveu ao amigo Besso: "Estou plenamente satisfeito e não tenho mais dúvidas da exatidão de todo o sistema... O sentido da coisa é demasiado evidente."⁴¹

A comunidade científica geral, porém, esperou o veredicto do experimento. Haveria um eclipse solar total a 29 de maio de 1919, quando o Sol iria contrapor-se às brilhantes estrelas do aglomerado das Híades. O astrônomo inglês Arthur Stanley Eddington chefiou uma expedição a uma fazenda de cacau na ilha do Príncipe, ao largo da África Equatorial, para observar o eclipse e ver se a curvatura do espaço na região do Sol deformaria as posições aparentes das estrelas, no céu que se escureceria por um momento. Era uma cena de grande drama — cientistas ingleses testando a teoria de um físico alemão imediatamente depois do término da Grande Guerra. Ao aproximar-se o momento do eclipse, nuvens de chuva cobriram o céu. Mas momentos depois que a sombra da Lua correu pela paisagem e a totalidade começou, abriu-se um buraco nas nuvens, em torno do Sol, e as câmeras foram disparadas. Os resultados da expedição de Eddington, e de uma segunda observação do eclipse realizada em Sobral, no Brasil, no mesmo dia, foram apresentadas pelo astrônomo real numa reunião da Royal Society, em Londres, a 6 de novembro de 1919, com o retrato de Newton a olhá-los. Foram positivos: os raios de luz vindos das estrelas nas Híades foram desviados exatamente no grau previsto pela teoria.

Quando Einstein recebeu um telegrama de Lorentz anunciando o resultado da expedição Eddington, mostrou-o a uma aluna, Ilse Rosenthal-Schneider, que perguntou: "O que teria o senhor dito, se não houvesse confirmação?"

* Alternativamente, a relatividade geral permite que o universo seja estruturado como uma hipérbolo quadridimensional, e nesse caso seria ao mesmo tempo infinito e ilimitado. Essa possibilidade faz ressurgir algumas das dificuldades que afligem todos os modelos de universo infinito, mas talvez possam ser resolvidas se os dados da observação indicarem que o espaço é, na verdade, curvado hiperbolicamente e não esféricamente.

"Eu teria sentido pena de nosso caro Senhor", respondeu Einstein. "A teoria é correta."^{42*}

Experimentos posteriores confirmaram a confiança de Einstein. A curvatura do espaço nas proximidades do Sol foi estabelecida com muito maior precisão, pelas ondas de radar que voltavam de Mercúrio e Vênus, quando estes estavam próximos do Sol, no céu, e a proporção da curvatura correspondeu ao previsto pela teoria geral da relatividade. Um feixe de luz dirigido para uma torre no Laboratório Físico Jefferson, na Universidade de Harvard, teve um desvio para o vermelho provocado pela gravitação da Terra no grau previsto. Turbilhões de energia detectados nos centros das galáxias violentas indicam que elas encerram buracos negros, objetos decaídos, deformados num espaço infinitamente curvo que os isola do resto do universo; a existência dos buracos negros foi outra previsão da teoria geral. E a teoria foi testada também de muitas outras maneiras — em exames de estrelas mortas e sepultadas, no giro de estrelas ativas umas em torno das outras, nas andanças de naves espaciais interplanetárias bem além de Júpiter, e no retardamento da luz ao subir para fora do espaço do Sol — ela sobreviveu a todas essas provas.

Demasiado modesto para ser imodesto, Einstein escreveu, ao publicar sua exposição completa da relatividade geral, que "difícilmente quem compreendeu de fato esta teoria poderá resistir à sua mágica."⁴⁴ Mesmo que apenas os matemáticos e físicos que dominaram a relatividade geral estivessem em condições de compreendê-la totalmente, ainda assim todos nós podemos apreciar parte dela, se, atendo-nos aos conceitos básicos, contemplarmos o universo de galáxias que se deslocam sem esforço pelo espaço que se curva suavemente. O epitáfio de Einstein podia ser o mesmo de Christopher Wren: Se buscais seu monumento, olhai à volta.

* Certa vez Einstein deixou Ernest Straus espantado ao dizer que Max Planck, pai da física quântica. "Era uma das melhores pessoas que conheci e um dos meus melhores amigos, mas, você sabe, ele não entendia realmente de física". Quando Straus estranhou, Einstein respondeu: "Durante o eclipse de 1919 Planck ficou acordado a noite inteira para ver se ele confirmaria a curvatura da luz pelo campo de gravidade do Sol. Se realmente entendesse a maneira pela qual a teoria geral da relatividade explica a equivalência da massa inercial e da massa gravitacional, ele teria ido dormir, como eu fui."⁴³

NOTAS

1. Newton, *Principia*, trad. do latim para o ingl. de Cajori-Morte, p. 6.
2. Ver Hoffmann, 1983, p. 60.
3. In Livingston, 1973, p. 77.
4. *Ibid.*, p. 132.
5. *Ibid.*
6. Poincaré, 1899, in Hoffmann, 1983, p. 86.
7. Dirac, 1971, pp. 13, 14.
8. In Hoffmann, 1972, p. 24.
9. *Ibid.*, pp. 20, 25.
10. In Stachel, 1987, p. 334.
11. In Dukas e Hoffmann, 1979, p. 5.
12. Einstein, "Autobiographical Notes", in Schilpp, 1969, p. 11.
13. *Ibid.*, p. 5.
14. In French, 1979, p. 31.
15. In John Stachel, "Albert Einstein: The Man Behind the Myths", cópia original.
16. Einstein, "Autobiographical Notes", in Schilpp, 1969, p. 9.
17. *Ibid.*, p. 35.
18. In Goldman, 1983, p. 138.
19. *Ibid.*, p. 146.
20. Einstein, "Autobiographical Notes", in Schilpp, 1969, p. 33.
21. *Ibid.*, p. 53.
22. Adams, 1931, p. 380.
23. In Miller, 1981, p. 145.
24. Sigmund Freud, "Memorandum on the Electrical Treatment of War Neurotics", in Strachey, 1955, p. 211.
25. Einstein, carta a Grossman, 1901, in Stachel, 1987, p. 290.
26. In Szilard, 1978, p. 12.
27. In Seelig, 1956, p. 71.
28. In Miller, 1981, p. 125.
29. Mach, 1960, p. 279.
30. In Pais, 1982, p. 201.
31. Einstein, "On the Electrodynamics of Moving Bodies", in Miller, 1981, p. 392.
32. In Hoffmann, 1972, p. 131.
33. In Pais, 1982, p. 179.
34. *Ibid.*, p. 152.
35. In Rucker, 1984, pp. 66, 68.
36. In Davis e Hersh, 1981, p. 221.
37. In Hoffmann, 1983, p. 129.
38. Hoskin, 1982, p. 83.
39. In Needham, *Science and Civilization in China*, vol. 2, p. 388.
40. Lucretius, *De Rerum Natura*, Livro I, 1.012 ss., trad. Cyril Bailey, p. 227.
41. In Cohen e Seeger, 1970, p. 181.

42. In Rosenthal-Schneider, 1980, p. 74.

43. In French, 1979, p. 31.

44. In Holton e Elkana, 1982, p. 104.

A EXPANSÃO DO UNIVERSO

A natureza vive em movimento.

James Hutton

Os olhos deviam aprender com a razão.

Kepler

Quando Einstein começou a investigar as implicações cosmológicas da teoria geral da relatividade, descobriu algo estranho e perturbador: a teoria deixava implícito que o universo como um todo não podia ser estático, mas sim teria de estar ou expandindo-se, ou contraíndo-se. Era uma idéia totalmente nova, para a qual não havia, na época, nenhuma evidência observacional. Os astrónomos que consultou informaram a Einstein que as estrelas vagueiam mais ou menos aleatoriamente pelo espaço, mas não revelam nenhum movimento conjunto que sugerisse uma expansão ou uma contração cósmica. Frente a essa discordância entre sua teoria e os dados empíricos, Einstein concluiu, com relutância, que devia haver alguma coisa errada com a teoria, e modificou suas equações, acrescentando um termo que chamou de constante cosmológica. Simbolizado pela letra grega lambda, o novo termo pretendia fazer com que o raio do universo se mantivesse estável com o passar do tempo.

Einstein nunca teve simpatia para com a constante cosmológica. Considerou-a "gravemente prejudicial à beleza formal da teoria", observando que nada mais era do que uma ficção matemática, sem qualquer base física real, e que tinha sido introduzida apenas para colocar a teoria de acordo com os fatos da observação. Como escreveu em 1917:

Reconhecemos ter sido necessário introduzir uma extensão das equações de campo da gravitação que não se justifica pelo nosso conhecimento real da gravitação... Esse termo é necessário apenas com a finalidade de tornar