

PEDRO G. FERREIRA

A teoria perfeita

Uma biografia da relatividade

Tradução

Érico Assis



Copyright © 2014 by Pedro G. Ferreira

*Grafia atualizada segundo o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990,
que entrou em vigor no Brasil em 2009.*

Título original

The Perfect Theory: A Century of Geniuses and the Battle over General Relativity

Capa

Elaine Ramos

Revisão técnica

Rogério Rosenfeld

Preparação

Alexandre Boide

Índice remissivo

Luciano Marchiori

Revisão

Valquíria Della Pozza

Angela das Neves

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Ferreira, Pedro G.

A teoria perfeita : Uma biografia da relatividade / Pedro G. Ferreira ; tradução Érico Assis. — 1^a ed. — São Paulo : Companhia das Letras, 2017.

Título original: The Perfect Theory : A Century of Geniuses and the Battle over General Relativity.

Bibliografia

ISBN 978-85-359-2809-9

1. Ciências – História 2. Einstein, Albert, 1879-1955 3. Física – História 4. Físicos – Biografia 5. Relatividade geral (Física) – História – Século 20 1. Título.

16-06906

CDD-530.11

Índice para catálogo sistemático:

1. Teoria da relatividade geral : Física 530.11

[2017]

Todos os direitos desta edição reservados à

EDITORASCHWARCZ S.A.

Rua Bandeira Paulista, 702, cj. 32

04532-002 — São Paulo — SP

Telefone: (11) 3707-3500

Fax: (11) 3707-3501

www.companhiadasletras.com.br

www.blogdacompanhia.com.br

facebook.com/companhiadasletras

instagram.com/companhiadasletras

twitter.com/cialetras

Sumário

| | |
|--|-----|
| <i>Prólogo</i> | 9 |
| 1. Se uma pessoa em queda livre.... | 19 |
| 2. A mais valiosa das descobertas | 33 |
| 3. Matemática correta, física abominável | 53 |
| 4. Estrelas em colapso | 78 |
| 5. Totalmente abilolado | 102 |
| 6. A era do rádio | 125 |
| 7. Wheelerismos | 144 |
| 8. Singularidades | 167 |
| 9. Agruras da unificação | 191 |
| 10. Enxergando a gravidade | 210 |
| 11. O universo escuro | 237 |
| 12. O fim do espaço-tempo | 263 |
| 13. Uma extração espetacular | 283 |
| 14. Algo está para acontecer | 300 |
| <i>Agradecimentos</i> | 317 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| <i>Notas</i> | 319 |
| <i>Bibliografia</i> | 337 |
| <i>Índice remissivo</i> | 355 |

Prólogo¹

Quando Arthur Eddington se pronunciou durante a reunião conjunta da Royal Society e da Royal Astronomical Society, em 6 de novembro de 1919, sua fala derrubou sem grande alarde o paradigma reinante da física gravitacional. Em seu tom solene e monótono, o astrônomo de Cambridge descreveu sua viagem à pequena e exuberante ilha de Príncipe, em São Tomé e Príncipe, na costa oeste da África, onde havia armado um telescópio e tirado fotos de um eclipse total do Sol, com atenção particular a um aglomerado de estrelas de luz fraca dispersas atrás do eclipse. Partindo de medidas das posições das estrelas, Eddington descobriria que a teoria da gravidade inventada pelo santo padroeiro da ciência britânica, Isaac Newton, aceita como verdade havia mais de dois séculos, estava errada. Em seu lugar, afirmava ele, deveria valer uma nova teoria proposta por Albert Einstein, essa sim correta, conhecida como “teoria da relatividade geral”.

À época, a teoria de Einstein já era conhecida tanto pelo potencial para explicar o universo como pela incrível complexidade. Após a cerimônia, enquanto plateia e palestrantes se preparavam

para encarar a noite londrina, um físico polonês chamado Ludwik Silberstein caminhou timidamente até Eddington. Silberstein já havia escrito um livro sobre a teoria de Einstein e acompanhara a apresentação daquela noite com muito interesse. Ele declarou: “Professor Eddington, o senhor deve ser uma das três únicas pessoas no mundo que conseguem compreender a relatividade geral”. Como Eddington demorou a responder, ele acrescentou: “Deixe de modéstia, Eddington”.

Eddington encarou-o e disse: “Pelo contrário, estou tentando imaginar quem seria a terceira pessoa”.

À época em que descobri a teoria da relatividade geral de Einstein, a contagem de Silberstein provavelmente devia estar ajustada para mais, mas não muito mais. Foi no início dos anos 1980, quando vi Carl Sagan no programa de tv *Cosmos* falando que tempo e espaço podiam encolher ou esticar. Imediatamente pedi a meu pai para explicar a teoria. Ele só conseguiu me dizer que era uma teoria muito, muito difícil. “Praticamente ninguém entende de relatividade geral”, ele contou. Eu não me deixei dissuadir. Havia algo de muito atraente naquela teoria bizarra, com suas matrizes distorcidas em que o espaço-tempo envolvia despenha-deiros profundos e desolados do mais absoluto nada. Eu via a relatividade geral em funcionamento nos velhos episódios de *Jornada nas Estrelas*, quando a Enterprise viajava no tempo ao encontrar uma “estrela negra”, ou quando James T. Kirk se debatia entre as dimensões do espaço-tempo. Seria mesmo tão difícil assim entender?

Alguns anos depois entrei na universidade, em Lisboa, onde estudei engenharia dentro de um monólito de pedra, ferro e vidro, exemplo perfeito da arquitetura fascista do regime salazarista. A ambientação era adequada às aulas infindáveis, em que nos ensinavam aquilo que era considerado útil: como construir computadores, pontes e máquinas. Alguns de nós conseguíamos fugir

da vida maçante lendo sobre física moderna em nosso tempo livre. Todos queríamos ser Albert Einstein. As ideias dele apareciam uma vez ou outra em nossas aulas. Aprendemos que a energia está relacionada à massa e que a luz é constituída por partículas. Quando chegou a hora de estudar ondas eletromagnéticas, fomos apresentados à teoria einsteiniana da relatividade especial. Ele a concebera em 1905, com apenas 26 anos, não muito mais velho que nós. Um dos nossos professores mais esclarecidos recomendou que lêssemos os artigos originais de Einstein. Eram pequenas joias em termos de concisão e clareza, em comparação com exercícios tediosos que nos passavam. Mas a relatividade geral, a grandiosa teoria einsteiniana do espaço-tempo, estava fora do cardápio.

Em algum momento decidi que ia aprender relatividade geral. Esquadrinhei a biblioteca da universidade e encontrei uma coleção impressionante de monografias e cartilhas de alguns dos grandes físicos e matemáticos do século xx. Lá estavam Arthur Eddington, o astrônomo real de Cambridge; Herman Weyl, o geômetra de Gottingen; Erwin Schrödinger e Wolfgang Pauli, dois dos pais da física quântica — cada um com sua versão de como ensinar a teoria de Einstein. Um dos tomos parecia uma lista telefônica grande e preta, com mais de mil páginas de floreios e comentários de um trio de relativistas de Princeton. Outro, escrito pelo físico quântico Paul Dirac, mal chegava a magras setenta páginas. Achei que havia adentrado em um universo totalmente novo, habitado por personagens fascinantes.

Entender aquelas ideias não era fácil. Tive que aprender sozinho a pensar de uma maneira totalmente nova para mim, apoiando-me no que de início parecia geometria ardilosa e matemática obscura. Para decodificar a teoria de Einstein, era preciso dominar um idioma matemático estrangeiro. Mal sabia eu que o próprio Einstein fizera o mesmo para tentar entender sua própria

teoria. Assim que entendi o vocabulário e a gramática, fiquei estarrado com tudo a que a teoria me dava acesso. E assim começou um caso de amor vitalício com a relatividade geral.

Parece o maior dos exageros, mas não consigo resistir: a gratificação em domar a teoria da relatividade geral de Albert Einstein é nada menos que a chave para entender a história do universo, a origem do tempo e a evolução de todas as estrelas e galáxias no cosmos. A relatividade geral pode nos dizer o que existe nos confins mais distantes do universo e explicar como o conhecimento afeta nossa existência aqui e agora. A teoria de Einstein também lança luz sobre as menores escalas da existência, nas quais as partículas de maior energia podem vir a existir do nada. Pode explicar como a trama da realidade, do espaço e do tempo emerge para se tornar a espinha dorsal da natureza.

O que aprendi naqueles meses de estudo intenso foi que a relatividade geral dá vida ao tempo e ao espaço. O espaço deixa de ser apenas um lugar onde existem coisas, assim como o tempo não é só um relógio que controla o horário de cada coisa. De acordo com Einstein, espaço e tempo estão entrelaçados em uma dança cósmica porque reagem a cada pedacinho imaginável do todo, desde partículas até galáxias, urdindo-se em padrões complexos que podem levar aos efeitos mais bizarros. E, desde o instante em que ele a propôs, sua teoria tem sido usada para explorar o mundo natural e revelar o universo como um local dinâmico, que se expande a uma velocidade acachapante, tomado de buracos negros, furos aniquiladores no espaço e no tempo e grandes ondas de energia, cada uma portando quase tanta energia quanto uma galáxia inteira. A relatividade geral permitiu-nos chegar mais longe do que algum dia imaginamos.

Outra coisa me marcou quando aprendi relatividade geral. Embora Einstein tenha levado pouco menos de uma década para desenvolver a ideia, desde então ela segue imutável. Há um século

é considerada por muitos a teoria perfeita, uma fonte de admiração profunda a quem tem o privilégio de se deparar com ela. A relatividade geral se tornou icônica por sua resiliência, por ser uma peça central do pensamento moderno e um colosso das façanhas culturais nos moldes da Capela Sistina, das suítes para violoncelo de Bach ou de um filme de Antonioni. A relatividade geral pode ser sintetizada sucintamente em um conjunto de equações e regras fáceis de resumir e de anotar. E elas não são apenas lindas — também dizem muito sobre o mundo real. Já foram utilizadas para fazer previsões sobre o universo que se provaram via observação, e acredita-se firmemente que no fundo da relatividade geral estão enterrados mais segredos profundos sobre o universo que ainda precisam vir à tona. O que mais eu poderia querer?

Durante quase 25 anos, a relatividade geral tem sido parte da minha vida cotidiana. Está no cerne de boa parte das minhas pesquisas e sustenta muito do que eu e meus colaboradores tentamos entender. Minha primeira experiência com a teoria de Einstein está longe de ser única; já conheci gente do mundo inteiro fisgada por essa teoria, que dedicou a vida a desvendar seus segredos. E estou falando realmente do mundo inteiro. De Kinshasa a Cracóvia, e de Canterbury a Santiago, sempre recebo artigos científicos nos quais os autores tentam encontrar soluções novas ou mesmo possíveis modificações na relatividade geral. Pode ser difícil entender a teoria de Einstein, mas ela ainda é democrática; de sua própria dificuldade e austeridade se depreende que ainda há muito a fazer antes que todas as suas implicações sejam expostas. Há oportunidades para qualquer pessoa com caneta, papel e vigor.

Muitas vezes ouvi orientadores de doutorado dizerem aos alunos para não trabalhar com a relatividade geral, por medo de que isso os torne inempregáveis. Para muitos, é uma teoria herética demais. Dedicar a vida à relatividade geral sem dúvida é

algo que se faz por paixão, uma vocação que beira a irresponsabilidade. Mas, quando a pessoa é mordida por esse bicho, torna-se praticamente impossível deixar a relatividade para trás. Recentemente conheci um dos luminares dos modelos de mudanças climáticas — pioneiro na sua área, *fellow* da Royal Society, especialista em fazer previsões atmosféricas e climáticas em um campo de pesquisa que continua diabolicamente complicado. Ele não trabalhou a vida inteira nisso. Aliás, quando jovem, nos anos 1970, estudava a relatividade geral. Foi há quase quarenta anos, mas, quando nos conhecemos, ele me disse com um sorriso torto: “Na verdade, sou um relativista”.

Tenho um amigo que abandonou o mundo acadêmico há um bom tempo, depois de trabalhar quase vinte anos com a teoria de Einstein. Hoje trabalha para uma empresa de softwares, criando e instalando mecanismos para armazenamento de enormes quantidades de dados. Passa a semana viajando mundo afora para configurar sistemas caríssimos e de alta complexidade em bancos, grandes empresas e entidades governamentais. Quando nos encontramos, contudo, ele sempre quer me perguntar da teoria de Einstein, ou compartilhar comigo suas últimas ideias sobre a relatividade geral. Ele não consegue largar o osso.

Uma das coisas que sempre me deixaram perplexo em relação à relatividade geral é que, apesar de existir há quase um século, a teoria continua rendendo resultados novos. Seria de esperar que, dado o calibre dos cientistas que se dedicaram a ela, a teoria estivesse esgotada há décadas. Por mais complexa que seja, não haveria um limite ao que ela pode nos dar? Buracos negros e o universo em expansão já não bastam? Mas, como sigo me debatendo com as ideias que saem da teoria de Einstein e encontrando muitas mentes brilhantes que trabalharam com ela, me ocorre que a história da relatividade geral é uma narrativa fascinante e magnífica, talvez tão complexa quanto a teoria em si. A chave pa-

ra entender por que a teoria permanece tão viva é seguir as tribulações por que passou ao longo de seu século de existência.

Este livro é a biografia da relatividade geral. A ideia de Einstein a respeito de como tempo e espaço se unem ganhou vida própria e, ao longo do século xx, foi fonte de prazeres e desprazeres para mentes que têm lugar entre as mais brilhantes do mundo. A relatividade geral é uma teoria que constantemente lança surpresas, ideias mirabolantes sobre o mundo natural que mesmo Einstein tinha dificuldade em aceitar. Conforme foi passando de cabeça para cabeça, novas e inesperadas descobertas surgiram em situações das mais estranhas. Buracos negros foram concebidos pela primeira vez nos campos de batalha da Primeira Guerra Mundial e chegaram à maturidade nas mãos dos pioneiros das bombas atômicas — *tanto* a americana *como* a soviética. A expansão do universo foi proposta inicialmente por um padre belga e um matemático e meteorologista russo. Objetos astrofísicos novos e estranhos que tiveram papel crucial para fundar a relatividade geral foram descobertos por acaso. Jocelyn Bell descobriu estrelas de nêutrons nos charcos de Cambridge usando tela de arame amarrada a uma estrutura capenga de madeira e pregos.

A teoria da relatividade geral também esteve no cerne de algumas das maiores batalhas intelectuais do século xx. Foi alvo de perseguição na Alemanha de Hitler, caçada na Rússia de Stálin, e desprezada nos Estados Unidos dos anos 1950. Colocou alguns dos grandes nomes da física e da astronomia em uma disputa pela busca da teoria definitiva do universo. As contendas se deram em torno de o universo ter começado com uma explosão ou sempre ter sido eterno, além da estrutura fundamental do espaço e do tempo. A teoria também uniu comunidades distantes; em meio à Guerra Fria, cientistas soviéticos, britânicos e norte-americanos se juntaram para resolver o problema da origem dos buracos negros.

A história da relatividade geral não está restrita ao passado. Nos últimos dez anos, ficou aparente que, caso a relatividade geral esteja correta, a maior parte do universo é escura, preenchida por uma coisa que não apenas não emite luz, mas também não a reflete nem absorve. As provas observáveis são abundantes. Quase um terço do universo é constituído aparentemente por matéria escura, uma coisa pesada e invisível que se enxameia pelas galáxias como uma nuvem de abelhas raivosas. Os outros dois terços têm a forma de uma substância etérea, a energia escura, que tensiona o espaço. Apenas 4% do universo é composto das coisas com que temos familiaridade: átomos. Somos insignificantes. Isso se a teoria de Einstein estiver correta. É possível que estejamos chegando ao limite da relatividade geral e que a teoria de Einstein comece a fraquejar.

A teoria de Einstein também é essencial para a nova teoria fundamental da natureza, que tantas disputas acaloradas vem causando entre os físicos teóricos. A teoria das cordas, que tenta superar Newton e Einstein unificando *tudo que há na natureza*, depende de espaço-tempos complicados com propriedades geométricas estranhas em dimensões mais elevadas. Ainda mais hermética que a teoria de Einstein, é aclamada por alguns como teoria definitiva e ridicularizada por outros como ficção romântica, que nem mesmo merece ser chamada de ciência. Tal como um culto sectário, a teoria das cordas não existiria se não fosse a teoria da relatividade geral, porém é vista com ceticismo por muitos relativistas praticantes.

A matéria escura, a energia escura, os buracos negros e a teoria das cordas são todos crias da teoria de Einstein, e são predominantes na física e na astronomia. Dando palestras em universidades, vou a congressos ou participo de reuniões na Agência Espacial Europeia, responsável por alguns dos satélites científicos mais importantes do mundo, passei a perceber que estamos em

meio a uma transformação monumental na física moderna. Temos jovens cientistas de talento examinando a relatividade geral com um conhecimento que se apoia em um século de gênios. Eles exploram a teoria de Einstein se valendo de uma potência computacional nunca antes vista, buscando teorias alternativas da gravidade que possam destronar a de Einstein, e procurando objetos exóticos no cosmos que poderiam confirmar ou refutar os princípios fundamentais da relatividade geral. Ao mesmo tempo, a comunidade científica em geral vê-se estimulada a construir máquinas colossais para enxergar o espaço à maior distância e com mais clareza do que nunca, satélites que partirão em busca das previsões mirabolantes que a relatividade geral aparentemente nos deixou de legado.

A história da relatividade geral é magnífica, abrangente e precisa ser contada. Afinal, já adentrados no século XXI, estamos nos deparando com muitas de suas grandes descobertas e perguntas sem respostas. Algo de realmente importante vai acontecer nos próximos anos, e precisamos entender de onde vem isso tudo. Desconfio que, se o século XX foi o século da física quântica, o XXI proporcionará um terreno fértil para a teoria da relatividade geral de Einstein.

1. Se uma pessoa em queda livre...

Albert Einstein estava sob pressão no segundo semestre de 1907. Ele fora convidado a entregar a explanação definitiva de sua teoria da relatividade ao *Yearbook of Electronics and Radioactivity* [Anuário de Eletrônica e Radioatividade]. Não era pouca coisa resumir uma obra tão importante em prazo tão curto, especialmente porque era algo que ele só poderia fazer em seu tempo livre. Das oito da manhã às seis da tarde, de segunda-feira a sábado, Einstein trabalhava no Instituto Federal de Propriedade Intelectual em Berna, no recém-construído Prédio dos Correios e Telégrafos, onde revisavameticulosamente planos de engenhocas elétricas de última geração e avaliava se possuíam algum mérito. Seu chefe aconselhara: “Quando pegar um formulário, considere que tudo que o inventor afirmou está errado”.¹ Ele seguia o conselho à risca. Na maior parte do dia, as anotações e os cálculos de suas teorias e descobertas tinham que ser relegados à segunda gaveta de sua escrivaninha, batizada de “gabinete de física teórica”.

A explanação recapitularia a união triunfante que ele fizera da antiga mecânica de Galileu Galilei e Isaac Newton com as no-

vidades no campo da eletricidade e do magnetismo de Michael Faraday e James Clerk Maxwell. Explicaria boa parte das estranhanças que Einstein havia descoberto alguns anos antes, por exemplo, que um relógio andava mais devagar se estivesse em movimento, ou que objetos encolhiam quando em alta velocidade. Explicaria sua fórmula estranha e mágica, mostrando que a massa e a energia eram intercambiáveis, e que nada podia ser mais rápido que a velocidade da luz. Sua explanação do princípio da relatividade revelaria que quase toda a física deveria ser gerida por um novo conjunto de regras em comum.

Em 1905, ao longo de um período de poucos meses, Einstein escrevera uma sequência de artigos que já vinham transformando o estudo da física. Nesse surto de inspiração, ele afirmara que a luz se comporta como feixes de energia, tal como partículas de matérias. Também havia demonstrado que as trajetórias conturbadas e caóticas de pólen e poeira que adernam por um prato de água podiam advir do tumulto nas moléculas d'água, que quicam e vibram em contato umas com as outras. E havia encarado um problema que atormentava físicos fazia quase meio século: o fato de as leis da física parecerem se comportar de maneira distinta a depender do ponto de vista do observador. Ele reunira tudo em seu princípio da relatividade.

Todas essas descobertas já compunham uma façanha assombrosa, e Einstein as fizera enquanto trabalhava como analista técnico do instituto suíço de patentes em Berna, peneirando os avanços científicos e tecnológicos de sua época. Em 1907, ele ainda trabalhava lá, sem conseguir acesso ao fechado mundo acadêmico, que parecia se esquivar dele. Aliás, para alguém que havia acabado de reescrever as leis fundamentais da física, Einstein não tinha absolutamente nada de especial. Em seus estudos no Instituto Politécnico de Zurique, fora um aluno inexpressivo que matava as aulas que não lhe interessavam e hostilizava justamente

aqueles que podiam fomentar seu gênio. Um de seus professores lhe disse: “Você é um garoto muito esperto... Mas tem um grande defeito: nunca deixa que lhe digam o que fazer”.² Quando o orientador de Einstein não deixou que ele trabalhasse num tema de sua escolha, Einstein entregou um trabalho final requerido, o que reduziu sua nota a ponto de se tornar inapto ao cargo de assistente em todas as universidades na qual se inscreveu.

Desde sua formatura, em 1900, até conseguir o emprego no instituto de patentes, em 1902, a carreira de Einstein foi uma sequência de fracassos. Para agravar sua frustração, a tese de doutorado que entregara à Universidade de Zurique em 1901 foi recusada um ano depois. Nela, Einstein estava determinado a demolir algumas das propostas de Ludwig Boltzmann, um dos grandes físicos teóricos do final do século XIX. A demonstração de iconoclastia não caiu bem. Foi só em 1905, quando ele apresentou um de seus artigos revolucionários, “Sobre uma nova determinação das dimensões moleculares”, que finalmente obteve seu doutorado. O diploma, descobriu o agora polido Einstein, “facilita consideravelmente as relações com as pessoas”.³

Enquanto Einstein seguia um caminho tortuoso, seu amigo Marcel Grossmann escalava a passos rápidos os degraus da carreira acadêmica rumo ao posto de professor catedrático. Organizado, estudioso e amado por seus tutores, Grossmann salvava Einstein de sair dos trilhos, mantendo cadernos com anotações claras e minuciosas das aulas. Grossmann virou amigo muito próximo de Einstein e sua futura esposa, Mileva Marić, quando eram estudantes em Zurique, e os três se formaram no mesmo ano. Ao contrário de Einstein, a carreira de Grossman vinha progredindo sem sustos desde então. Ele fora nomeado assistente em Zurique, e, em 1902, conseguira seu doutorado. Depois de um curto período lecionando no ensino médio, Grossmann virou

professor de geometria descritiva na Eidgenössische Technische Hochschule, conhecida como ETH, em Zurique. Einstein não conseguira ser indicado nem para professor de colégio. Foi só por meio da recomendação do pai de Grossmann a um conhecido, o diretor do instituto de patentes em Berna, que Einstein finalmente garantia o emprego de analista técnico.

O emprego de Einstein no instituto de patentes foi uma bênção. Depois de anos de instabilidade financeira e de dependência do pai para obter uma renda, ele enfim conseguiu se casar com Mileva e formar uma família em Berna. A monotonia relativa do escritório de patentes, com suas tarefas bem definidas e distração zero, parecia ser ambiente ideal para reflexões profundas. O trabalho designado a Einstein tomava apenas algumas horas por dia, o que lhe deixava tempo para se concentrar em seus quebra-cabeças. Sentado na mesinha de madeira com poucos livros e os artigos de seu “gabinete de física teórica”, ele realizava experimentações mentais. Nesses experimentos (*gedankenexperimenten*, como os chamava em alemão), Einstein imaginava situações e construções nas quais extrapolava as leis físicas para descobrir o que poderiam causar no mundo real. Na falta de um laboratório de verdade, ele criava jogos cuidadosamente articulados em sua mente, encenando acontecimentos que eram analisados em detalhes. Com o resultado desses experimentos, Einstein usava seu respeitável conhecimento em matemática para pôr as ideias no papel, criando joias de lapidação requintada que mudariam os rumos da física.

Seus chefes no instituto de patentes estavam contentes com o trabalho de Einstein e o promoveram a analista técnico de segunda classe, mas continuaram indiferentes a sua crescente reputação nos meios acadêmicos. Einstein ainda tinha sua cota diária de patentes a analisar em 1907, quando o físico alemão Johanness Stark convidou-o a escrever sua explanação “Sobre o princípio da

relatividade e suas implicações”. Ele tinha dois meses para escrever, e foi durante esse período que Einstein percebeu que o princípio da relatividade estava incompleto. Seria necessária uma reformulação completa para que sua teoria fosse geral *de fato*.

O artigo no *Yearbook* seria um resumo do princípio da relatividade original de Einstein. O princípio afirma que as leis da física deveriam ser as mesmas em qualquer sistema de referencial inercial. A ideia principal por trás do princípio não era nova e circulava havia séculos.

As leis da física e da mecânica são regras para determinar como as coisas se mexem, ganham velocidade ou perdem velocidade quando sujeitas a forças. No século XVII, o físico e matemático inglês Isaac Newton expôs um conjunto de leis para tratar de como os objetos reagem a forças mecânicas. Suas leis do movimento explicam de forma consistente o que acontece quando duas bolas de bilhar se chocam, ou quando uma bala é disparada de um revólver, ou quando uma bola é jogada para cima.

Um sistema de referencial inercial é aquele que se move a velocidade constante. Se você está lendo este livro em um local estacionário, como uma poltrona em sua sala ou uma mesa de um café, está num sistema inercial. Outro exemplo clássico é o do trem que corre pelos trilhos suavemente com as janelas fechadas. Se a pessoa está sentada lá dentro, assim que o trem adquire velocidade não há como saber se está em movimento. Em princípio, deveria ser impossível ver a diferença entre dois sistemas inerciais mesmo que um esteja em alta velocidade e o outro, em repouso. Se você fizer um experimento que mede as forças que agem sobre um objeto, deverá ter o mesmo resultado que em outro sistema inercial. As leis da física são idênticas, independentemente do sistema.

O século XIX trouxe um conjunto totalmente novo de leis que entrelaçou duas forças fundamentais: eletricidade e magnetismo. À primeira vista, eletricidade e magnetismo parecem dois fenômenos distintos. Vemos eletricidade nas luzes da nossa casa ou nos raios do céu, e o magnetismo em ímãs colados na nossa geladeira ou no polo Norte, que atrai a agulha da bússola. O físico escocês James Clerk Maxwell demonstrou que as duas forças podiam ser vistas como manifestações distintas de uma força subjacente, o eletromagnetismo, e a forma como eram percebidas dependia da movimentação do observador. Uma pessoa sentada perto de um ímã sentiria magnetismo, mas não eletricidade. Por sua vez, uma pessoa que passasse correndo sentiria não só o magnetismo, mas também um pouquinho de eletricidade. Maxwell unificou as duas forças em uma que permanece equivalente qualquer que seja a posição ou a velocidade do observador.

Ao tentar combinar as leis do movimento de Newton com as leis do eletromagnetismo de Maxwell, surgem problemas. Se o mundo obedece de fato a esses dois grupos de leis, é possível, em princípio, construir um instrumento com ímãs, fios e polias que não sentirá força alguma em um sistema inercial, mas poderá registrar uma força em outro sistema inercial, violando a regra de que sistemas inerciais deveriam ser indistintos um do outro. As leis de Newton e as leis de Maxwell parecem inconsistentes entre si. Einstein queria consertar essas “assimetrias” nas leis da física.⁴

Nos anos anteriores a seus artigos de 1905, Einstein concebeu seu princípio conciso da relatividade através de uma série de experimentos mentais voltados a resolver o problema. Sua engenhosidade abstrata culminou em dois postulados. O primeiro era apenas uma reafirmação do princípio: as leis da física devem parecer as mesmas em qualquer sistema inercial. O segundo postulado era mais radical: em *qualquer* sistema inercial, a velocidade da luz sempre tem o mesmo valor, que é de 299 792 quilômetros

por segundo. Tais postulados poderiam ser usados para ajustar as leis do movimento e mecânica de Newton de forma que, quando se combinassem às leis do eletromagnetismo de Maxwell, os sistemas iniciais ficariam totalmente indistintos. O novo princípio da relatividade de Einstein também levou a resultados inesperados.

O postulado seguinte exigia alguns ajustes às leis de Newton. No universo newtoniano clássico, a velocidade é cumulativa. A luz emitida da frente de um trem em movimento se desloca mais depressa que a luz que vem de um ponto estacionário. No universo de Einstein, as coisas não funcionam mais assim. Em vez disso, existe um limite de velocidade cósmica fixado em 299 792 quilômetros por segundo. Nem o foguete mais potente conseguiria romper tal limite. Isso produz desdobramentos notáveis. Por exemplo: uma pessoa num trem que se movimenta a uma velocidade próxima à da luz envelhecerá mais devagar quando observada por alguém sentado numa estação e que vê o trem passar. E o trem em si vai parecer mais curto quando estiver em movimento do que quando parado. O tempo se dilata e o espaço se contrai. Esses fenômenos estranhos são sinais de que algo muito profundo está acontecendo: no mundo da relatividade, tempo e espaço estão entrelaçados e são intercambiáveis.

Com seu princípio da relatividade, Einstein parecia ter simplificado a física, apesar dos desdobramentos estranhos. Mas, no segundo semestre de 1907, quando Einstein foi escrever sua explanação, foi obrigado a admitir que, embora sua teoria aparentemente funcionasse bem, ainda não estava completa. A teoria da gravidade de Newton não se encaixava no seu retrato da relatividade.

Antes do aparecimento de Albert Einstein, Isaac Newton era uma espécie de deus no mundo da física. A obra de Newton era

tida como o sucesso mais estrondoso do pensamento moderno. No final do século XVII, ele havia unificado a força da gravidade, que agia da mesma maneira sobre os corpos muito pequenos e sobre os muito grandes em uma equação simples, que explicava tanto o cosmos como a vida cotidiana.

A lei da atração universal de Newton, ou “lei do inverso do quadrado”, é das mais simples que há. Ela afirma que a atração gravitacional entre dois objetos é diretamente proporcional à massa de cada objeto e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Portanto, ao duplicar a massa de um dos objetos, a atração gravitacional também duplica. E, se for duplicada a distância entre os dois objetos, a atração *diminui* por um fator de quatro. Ao longo de dois séculos, a lei de Newton continuou rendendo explicações de fenômenos físicos variados. Ela se provou espetacular não apenas para explicar órbitas de planetas conhecidos, mas também para prever a existência de outros.

Desde fins do século XVIII, havia pistas de que a órbita do planeta Urano tinha uma oscilação misteriosa. À medida que os astrônomos acumulavam observações da órbita de Urano, aos poucos conseguiam mapear sua trajetória no espaço com precisão cada vez maior. Prever a órbita de Urano não foi um exercício simples. Foi necessário usar a lei da gravidade de Newton e descobrir como os outros planetas influenciavam o movimento de Urano, exigindo ajustes para lá e para cá, o que deixa sua órbita um pouquinho mais complicada. Astrônomos e matemáticos publicavam as órbitas em forma de tabelas que previam, em dias e anos distintos, onde Urano ou qualquer outro planeta estaria no céu. E, quando comparavam suas previsões com observações subsequentes da posição real de Urano, sempre havia uma discrepância que não sabiam explicar.

O astrônomo e matemático francês Urbain Le Verrier era particularmente hábil em calcular órbitas celestiais e descobrir as

órbitas de vários planetas no sistema solar. Quando concentrou sua atenção em Urano, partiu do pressuposto de que a teoria de Newton fosse *perfeita*, já que funcionava bem no caso dos outros planetas. Se a teoria de Newton estava correta, depreendeu ele, a única outra possibilidade era a existência de algo que não fora levado em conta. Le Verrier, então, deu o passo ousado de prever a existência de um planeta novo, hipotético, e de criar sua própria tabela astronômica. Para sua alegria, um astrônomo alemão de Berlim, Gottfried Galle, apontou seu telescópio para a direção que a tabela de Le Verrier indicava e viu um planeta grande e desconhecido tomar forma no seu campo de visão. Como Galle expôs em carta a Le Verrier: “Monsieur, o planeta cuja posição o senhor indicou existe de fato”.

Le Verrier deu um passo a mais na teoria de Newton em relação a todos que o precediam e foi bem recompensado pela ou-sadia. Netuno ficou conhecido durante décadas como “planeta de Le Verrier”. Marcel Proust usou a descoberta de Le Verrier como analogia para revelar a corrupção em seu *Em busca do tempo perdido*,⁵ e Charles Dickens se referiu a ele ao descrever o trabalho vigoroso dos investigadores em seu conto “The Detective Police”.⁶ Era um belo exemplo de uso das regras fundamentais da dedução científica. Le Verrier, gozando da glória de sua descoberta, voltou sua atenção para Mercúrio. O planeta também parecia ter uma órbita incomum e inesperada.

Na gravidade newtoniana, um planeta isolado que gira em torno do Sol segue uma órbita simples e fechada na forma de um círculo achatado, conhecido como elipse. O planeta dará voltas e voltas, seguindo infinitamente o mesmo trajeto, de tempos em tempos se aproximando e depois se distanciando do Sol. O ponto na órbita em que o planeta fica mais próximo do Sol — chamado de periélio — é constante. Alguns planetas, como a Terra, têm órbitas quase circulares — a elipse mal chega a ser achatada —,

enquanto outros, como Mercúrio, seguem trajetos bem mais elípticos.

Mesmo levando em consideração o efeito de todos os outros planetas na órbita de Mercúrio, Le Verrier descobriu que a órbita real do planeta não batia com as previsões da gravidade newtoniana; o periélio variava em aproximadamente quarenta segundos de arco por século. (Um segundo de arco é uma unidade de medida angular; o domo completo do céu é constituído de aproximadamente 1,3 milhão de segundos de arco, ou 360 graus). Tal anomalia, conhecida como precessão do periélio de Mercúrio, Le Verrier não conseguia explicar a partir da aplicação das regras de Newton. Havia outra coisa envolvida.

Mais uma vez, Le Verrier presumiu que Newton tinha que estar certo, e assim, em 1859, conjecturou que um novo planeta, Vulcano, mais ou menos do tamanho de Mercúrio, devia existir muito próximo do Sol. Foi uma conjectura ousada, bizarra. Como ele próprio admitiu: “Como que um planeta, extremamente claro e sempre próximo do Sol, não seria identificado durante um eclipse total?”⁷

A conjectura de Le Verrier desatou uma corrida para descobrir o novo planeta Vulcano. Nas décadas seguintes, por vezes se relataram visões de um objeto próximo ao Sol, mas nenhum deles se sustentava para análise. Embora a busca por Vulcano não tenha se encerrado com a morte de Le Verrier, a precessão do periélio de Mercúrio permaneceu firmemente arraigada no folclore astronômico. Alguma coisa que não fosse um planeta invisível teria que explicar a anomalia de quarenta segundos de arco.

Quando Einstein parou para analisar a gravidade, em 1907, teve que conciliar a teoria de Newton com seu princípio da relatividade. Como uma preocupação secundária, ele sabia que também precisaria explicar a órbita anômala de Mercúrio. Seria uma tarefa árdua.

* * *

A gravidade tal como explicada por Newton viola os dois postulados do belo e conciso princípio da relatividade de Einstein. Para começar, na teoria de Newton, o efeito da gravidade é instantâneo. Se dois objetos se encontram repentinamente um perto do outro, a força da gravidade entre eles entraria imediatamente em efeito — não precisaria de tempo para viajar de um objeto ao outro. Mas como isso é possível se, de acordo com o novo princípio da relatividade de Einstein, nada, nenhum sinal, nenhum efeito, pode se movimentar mais rápido que a velocidade da luz? Igualmente crucial e irritante era o fato de que, embora harmonizasse mecânica e eletromagnetismo, o princípio da relatividade de Einstein deixava a lei da gravidade de Newton de fora. A gravidade newtoniana parecia diferente em sistemas inerciais distintos.

O primeiro passo de Einstein em sua longa jornada para redefinir a gravidade e generalizar sua teoria da relatividade surgiu no dia em que estava à sua mesa no instituto de patentes de Berна, perdido em pensamentos. Anos depois, lembrou-se da ideia que lhe ocorreu e que o levou a sua teoria da gravidade: “Se uma pessoa está em queda livre, ela não sente o próprio peso”⁸.

Imagine a si mesmo como Alice no buraco do coelho, em queda livre, sem nada a detê-lo. Em uma queda de acordo com a atração da gravidade, a velocidade cresce em ritmo constante. A aceleração será um equivalente exato da atração gravitacional, e o resultado é que a queda parecerá sem esforço — você não sentirá nenhuma força que puxa ou empurra —, embora sem dúvida será aterrorizante ser lançado pelo espaço. Agora imagine um monte de coisas caindo junto com você: um livro, uma xícara de chá, um coelho branco também em pânico. Todos os outros objetos vão se acelerar no mesmo ritmo para compensar a atração da

gravidade, e portanto vão pairar à sua volta em uma queda conjunta. Se tentar armar um experimento com esses objetos para medir como se movimentam com relação ao seu corpo, para determinar a força gravitacional, você não vai conseguir. Você vai se sentir sem peso, e os objetos parecerão não ter peso. Tudo isso em tese sugere que existe uma relação íntima entre movimento acelerado e atração da gravidade — neste caso, um está exatamente compensando o outro.

Talvez a queda livre seja um exemplo extremo demais. Há muita coisa acontecendo ao seu redor: o vento nos ouvidos e o medo de se estrelar no chão tornam desafiador raciocinar com lucidez. Vamos tentar uma coisa um pouco mais simples, e um pouco mais serena. Imagine que você acabou de entrar num elevador no andar térreo de um prédio muito alto. O elevador começa a subir e, naqueles primeiros segundos, conforme acelera, você se sente um pouquinho mais pesado. Agora imagine que você está no alto do prédio, e o elevador começa a descer. Nesses momentos iniciais em que o elevador vai ganhando velocidade, você se sente mais leve. Claro que, assim que o elevador chegar à velocidade máxima, você não se sentirá nem mais pesado nem mais leve. Mas, durante os momentos nos quais o elevador acelera ou desacelera, sua sensação quanto ao próprio peso — e, portanto, da gravidade — se altera. Em outras palavras, o que você sente da gravidade depende totalmente de estar em aceleração ou desaceleração.

Naquele dia de 1907 em que Einstein concebeu seu homem em queda livre, ele percebeu que devia haver uma ligação profunda entre a gravidade e a aceleração, que seria a chave para trazer a gravidade a sua teoria da relatividade. Se ele pudesse modificar seu princípio da relatividade de forma que as leis da física permanecessem as mesmas não só em referenciais se movimentando a uma velocidade constante, mas também em referenciais que esti-

vessem acelerando ou desacelerando, talvez conseguisse equiparar a gravidade ao grupo do eletromagnetismo e da mecânica. Ele não sabia bem como, mas essa percepção brilhante foi o primeiro passo para tornar a relatividade mais geral.

Sob pressão de seu editor alemão, Einstein escreveu sua explanação, “Sobre o princípio da relatividade e suas implicações”. Incluiu uma seção que tratava do que aconteceria caso generalizasse seu princípio para incluir a gravidade. Com poucas palavras, indicou algumas consequências: a presença da gravidade alteraria a velocidade da luz e faria relógios correrem mais devagar. Os efeitos desse princípio generalizado da relatividade talvez até explicassem a variação na órbita de Mercúrio. Tais efeitos, encaixados de forma apressada no fim do artigo, em um momento futuro poderiam ser usados para testar sua ideia, porém precisavam ser trabalhados com mais detalhes e com mais atenção em outra oportunidade. Seria preciso esperar. Einstein passaria anos sem nem tocar na sua teoria.

Ao fim de 1907, o período de produção brilhante de Einstein na obscuridade estava chegando ao fim. Seus artigos de 1905 começaram, de maneira lenta mas inegável, a provocar impacto. Ele passou a receber uma pilha de cartas de físicos de renome, requisitando suas separatas e discutindo suas ideias. Einstein ficou animado com tais desdobramentos e comentou com um amigo: “Meus artigos alcançaram grande reconhecimento e estão suscitando novas pesquisas”.⁹ Um de seus admiradores gracejou: “Devo confessar que fiquei estupefato ao ler que você passa oito horas por dia sentado em um escritório. Mas a história está cheia de ironias amargas!”.¹⁰ Não era que ele tivesse uma vida ruim. Seu emprego em Berna permitira que ele formasse família com Mileva. Em 1904, eles tiveram um filho chamado Hans Albert. A carga horária sempre estável de Einstein no instituto de patentes possibilitava que ele tivesse tempo livre para passar em casa construin-

do brinquedos para o filho, mas a essa altura Einstein estava prestes a adentrar o mundo acadêmico.

Em 1908, finalmente foi aceito como professor convidado na Universidade de Berna, posição que lhe permitia dar aulas a alunos pagantes, porém sem vínculo empregatício com a instituição. Ele considerou a docência absurdamente trabalhosa e ganhou péssima reputação como professor. Ainda assim, em 1909 foi seduzido pela Universidade de Zurique a assumir o cargo de professor assistente. Einstein ficou pouco mais de um ano em Zurique. Em 1911, foi-lhe oferecido o cargo de professor titular na Universidade Alemã em Praga. Dessa vez, no entanto, ele não teria obrigações como docente. Sem o peso dos deveres relativos à sala de aula, Einstein retornou ao estado mental do qual desfrutava no ambiente ordenado e isolado do instituto de patentes. Ele poderia voltar a pensar em generalizar a relatividade.