

## Einstein — novas formas de pensar: espaço, tempo, relatividade e os *quanta*

No conceito popular, Albert Einstein (1879-1955) é a encarnação da física. Neste caso, creio que a opinião pública está certa e que, salvo fatos imprevistos, que possam vir a ocorrer no que resta deste século, Einstein será considerado o maior físico do século XX e um dos maiores de todos os tempos. Se Rafael pudesse voltar à vida, pintaria com certeza uma moderna *Escola de Atenas* de físicos. E, a meu ver, incluiria Einstein junto com Galileu, Newton e Maxwell apontando para o céu, enquanto Faraday e Rutherford estariam apontando para a terra.

### Uma Juventude nada Convencional

Einstein nasceu em Ulm, em 14 de março de 1879, de uma família judia alemã na qual predominavam idéias liberais. O pai era engenheiro, mas não teve sucesso do ponto de vista financeiro. Albert passou a infância em Munique e, embora em casa revelasse indícios de precocidade, na escola não foi um aluno excepcional. No curso secundário, não apreciava os métodos alemães de ensino e discutia com os professores que, por sua vez, o tratavam mal. A partir dessas primeiras experiências, desenvolveu ele uma constante sensação de hostilidade para com a Alemanha imperial. Condições desfavoráveis em termos de negócios levaram a família a emigrar para Milão em 1894 e Einstein, que ficara em Munique para concluir os estudos, alegou estar doente para poder reunir-se à família, na Itália. Gostou mais daquele país, e durante o curto período que ali passou, fez uma viagem a pé de Milão até Gênova, ou seja, uma distância de 100 milhas.

Posteriormente, tentou entrar para a Escola Politécnica de Zurique (Eidgenössische Technische Hochschule ou ETH), mas lhe negaram a matrícula. Ele não apenas não tinha o necessário diploma do curso secundário, como também foi reprovado no exame de admissão, embora se tivesse saído muito bem em matemática e física. Para conseguir matricular-se, estudou no ginásio em Aarau. Ali foi muito feliz e apaixonou-se pela Suíça, tendo, mais tarde, adotado a cidadania daquele país, que manteve pelo resto da vida. Quando finalmente, entrou para a ETH, seus professores de matemática eram H. Minkowski e A. Hurwitz, *scholars* de primeira





Figura 5.1. Albert Einstein (1879-1955). Foto datada do período em que trabalhava no escritório federal de patentes em Berna e escreveu as obras imortais que foram publicadas nos *Annalen der Physik* em 1905.

categoria, mas aprendeu muito pouco com eles, que nem chegaram a dar-se conta de sua presença. No entanto, Einstein já tinha dado início a suas meditações solitárias sobre os grandes problemas da física moderna, unindo à inspiração informações retiradas de suas próprias leituras. Fez amizade com um colega de estudos, Marcel Grossmann, um suíço que depois veio a ser um professor de matemática de respeitável reputação. Einstein gostava mais do laboratório de física prática, onde podia ver fenômenos com seus próprios olhos, do que dos símbolos matemáticos.

Ao graduar-se, teve dificuldade em encontrar emprego; de início, trabalhou como professor substituto e dava aulas particulares de física. Em 1902, a família Grossmann conseguiu-lhe um emprego modesto no escritório federal de patentes no Cantão de Berna. Mais ou menos nessa época, Einstein casou-se com Mileva Maric. Tiveram dois filhos, um dos quais veio a ser professor altamente conceituado de engenharia da Universidade da Califórnia, em Berkeley.

O emprego no escritório de patentes servia perfeitamente para Einstein (Figura 5.1). Enquanto se desincumbia de suas funções no escritório, examinando as invenções que lhe eram encaminhadas, também achava

tempo para pensar sem ser perturbado. Mais tarde, aconselhou os jovens a procurarem empregos semelhantes, pois, segundo ele, tais empregos davam tempo para pensar e, por isso, eram os mais apropriados para as pessoas que tivessem idéias originais. Começou a escrever artigos sobre física, que enviava para os *Annalen der Physik*, então sob a direção de W. Wien, já famoso por seus estudos sobre o corpo negro. Apresentou um trabalho em 1901, dois em 1902, um em 1903 e um em 1904. Eram estudos profundos na área da termodinâmica e da mecânica estatística. Mas, sem que Einstein o soubesse, o trabalho já tinha sido realizado por Gibbs; coisa parecida ocorreu com o de Planck alguns anos mais tarde.

Em 1905, o gênio de Einstein eclodiu com uma luminosidade insuperada. Em março, maio e junho ele escreveu três obras, cada uma das quais sozinha, teria sido suficiente para imortalizá-lo. Somente Newton, aos vinte e três anos de idade, confinado pela praga que devastava sua aldeia de Woolsthorpe, tivera um vigor semelhante. A primeira obra — *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (Um ponto de vista heurístico sobre a geração e transformação da luz) — contém a descoberta dos *quanta* de luz e, como aplicação secundária, a explicação do efeito fotoelétrico (Figura 5.2). A segunda — *Über die von der Molekularkinetischen Theorie der Wärme Geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* (Sobre os movimentos de partículas suspensas em líquidos em repouso conforme a teoria cinética do calor) — contém a teoria do movimento browniano, mostra mais uma vez a existência real dos átomos e determina a constante de Boltzmann de uma nova maneira. A terceira (Figura 5.3) — *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento) — contém a teoria específica da relatividade, da qual sai a famosa fórmula  $E = mc^2$  que é praticamente tudo o que o público sabe a respeito de Einstein. A verdade é que há algumas pessoas que acreditam que esse é “o segredo da bomba atômica”! É um segredo, no entanto, que não mais existe, da mesma forma que o unicórnio: ambos são produtos da imaginação.

Essas obras, sobre temas diferentes, têm alguma característica em comum que deriva da personalidade científica de Einstein. São revolucionárias, abertas e fazem uso de métodos matemáticos simples. Ele alcança resultados inteiramente surpreendentes aplicando uma lógica rigorosa, solidamente baseada em experiências.

### Relatividade

Primeiro tratarei da terceira obra, sobre relatividade. Dela emergiram grandes conseqüências práticas que vão do equilíbrio da energia em uma bomba atômica bem como no Sol, até a dinâmica necessária à construção de grandes aceleradores de partículas. Acima de tudo, esse documento provocou uma revolução em nossos conceitos de tempo e espaço. Durante séculos, os filósofos tinham tentado analisar esses conceitos sem nunca chegarem a resultados tão profundos e tão definitivos quanto os de Einstein.

Para facilitar o entendimento desta e de outras obras de Einstein, precisarei fazer uma breve digressão a respeito da luz. O estudo científico da



6. *Über einen  
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes  
betreffenden neuartigen Gesichtspunkt;  
von A. Einstein.*

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der

5. *Über die von der molekularkinetischen Theorie  
der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden  
Flüssigkeiten suspendierten Teilchen;  
von A. Einstein.*

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß nach der molekularkinetischen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Körper von mikroskopisch sichtbarer Größe infolge der Molekularbewegung der Wärme Bewegungen von solcher Größe ausführen müssen, daß diese Bewegungen leicht mit dem Mikroskop nachgewiesen werden können. Es ist möglich, daß die hier zu behandelnden Bewegungen mit der sogenannten „Brownischen Molekularbewegung“ identisch sind; die mir erreichbaren Angaben über letztere sind jedoch so ungenau, daß ich mir hierüber kein Urteil bilden konnte.

Figura 5.2. Acima, a página-título do primeiro dos três grandes trabalhos de 1905, a formulação por escrito da hipótese dos *quanta* de luz. O manuscrito tinha chegado aos *Annalen der Physik* em 18 de março de 1905. Abaixo, o segundo grande trabalho: a formulação por escrito da teoria molecular do movimento browniano, recebido para publicação em 11 de maio de 1905.

luz começou na Renascença e atingiu o auge na época de Newton e de C. Huygens. Esses dois grandes expoentes dos primórdios da física pós-Galileu tinham formulado teorias conflitantes sobre a luz. Segundo Newton, a luz era constituída de projéteis que se moviam a grande velocidade; segundo Huygens, era constituída de ondas propagadas em um meio bastante delicado, o éter. Durante anos, ambas as teorias permaneceram conflitantes mas, no início do século XIX, demonstrou-se que a luz podia mostrar fenômenos de interferência, isto é, acrescentando-se luz à luz, podia-se obter escuridão. Essa ocorrência é facilmente explicada pela teoria das ondas,

8. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper;  
von A. Einstein.*

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzulasten scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche.

Figura 5.3. A terceira grande obra de 1905. Intitulada “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento” é o documento sobre a relatividade. Chegou aos *Annalen der Physik* em 30 de junho de 1905 e foi publicado no volume 17, p. 891. Os dois artigos anteriores foram publicados no mesmo volume nas páginas 132 e 549, respectivamente.

porque duas ondas de fases opostas e de mesma amplitude podem destruir-se uma à outra — as cristas de uma enchendo os vales da outra. Mas a interferência não pode ser explicada com a teoria corpuscular. Além do mais, a teoria das ondas exige que nos fenômenos de refração a luz seja propagada mais lentamente em meios mais densos, enquanto que na teoria corpuscular ocorre o contrário. Também a esse respeito as experiências favorecem a teoria das ondas.

Mais tarde, as equações de Maxwell, que pareciam quase sobre-humanas em sua força e generalidade, explicaram todos os fenômenos da luz conhecidos. A velocidade da propagação podia relacionar-se com quantidades elétricas que podiam ser medidas em laboratório por instrumentos



elétricos como condensadores, galvanômetros e ímãs, que não pareciam ter qualquer relação com a luz. Como a luz foi reduzida a vibrações elétricas do éter, surgiu o problema de determinar as propriedades do éter. Em algumas teorias, o éter era dotado de propriedades mecânicas específicas, como um coeficiente de elasticidade. De qualquer modo, todas as teorias precisavam de alguma espécie de éter.

Se uma fonte de luz ou um observador move-se em relação ao éter, esse movimento deve de alguma forma manifestar-se. No caso do som propagado no ar, quando uma fonte se move com a velocidade do som em relação ao ar em repouso (mach 1), ocorrem efeitos espetaculares, que já foram chamados de *barreira do som*. Por outro lado, não se poderia observar nada que mostrasse um movimento relativo ao éter. Por exemplo, tinha-se descoberto que a velocidade de propagação da luz no vácuo é sempre  $c = 2,997924 \times 10^{10}$  cm/seg. Esse resultado fora constatado com precisão por A. A. Michelson e mais tarde por Michelson e E. W. Morley, que tinham realizado medições com um dos interferômetros de Michelson orientado em vários sentidos em relação à direção do movimento da Terra.

Michelson (1852-1931) nasceu em Strelno (então na Prússia), mas a família emigrou para a Califórnia quando ele ainda era criança, e Michelson cresceu em uma cidade mineira semelhante àquelas vistas nos filmes de faroeste. Foi para a Academia Naval em Annapolis, Maryland, onde se graduou como guarda-marinha. Seu treinamento militar foi seguido por uma longa e brilhante carreira científica que o tornou um dos mais famosos físicos norte-americanos e o primeiro norte-americano a ser laureado com o Prêmio Nobel. Suas medições da velocidade da luz são um dos pilares da teoria da relatividade, conforme ensinada atualmente mas, ao que tudo indica, não teriam influenciado Einstein em 1905.

Einstein provavelmente estava convencido *a priori* de que as equações de Maxwell tinham exatamente a mesma forma em todos os sistemas de referência em movimento retilíneo uniforme com relação uns aos outros. Talvez tenha chegado a suas conclusões ainda jovem, enquanto meditava sobre como uma onda eletromagnética apareceria a um observador que a estivesse seguindo a uma velocidade  $v$ . De qualquer modo, para ele, a constância da velocidade da luz era indiscutível. Tinha de ser a mesma em todos os sistemas de referência, embora Einstein provavelmente não conhecesse a confirmação direta de Michelson, pois não a cita em seu trabalho de 1905. A postulação axiomática de Einstein do princípio da relatividade faz lembrar os princípios da termodinâmica e afirma:

(1) *Postulado da relatividade*: Não é possível distinguir um sistema de referência de outro movendo-se com velocidade constante em magnitude e direção em relação a ele. Tais sistemas são chamados de *inerciais*. O termo *distinguir* significa que cada experiência realizada no primeiro ou no segundo sistema dá o mesmo resultado para um observador relacionado com o sistema.

(2) *Postulado da constância da velocidade da luz*: A velocidade da luz é independente do movimento de sua fonte.

Os físicos anteriores a Einstein tinham enfrentado as dificuldades apresentadas pela eletrodinâmica dos corpos em movimento. Hertz, entre

outros, procurara dar-lhe uma formulação. Lorentz, G. F. Fitzgerald e Poincaré tinham dedicado muita atenção ao assunto. Lorentz julgava que as equações de Maxwell não mantêm a mesma forma quando passam de um sistema de referência a outro segundo as regras dadas por Galileu e, aparentemente, baseadas no bom-senso. Chamando-se de  $x$  a coordenada de espaço e de  $t$  o tempo no primeiro sistema; e de  $x'$  e  $t'$  as quantidades correspondentes no segundo sistema, que se move a uma velocidade  $v$  em relação ao primeiro sistema, as equações de transformação de Galileu ficam:

$$\begin{aligned}x' &= x - vt \\t' &= t.\end{aligned}$$

Transformando as coordenadas de um sistema para um outro segundo essas regras, observam-se mudanças dignas de nota nas equações de Maxwell. Ressalte-se particularmente que o tempo é o mesmo nos dois sistemas.

Lorentz tinha descoberto uma transformação de coordenadas, a famosa transformação de Lorentz, que deixa as equações de Maxwell invariantes e, quando  $v \ll c$ , reduz-se à transformação de Galileu. É expressa pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \\t' &= \frac{t - (v/c)^2 x}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.\end{aligned}$$

A transformação de Lorentz é correta, mas, à época, parecia ser pouco mais do que um recurso matemático.

Einstein atacou o problema da transformação do tempo e do espaço com um enfoque profundo e com entusiasmo quase infantil. Com uma lógica convincente, analisou cuidadosamente os conceitos de tempo e espaço usando um método operacional que, para cada conceito introduzido, exigia uma especificação rigorosa e concreta de como medir as magnitudes envolvidas. Naturalmente estava interessado não nos instrumentos e em mecânica, mas na lógica da experiência. Resultados inteiramente inesperados surgiram de sua análise, como, por exemplo, a relatividade da simultaneidade: fatos que ocorrem em diferentes locais e ao mesmo tempo, para um observador, não parecem simultâneos para outro observador que se mova em relação ao primeiro. Do mesmo modo, há o paradoxo dos gêmeos: um irmão gêmeo permanece em um sistema de referência e o outro se afasta em movimento uniforme e retilíneo, inverte a direção do movimento e retorna. Quando o segundo irmão gêmeo volta a encontrar o primeiro, acha-o mais velho. Se formos céticos a esse respeito, a experiência já foi realizada com partículas que se desintegram, e o resultado previsto pela relatividade foi confirmado. Acima de tudo, ficou evidente que não era a transformação de Galileu, mas a de Lorentz que correspondia à maneira correta de medir o tempo e o espaço.



A lógica de Einstein é irrefutável, embora à época soasse desagradável a muitos físicos em razão de sua aparente contradição com a experiência do cotidiano. Sublinho *aparente* porque, na realidade, essa contradição não existe.

Um dos professores de Einstein, Hermann Minkowski (1864-1909), inventou uma delicada expressão matemática para a transformação das coordenadas de espaço e tempo. Introduziu um espaço quadridimensional, três dimensões de espaço e uma de tempo. A característica específica desse espaço é que a distância entre dois pontos não é dada pelo teorema de Pitágoras que, no espaço ordinário, diz:  $s^2 = x^2 + y^2 + z^2$ . O espaço quadridimensional de Minkowski usa uma forma um pouco diferente:  $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$ . A introdução do tempo em espaço quadridimensional e o sinal menos em frente ao último termo é que modificam radicalmente a situação. Em uma conferência histórica, pronunciada em 1908, Minkowski apresentou seus novos conceitos com as seguintes palavras:

“Cavalheiros, as noções de espaço e tempo que desejo apresentar-lhes emergiram do terreno da física experimental e ali reside sua força. São radicais. Daqui em diante, o espaço por si mesmo, e o tempo, por si mesmo, estão destinados a transformar-se em meras sombras e apenas uma espécie de união dos dois preservará uma realidade independente”. (Conferência aos 80. *Versammlung Deutscher Naturforscher und Aerzte*, Colônia, 1908.)

Quando Minkowski viu o trabalho original de Einstein, lembrou-se de seu aluno e disse o seguinte: “Imaginem só! Eu nunca esperaria uma coisa tão inteligente vinda desse camarada”.

As conseqüências da teoria da relatividade são vastas, profundas e inesperadas. Segundo o modo de pensar de Einstein a velocidade da luz aparece como uma constante universal e seu caráter fundamental transcende sua conexão histórica com o eletromagnetismo. Relaciona espaço e tempo na transformação de Lorentz; é a velocidade limite que não pode ser superada na transmissão de sinais; aparece na conexão entre velocidade, energia e *momentum* de um ponto material que tem a massa  $m$  em repouso. Essa conexão é dada pelas fórmulas  $E = mc^2/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  e  $p = mv/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ . A massa dos corpos, definida como a proporção entre força e aceleração, torna-se variável com a velocidade. A conservação da massa já não constitui uma lei precisa e substitui uma generalização da conservação da energia, na qual a massa pode transformar-se em energia segundo a fórmula

$$mc^2 = E.$$

Físicos modernos chegaram a descobrir “partículas” sem massa, sendo a mais notável o *quantum* de luz (vide mais adiante). Para essas partículas,  $E = cp$ , e elas se movem com a velocidade da luz em relação a qualquer sistema inercial.

Os novos conceitos desnortearam os físicos. Mesmo um grande físico teórico como H. A. Lorentz, que achara a transformação básica para a relatividade, teve dificuldade para aceitar as novas idéias. Não que a matemática apresentasse um obstáculo: as dificuldades nesse campo eram mínimas. A barreira estava na verdadeira forma de pensar e, em conse-

qüência, a teoria só veio a tornar-se familiar para os físicos uma geração mais tarde. Idéias genuinamente novas em física solidificam-se com muita lentidão, sobretudo porque a geração que as cria não consegue “senti-las”. Os físicos mais amadurecidos podem aprender, mas a verdadeira assimilação ocorre quando os contemporâneos morrem e os sucessores passam a considerar as idéias novas como básicas. Testemunhei esse fenômeno bem de perto na mecânica dos *quanta*. Devo acrescentar ainda que a nova geração, doutrinação desde o início, não tem consciência de muitos dos dilemas e objeções que os criadores têm de enfrentar.

— A relatividade só foi sendo aceita aos poucos. Por exemplo, mesmo em 1922, a Academia Sueca concedeu o Prêmio Nobel a Einstein “pelo serviço por ele prestado à física teórica e particularmente por sua descoberta da lei do efeito fotoelétrico”. Pode parecer estranho que a relatividade não seja mencionada, mas, numa retrospectiva, a meu ver, houve sabedoria nessa escolha. Não é que a relatividade seja um tema de importância secundária, mas é que os outros “serviços” de Einstein foram imensos.

### Grãos de Luz e Impactos Moleculares

Voltemos agora ao primeiro dos dois trabalhos escritos por Einstein no surpreendente ano de 1905. A meu ver, é uma das maiores obras já realizadas em física. Naquela época, os cientistas sabiam que a luz era constituída de ondas eletromagnéticas; se havia alguma coisa de certo, era isso. No entanto, Einstein tinha dúvidas e revelou a natureza dual da luz — corpuscular e ondulatória. Essa descoberta, junto com o aspecto dual correspondente da matéria, tornou-se a maior conquista do século. Newton e Huygens foram inesperadamente reconciliados por uma profunda revolução na filosofia natural, que mostrou estarem ambos, em parte, certos.

Planck quantizava a energia dos osciladores que formavam as paredes de sua versão do corpo negro. Com referência à radiação propriamente dita, pôde apenas dar a expressão  $u(\nu, T)$ . Acredito que ele mesmo não tinha dúvidas de que as equações de Maxwell descreviam exatamente as ondas eletromagnéticas que enchem a cavidade. Einstein, no entanto, perguntava-se se a descrição de Maxwell era compatível com a fórmula do corpo negro de Planck e chegou à surpreendente conclusão de que a própria luz devia ser composta de *quanta* quase-corpusculares. Não posso deixar de lado seu raciocínio porque, quando o li, sua força e simplicidade me atingiram quase que fisicamente (vide Apêndice 3).

Einstein observou que a derivação de Planck, ao considerar as trocas de energia entre osciladores e radiações, “pressupõe implicitamente que a energia pode ser absorvida e emitida pelo oscilador isolado apenas em *quanta* de magnitude  $h\nu$ , isto é, que a energia de uma estrutura mecânica capaz de oscilações, bem como a energia da radiação, pode ser transferida apenas nesses *quanta*, em contradição com as leis da mecânica e da eletrodinâmica”.

A física clássica leva-nos inevitavelmente ao enfoque Rayleigh-Jeans da fórmula de Planck. É válido para  $h\nu/kT \ll 1$ , e nela  $h$  não aparece. Para



$h\nu/kT \gg 1$ , a fórmula de Wien é válida, e os conceitos clássicos fracassam. Einstein concentrou sua atenção na fórmula de Wien e a partir dela obteve uma expressão para a entropia de uma radiação de certa frequência contida em certo volume, ou, mais precisamente, para a variação dessa entropia ao mudar o volume, mantendo constante a energia. Observa ele que “essa equação mostra que a entropia da radiação monocromática de densidade suficientemente pequena varia com o volume como a entropia de um gás ideal...” Depois vai adiante, para calcular a entropia pelo método de Boltzmann, concluindo que:

“Se a radiação monocromática de frequência  $\nu$  e energia  $E$  é encerrada em um volume  $v$  por paredes perfeitamente refletoras, então a probabilidade (relativa) de que a qualquer momento toda a energia de radiação seja encontrada no volume parcial  $v_0$  do volume  $v$ , é dada por

$$W = \left(\frac{v_0}{v}\right)^{E/h\nu}$$

A partir daí, concluímos ainda que a radiação monocromática de pequena densidade de energia (dentro do campo de validade da fórmula de radiação de Wien) comporta-se em relações termodinâmicas teóricas como se consistisse de *quanta* distintos de energia independentes de magnitude  $h\nu$ .”

Einstein leva esse resultado muito a sério, a despeito da prova esmagadora de todos os fenômenos de propagação em favor de uma teoria de ondas para a luz, e diz o seguinte:

“Se então, na medida da dependência da entropia no volume, a radiação monocromática de densidade suficientemente pequena se comporta como um meio descontínuo consistindo de *quanta* de energia de magnitude  $h\nu$  é razoável indagar-se se as leis de emissão e transformação da luz são constituídas como se a luz fosse composta desses mesmos *quanta* de energia.

Trataremos desse assunto no próximo capítulo”. (Einstein, *Annalen der Physik* 19, 143, 1904.)

No capítulo seguinte, ele trata do efeito fotoelétrico bem como de análises fotoquímicas e outras idéias. Tudo isso são exemplos que confirmam sua hipótese dos *quanta* de luz.

Foi enorme o progresso realizado a partir das idéias de Planck. Ele tinha apenas quantizado os osciladores materiais formando as paredes do corpo negro, talvez sem mesmo acreditar na realidade de níveis de energia. O tônus do trabalho inicial de Planck — e mesmo do trabalho posterior — dá a impressão de que a quantização era para ele pouco mais que um artifício de cálculo. Para Einstein, por outro lado, era um fenômeno fundamental; em particular, a luz, isto é, o próprio campo eletromagnético, é quantizada. Naturalmente a quantização apresenta enormes dificuldades se se tentar conciliá-la com fenômenos de propagação da luz. Em vez de fugir desses

problemas, Einstein reconheceu sua natureza fundamental e nunca deixou de meditar sobre eles até que fossem encontradas as soluções, em parte por ele mesmo, em parte por outros físicos.”

Agora, voltemo-nos para o segundo dos estudos de Einstein de 1905. No ano de 1827, o botânico escocês Robert Brown (1773-1858) observou que grãos de pólen ou outros objetos pequenos suspensos na água fazem um movimento aleatório. Esse movimento, chamado de browniano, se deve ao impacto das moléculas do fluido que cerca o objeto. Einstein apresenta uma teoria sobre o movimento browniano, com base na teoria cinética dos gases. Essa teoria dá um método novo e direto para determinar a constante de Boltzmann e, por conseguinte, o número de Avogadro, e também uma prova quase tangível da existência de moléculas (vide Apêndice 4).

### Do Escritório de Patentes à Fama Mundial

Esses trabalhos extraordinários foram notados pela comunidade científica: já em março de 1906, Planck publicou um estudo de Einstein sobre a teoria da relatividade. Mas ninguém tinha visto o autor. Nem o autor tinha deixado o escritório de patentes para conversar com os grandes físicos teóricos. Não obstante, alguns jovens e ousados cientistas decidiram ir a Berna para saber quem era aquele Senhor Albert Einstein. Encontraram-no em seu escritório. Sua vida particular parecia um tanto boêmia, mas ele era polido e prontificou-se a esclarecer quaisquer dúvidas que existissem a respeito de suas idéias. Einstein começou a corresponder-se com Planck e Lorentz e logo as autoridades suíças ofereceram-lhe um modesto cargo na Universidade de Berna. De início, não quiseram nomeá-lo *Privat Dozent* por questões burocráticas, mas em 1908 a Universidade de Zurique concedeu-lhe tal título. A Universidade Alemã de Praga ofereceu-lhe uma cátedra em 1909 e ele a aceitou. Mas Einstein não se sentia feliz em Praga, na Áustria dos Habsburgos, onde predominava uma atmosfera hipócrita e anti-semita. Einstein não tinha muita simpatia pela religião em termos formais e era fundamentalmente agnóstico, pelo menos no que diz respeito a qualquer teologia formal. Ficou aliviado quando, em 1912, pôde retornar à sua amada Suíça, desta vez para a ETH (Escola Politécnica de Zurique), onde tinha estudado.

Em Praga, Einstein fizera amizade com P. Ehrenfest, amizade que mais tarde veio a fortalecer-se e durou até a morte deste. Paul Ehrenfest (1880-1933) era um físico teórico austriaco que tinha sido aluno de Boltzmann. Casara-se com uma física russa, Tatiana, e com ela escreveu um famoso artigo sobre mecânica estatística para a *Encyclopedia of Mathematics*. Ehrenfest tinha mais capacidade para esclarecer pontos obscuros da física do que para criar teorias originais. Era um professor de alta capacidade didática e demonstrava muita diligência nas tentativas de identificar novos talentos. Era famoso pelo afeto com que encorajava os jovens e estimado por seus muitos amigos e alunos em razão de suas qualidades humanas. Sucedeu a Lorentz em 1912 e fundou uma escola que logo começou a ampliar-se. Infelizmente, Ehrenfest era sujeito a fases de profunda depressão e, durante uma delas, em 1933, suicidou-se.

° N. do A. Para facilitar ao leitor moderno, usei as constantes  $h$  e  $k$ . Einstein usa  $\beta = h/kcR/N = k$  sendo  $R$  a constante dos gases e  $N$  o número de Avogadro.



Um estudante de físico-química originário de rica família de Praga uniu-se a Einstein. Tratava-se de Otto Stern (1888-1969), sobre quem falarei mais adiante. Stern tinha-se dado conta de que Einstein era o físico do futuro, ou melhor, do presente, e aproveitou-se de sua própria independência financeira para estudar e trabalhar com ele. Este é outro exemplo do inter-relacionamento das carreiras de muitos dos grandes físicos.

Por esta época, Einstein já se tinha tornado um físico importante do ponto de vista profissional. Em 1909, em uma reunião realizada em Salzburgo, conheceu Planck, Wien, Sommerfeld, Rubens, Nernst e outros grandes físicos modernos. Sentiu prazer em debater frente a frente com todos eles. Antes disso, porém, já tinha aperfeiçoado suas idéias de 1905.

Conforme mencionei acima, ao calcular a entropia da radiação e adotar a lei de Wien para  $\nu(\nu, T)$ , Einstein concebera a idéia dos *quanta* de luz e relacionara-a com provas experimentais. A entropia da radiação está intimamente vinculada à flutuação da energia contida em um determinado volume e a hipótese dos *quanta* de luz fornece uma expressão bastante simples para tais flutuações. O que acontece se se efetuam os cálculos não usando a lei aproximada de Wien, que só é válida se  $h\nu \gg kT$ , mas a lei exata de Planck? Einstein fez o cálculo mais uma vez e conseguiu uma fórmula notável para a flutuação da energia contida em um volume fixo e em certo intervalo de frequência em torno de  $\nu$ .

Einstein achou dois termos que tinham de ser somados (vide Apêndice 5). O primeiro é um termo obtido em 1905 com a fórmula de Wien e é perfeitamente análogo à expressão da flutuação do número de moléculas gasosas em um volume. Indica a estrutura granular da energia radiante e confirma que  $E = nh\nu$ , isto é, que a luz se comporta como se fosse composta de *quanta* de energia  $\epsilon = h\nu$ . A segunda expressão, por outro lado, é exatamente a que se obteria a partir da teoria eletromagnética pura e é causada pela interferência construtiva ou destrutiva das ondas. O fato digno de nota da presença de ambos indica a natureza dual da luz — ondulatória e corpuscular. As idéias de Newton e de Huygens, que pareciam exclusivas entre si, são confirmadas. Conforme Einstein escreveria em 1909:

“É inegável que existe um extenso grupo de dados relacionados à radiação que mostram ter a luz certas propriedades fundamentais que podem ser entendidas muito mais facilmente a partir do ponto de vista da teoria newtoniana de admissão do que a partir do ponto de vista da teoria ondulatória. Portanto, sou de opinião que a próxima fase do desenvolvimento da física teórica nos trará uma teoria da luz que pode ser interpretada como uma espécie de fusão das teorias ondulatória e da emissão...”

Enquanto isso, em 1907, Einstein tinha descoberto outra importante aplicação das idéias do *quantum*. Em 1819, P. L. Dulong e A. T. Petit tinham anunciado que, segundo seus cálculos, “*Les atomes de tous les corps simples ont exactement la même capacité pour la chaleur*” [“Os átomos de todos os elementos têm exatamente a mesma capacidade térmica”], e Boltzmann tinha explicado esse fato com o princípio da equipartição da energia. No entanto, quando se tornou possível medir calores específicos a baixas temperaturas, graças à disponibilidade de ar líquido e a outros métodos criogênicos, descobriu-se que a lei de Dulong e Petit tinha muitas exceções. Einstein forneceu a razão

para a dependência de temperatura do calor específico representando átomos em cristais como osciladores de determinada frequência (vide Apêndice 6). Segundo a teoria dos *quanta*, eles só poderiam ter a energia  $nh\nu$  com  $n$  como número inteiro. Se  $h\nu \ll kT$ , estaremos no domínio da física clássica e os osciladores terão a energia média de  $3kT$ . O calor atômico, isto é, o calor específico referente a um átomo, é  $3k$ , conforme Dulong e Petit tinham achado. Se, entretanto,  $kT \ll h\nu$ , a quantização torna-se apreciável e obteremos um calor específico muito diferente do clássico. Do ponto de vista qualitativo quando os osciladores são altamente estimulados, a adição de um *quantum* de energia produz uma mudança energética que é pequena em comparação à energia já existente no oscilador e aí não estaremos muito longe do caso clássico, que pressupõe mudar continuamente a energia. Para que tal situação ocorra, a temperatura do ambiente em volta do oscilador deve ser tal que  $kT \gg h\nu$ . Na realidade a energia do oscilador será então  $kT$  em termos brutos, o que é muito, se comparado com os possíveis saltos de energia  $h\nu$ . No caso extremo e oposto  $kT \ll h\nu$  a agitação pela temperatura é insuficiente para produzir saltos de *quanta* no oscilador, que, assim, se torna incapaz de absorver energia do ambiente em torno. O comportamento do oscilador é dominado por suas propriedades quânticas e o calor específico desaparece.

A teoria foi aperfeiçoada por P. Debye e outros e está em consonância com dados experimentais.

Tais considerações são importantes porque mostram que a constante  $h$  desempenha um papel vital na mecânica das moléculas e dos átomos. O êxito desses conceitos serviu para despertar mais interesse ainda pelas conceituações quânticas, que ainda se restringiam a um círculo muito reduzido de iniciados.

### A Ordem Mundial entra em Derrocada e o Espaço é Curvo

Em 1911, realizou-se a primeira série de Conferências do Conselho Solvay sobre radiação e *quanta* (Figura 5.4). Essas conferências derivam seu nome de Ernst Solvay, o inventor de um método industrial para a preparação de carbonato de sódio, ou soda. Solvay instituiu e financiou uma série de encontros internacionais sobre física, com temas preestabelecidos, para os quais se convidavam os grandes físicos relacionados à área escolhida. As conferências, limitadas a cerca de trinta pessoas, tinham lugar em Bruxelas. A orientação dos debates e a relação de convidados para o primeiro deles foram elaboradas em grande parte por H. Walther Nernst (1864-1941); professor de físico-química em Berlim, um dos principais termodinamicistas da época e uma força da ciência alemã. Nernst tinha descoberto um teorema importante, às vezes chamado de terceiro princípio da termodinâmica, segundo o qual a entropia de qualquer substância pura ao zero absoluto era a mesma: zero. Seu teorema tinha profundas raízes na teoria quântica. Em razão de suas altas qualificações em física e lingüística e de suas habilidades diplomáticas e prestígio geral, H. A. Lorentz era um convidado permanente e quase sempre atuava como presidente do encontro. O número restrito de participantes e o nível dos convidados asseguravam debates ardentes e





Figura 5.4. Participantes do Conselho Solvay de 1911. De pé, da esquerda para a direita: O. Goldschmidt, M. Planck, H. Rubens, A. Sommerfeld, T. Lindemann, M. de Broglie, W. Knudsen, F. Hasenöhr, H. Hostelet, T. Herzen, J. Jeans, E. Rutherford, H. Kamerlingh Onnes, A. Einstein, P. Langevin. Sentados, da esquerda para a direita: H. W. Nernst, L.-Brillouin, E. Solvay, H. A. Lorentz, O. Warburg, J. Perrin, W. Wien, M. Curie, H. Poincaré. (Instituto Solvay.)

profícuos. Por tradição, os soberanos belgas mostravam seu interesse pelas reuniões convidando os participantes a um jantar. Como resultado desses encontros Einstein tornou-se amigo da Rainha Elizabeth da Bélgica e com ela manteve uma correspondência que durou muitos anos.

Na conferência de 1911, Planck, como sempre, manifestou um ponto de vista conservador e prudente, enquanto Einstein, que se estava tornando conhecido como a figura de maior realce, mostrou-se mais flexível. Pouco depois, quando Einstein recebeu a proposta de uma cátedra na ETH, Marie Curie e Poincaré, que o tinham conhecido na reunião de Solvay, expressaram abertamente, em uma carta de recomendação, o alto conceito que por ele tinham.



Einstein foi para a ETH, em 1912, mas ali ficou pouco tempo. Os grandes físicos de Berlim o queriam na capital do *Reich* e assim apresentaram-lhe ofertas bastante atrativas para o Instituto Cáiser Wilhelm ou para a Academia Prussiana, à sua livre escolha. As funções de magistério seriam mínimas e ele teria a máxima liberdade para trabalhar, um salário generoso e outras vantagens. Nernst e Planck foram a Zurique para apresentar a oferta pessoalmente, o que constituiu uma atitude rara. Einstein não precisou de mais que um dia para decidir-se. Informou aos visitantes que daria um passeio e retornaria com uma rosa — uma rosa vermelha se aceitasse ou uma rosa branca se recusasse. Retornou com uma rosa vermelha. Mas instituiu em uma condição: queria manter a cidadania suíça. Essa insistência provocou alguns problemas, pois embora Einstein se considerasse cidadão suíço, a Prússia o considerava cidadão prussiano.

A despeito de sua brilhante posição, Einstein não se sentia bem na Alemanha imperial. Apreciava a companhia dos colegas e outras atrações oferecidas por Berlim, mas não o militarismo prussiano. Para escapar à atmosfera de quartel que sentia em Berlim, quase sempre ia até a Holanda,



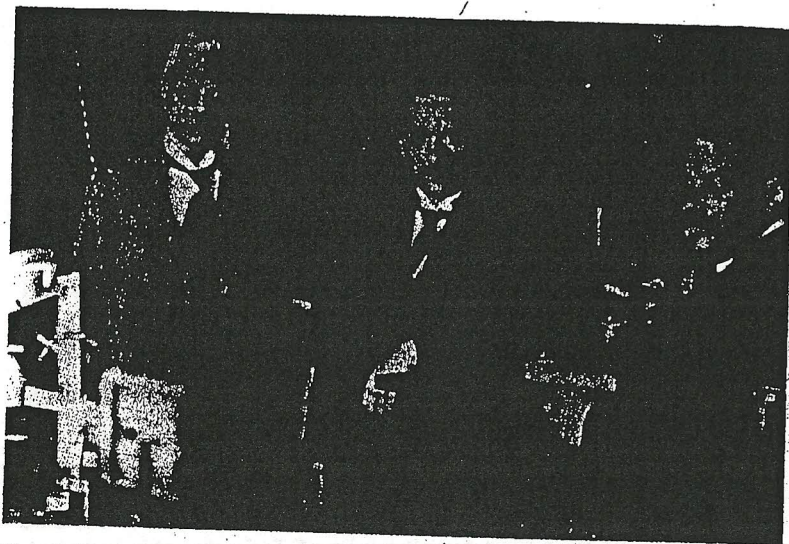


Figura 5.5. Da esquerda para a direita: Zeeman, Einstein e Ehrenfest em Amsterdã por volta de 1920. Einstein e Ehrenfest eram velhos amigos e foi provavelmente durante uma das visitas aos Ehrenfest que ele, Einstein, aproveitou a oportunidade para ir ao laboratório de Zeeman. (Museum Boerhaave, Leiden, Países Baixos.)

para encontrar-se com os amigos Lorentz e Ehrenfest (Figura 5.5). No início de sua estada na Alemanha, Einstein divorciou-se; mais tarde, veio a casar-se com uma prima, com quem viveu o resto de sua vida.

Estamos-nos aproximando do fatal agosto de 1914. Einstein estava engajado nas primeiras pesquisas sobre a relatividade geral, uma ampla extensão do princípio da relatividade para movimentos arbitrários. É claro que dois sistemas, acelerados um em comparação com o outro, não são equivalentes. O fato é que aparecem forças inerciais em um que não são encontradas no outro. Um exemplo simples é um elevador em queda livre sobre a superfície da Terra: para um observador que esteja dentro dele, a gravidade desaparece. Tal fato obviamente não é a mesma coisa que um elevador em repouso em relação à Terra, para o qual a gravidade efetivamente existe. Einstein, no entanto, observou que, ao introduzirem-se campos gravitacionais apropriados, podem-se tomar os dois sistemas acelerados equivalentes um ao outro. Para que isso seja possível, é necessário que as massas inerciais que aparecem na equação  $F = ma$  sejam iguais à massa gravitacional que aparece na equação  $F = km'm'/r^2$ . Esse fato digno de nota, quase sempre expresso quando se diz ser a massa gravitacional igual à massa inercial, tinha sido descoberto por Galileu em suas experiências quase lendárias na torre inclinada de Pisa e confirmado por Newton, que cuidadosamente constatou que pêndulos do mesmo comprimento, mas de materiais diferentes, têm o mesmo período. Com maior precisão, o Barão R.

von Eötvös confirmou esse fato na Hungria, em 1891, e precisão ainda maior foi conseguida por R. H. Dicke em 1963.

A relatividade geral, em oposição à relatividade restrita, não estava na primeira linha do interesse dos físicos, e Einstein teve de enfrentar o problema sozinho. Do ponto de vista matemático, a teoria geral é consideravelmente mais difícil do que a teoria específica da relatividade e exige o uso de “análise tensorial”, que, na época, era praticamente desconhecida dos físicos. O próprio Einstein sentiu-se impedido pelas dificuldades matemáticas, até que seu amigo Grossmann lhe apresentou as obras de B. Riemann e B. Christoffel e, mais importante, as de G. Ricci-Curbastro e T. Levi-Civita, que forneceram os necessários instrumentos matemáticos. Einstein pôde então operar em espaços curvos e relacionar os efeitos gravitacionais à curvatura do espaço que, por sua vez, é relacionada à presença de matéria ou energia.

Estou-me antecipando um pouco. A declaração de guerra em 1914 foi acompanhada de uma investida geral de patriotismo ingênuo e primário, especialmente na Alemanha. Reagindo às acusações lançadas pelos Aliados, talvez às vezes exageradas, contra a Alemanha, principalmente no que diz respeito à invasão da Bélgica, que era um país neutro, os cientistas alemães responderam com um manifesto defensivo em que cada frase começava com a expressão: *Es ist nicht wahr...* (Não é verdade...) e, ao final, proclamava a solidariedade dos cientistas para com os militares. Infelizmente, entre os signatários do manifesto estavam nomes altamente respeitáveis, como Röntgen, Planck, Nernst, Wien e muitos outros. Quando se dava o caso, eles acrescentavam títulos aos nomes, como *Geheimrat* (Conselheiro Privado do Imperador) ou *Exzellenz*. (Sua Excelência), detalhe aliás bastante irônico, se pensarmos que alguém como Röntgen poderia imaginar que um título oficial iria acrescentar alguma força a sua assinatura. Mas era assim a Alemanha imperial. É evidente que muitos dos signatários, inclusive Röntgen, eram ingênuos e mais tarde se arrependeram dessa atitude. Outros, como Planck, aprenderam a lição com os próprios fatos. Embora continuassem arraigadamente patriotas, não foram envolvidos tempos depois pela retórica nacionalista de Hitler. Einstein recusou-se a assinar o documento e chegou a pensar em organizar um manifesto de oposição, mas não levou o plano adiante. De qualquer modo, já tinha feito sérios inimigos em virtude de sua posição política.

Einstein estava absorvido em seus esforços no sentido de desenvolver a relatividade geral. Várias vezes julgou ter atingido a meta tão almejada, logo descobrindo que havia falhas graves nessa teoria. Finalmente, conseguiu cumprir com seu programa de formulação de leis físicas de uma maneira válida para qualquer sistema de referências, provocando uma nova interpretação da gravitação. O progresso conceitual e a clareza da teoria são marcantes, embora os resultados experimentais sejam modestos. Previa ela alguns pequenos efeitos que podiam fornecer provas experimentais: a mudança do periélio de Mercúrio, o desvio de raios de luz por uma massa, efeito visível em um eclipse solar, e a mudança de frequência das linhas espectrais emitidas por astros maciços. Infelizmente, todos esses efeitos são pequenos e de difícil observação, de modo que, mesmo agora, não há



nenhuma confirmação experimental absoluta ou inequívoca da teoria geral da relatividade. Não obstante, a redução da relatividade a um efeito geométrico da curvatura do espaço é um conceito magnífico e de imensa importância em astrofísica e cosmologia. É aqui que a relatividade geral recebe a parte que lhe cabe e se torna indispensável para descrever e interpretar as observações astronômicas.

Em 1917, Einstein publicou outra obra de grande importância, uma nova e bem simples derivação da lei do corpo negro, que dá continuidade a conceitos bastante profundos. A emissão de luz já não era considerada de um ponto de vista maxwelliano. Pela primeira vez, leis estatísticas, as mesmas que se aplicam ao decaimento radioativo, eram estendidas a fenômenos eletromagnéticos.

A teoria atômica de Bohr já existia então, mas o mecanismo da emissão da luz a partir de um átomo continuava a ser um mistério. Einstein conseguiu levantar uma ponta da cortina que encobria o fenômeno e seus trabalhos de 1917, perspicazes, assinalaram um marco na teoria moderna. Neles, Einstein abandonou a causalidade estrita da física clássica e apresentou conceitos de probabilidade. Nessas condições, seu trabalho continha o germe da mecânica quântica e da profunda revolução por ela causada. Além do mais, sem qualquer menção explícita das aplicações, continha também as idéias básicas ao funcionamento dos *lasers* e *masers* tão empregados hoje em dia.

Também neste caso a idéia profunda de Einstein é tão simples que pode ser explicitada em palavras, sem ser necessário recorrer a fórmulas. (Para um esquema mais completo, vide Apêndice 7.)

Einstein examinou um corpo negro em equilíbrio térmico contendo, além da radiação, átomos especificamente simples com apenas dois níveis de energia. Um pode passar de um nível para o outro emitindo ou absorvendo um *quantum* de luz de frequência  $\nu = (E_1 - E_2)/h$  onde  $E_1, E_2$  são as energias dos dois níveis. Ao precisar que o átomo e a radiação se mantêm em equilíbrio estatístico, isto é, que o número de átomos que passam por segundo do estágio inferior para o estágio superior, ou vice-versa, é o mesmo, obteve ele notáveis relações entre as probabilidades de transição e a emissividade da radiação. Baseou o cálculo na probabilidade de ocorrência do decaimento radioativo, adequadamente modificada. Trata-se de um enfoque radicalmente distinto do método eletromagnético clássico. Einstein chamou de  $A$  a taxa de transferência espontânea do átomo do nível superior para o inferior, e de  $B$  a taxa de transferência do estágio superior para o inferior, ou vice-versa, sob a influência da radiação de emissividade  $\nu(\nu, T)$ . Entre outras coisas, mostrou que as duas taxas de transferência induzida são iguais. O  $A$  e o  $B$  de Einstein atualmente constituem um conceito básico em física.

A introdução dos coeficientes  $A$  e  $B$  com seu significado baseado na probabilidade, em conexão com a emissão de luz, representa uma tendência inteiramente nova e um prenúncio de coisas que estavam para acontecer.

Nesse mesmo trabalho de 1917, Einstein forneceu também uma nova prova do resultado que tinha conseguido anos antes, que dizia que, além da energia  $h\nu$ , os *quanta* de luz também têm uma quantidade de movimento  $h\nu/c$  no sentido da propagação da luz. De um modo notável, chegara ele a essa

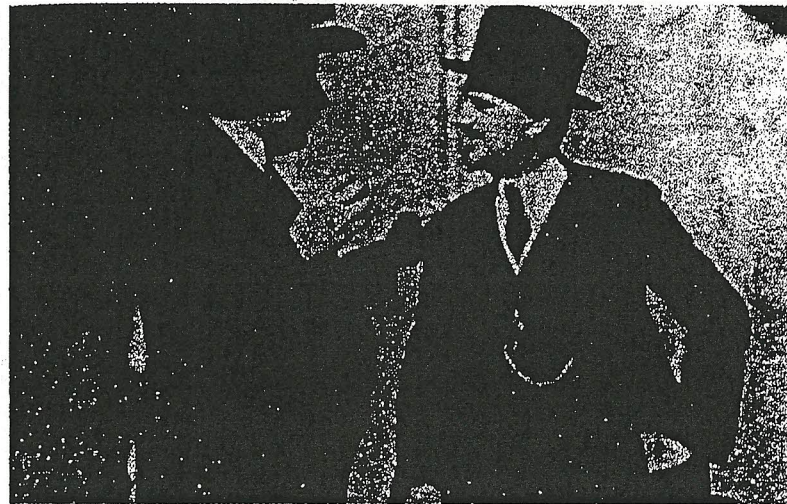


Figura 5.6. Einstein conversando com o matemático italiano E. Enriques no pátio da Universidade de Bolonha durante uma visita realizada àquela instituição em outubro de 1921.

conclusão, que deriva diretamente da relatividade, mediante análises sutis — e até certo ponto recônditas — das flutuações da energia e da densidade do *momentum* (quantidade de movimento).

### Os Últimos Anos e a Solidão de Einstein

Enquanto Einstein estava absorvido nesses estudos, a guerra tinha tomado seu curso, terminando em 1918 com a derrota da Alemanha e a ruína do velho regime do Cáiser, sem nenhuma lamentação por parte de Einstein. Após um período revolucionário, a nova República de Weimar trouxe para a Alemanha grandes esperanças de democratização. Mas o governo mostrava-se extremamente fraco, era solapado por dentro e por fora e incapaz de governar com o vigor necessário.

Em 1919, ocorreu um eclipse total do Sol, que possibilitou a constatação de algumas das conseqüências da relatividade geral. Realizaram-se várias expedições com esse propósito e os resultados, embora não muito claros, favoreceram as teorias de Einstein. Nesse ponto é que a popularidade de Einstein eclodiu. Por motivos que não são para mim muito claros, ele repentinamente se tornou uma figura bastante popular, mesmo entre pessoas que ainda nada conheciam de sua obra. Era tratado como um astro de cinema ou como um grande animador de auditório, mas também passou a ter inimigos fidedignos sem qualquer motivo racional. Surgiu até mesmo uma sociedade científica einsteiniana, onde nomes respeitados e respeitáveis se misturavam a demagogos, dementes e futuros recrutas nazistas. Einstein era convidado a fazer palestras em público sobre a relatividade. Aceitava tais





Figura 5.7. Einstein, conforme desenho do famoso artista Max Liebermann (1847-1935) em Berlim, em 1925. (Com autorização do Institute for Advanced Study, de Princeton, N. J.)

convites, mas as palestras eram interrompidas por seus adversários e transformadas em torpes demonstrações políticas. Einstein não tinha muito autocontrole e reagia através da imprensa de uma maneira que, segundo seus amigos mais íntimos, não era absolutamente a ideal.

A situação tomou um rumo difícil, pois os extremistas não hesitavam em assassinar os inimigos. O assassinato de W. Rathenau, Ministro dos Negócios Estrangeiros da República de Weimar, foi uma advertência a respeito do que poderia acontecer. Tratava-se de um grande patriota e figura ilustre da indústria alemã que trabalhara infatigável e proveitosamente em favor da organização da economia de guerra e depois fora elevado ao cargo de ministro. Era amigo pessoal de Einstein e sua morte, bem como a dos socialistas K. Liebknecht e Rosa Luxemburgo, e de outras figuras notáveis, era apenas um prelúdio do que viria a acontecer durante a era nazista.

Einstein já estava-se sentindo saturado e iniciou uma longa viagem pelo mundo. Os amigos, Planck, von Laue e outros, insistiam em que ele não deveria abandonar a Alemanha num período difícil como aquele e que não deveria aceitar nenhuma das inúmeras propostas que vinha recebendo do exterior. Leyden atraía-o de maneira bastante peculiar tanto por causa de sua amizade com Ehrenfest quanto por causa da insistência de Lorentz em que ele ali se fixasse. Mas, ao final da viagem, Einstein voltou a Berlim depois de ter estabelecido relações pessoais nos Estados Unidos e em outros países. A situação parecia ter-se acalmado um pouco por volta de 1924, e ele passou a levar uma vida social relativamente ativa. Em casa, recebia grande variedade de pessoas, inclusive o pintor Sleevoigt, o médico Plesch, o químico F. Haber, os músicos F. Kreisler e A. Schnabel, o industrial e Ministro do Exterior Graf Rantzau e o pintor M. Liebermann (Figura 5.7). Em seus momentos de lazer, continuava a tocar violino, atividade que exerceu durante toda a vida. Não se

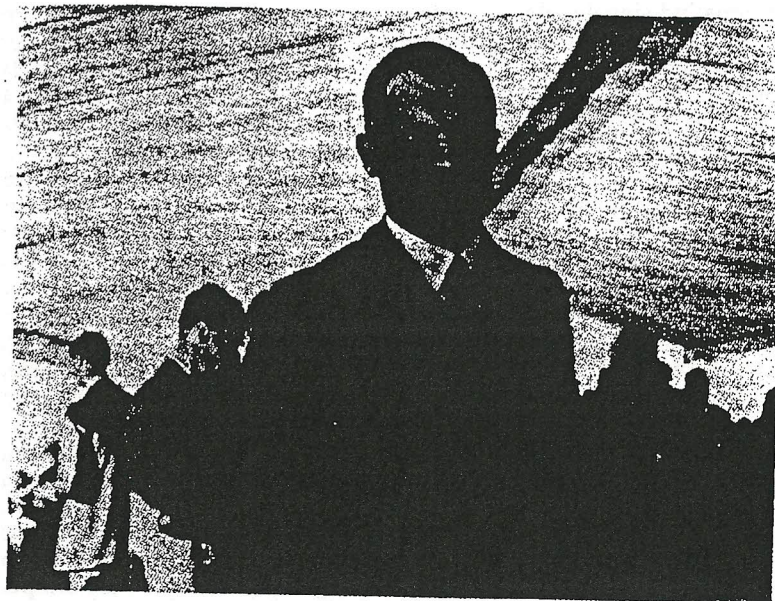


Figura 5.8. Arthur Holly Compton (1892-1967), em foto tirada por F. Rasetti durante uma excursão ao lago de Como organizada para os participantes do Congresso Volta em 1927. Em 1922, Compton tinha feito estudos experimentais sobre colisões fóton-elétron. (Cortesia de F. Rasetti.)

opunha a representar o papel do grande cientista e era evidente que gostava disso. Talvez esse fato explique algumas de suas afetações, sua maneira estranha de vestir-se e alguns hábitos que podem ter sido um tanto exibicionistas. Afinal de contas, era admirador e amigo de Charles Chaplin.

Mas nenhuma dessas atividades desviava Einstein de seus estudos mais sérios. O ano de 1922 fora testemunha de outra confirmação espetacular de seus conceitos sobre os *quanta* quando o físico norte-americano Arthur Holly Compton (1892-1967; Figura 5.8) descobriu que os raios X eram espalhados por elétrons livres como partículas com uma energia  $h\nu$  e com um momento  $h\nu/c$ , conforme Einstein havia predito. Particularmente, o *quantum* difundido tinha uma frequência diferente, que variava de acordo com o ângulo de difusão. Eram fatos que a teoria ondulatória não poderia explicar.

A dualidade onda-corpúsculo da luz estava-se tornando cada vez mais evidente quando um físico indiano desconhecido, Satiendranath (S.N.) Bose (1894-1974), apresentou um manuscrito a Einstein em busca de sua opinião. O manuscrito continha uma nova confirmação da fórmula do corpo negro, obtida através da mecânica estatística; mas Bose considerava os *quanta* de luz, aos quais aplicava a mecânica estatística, de uma forma diferente da usual. A diferença básica é que, na mecânica estatística de Boltzmann, cada molécula



tem uma individualidade; portanto, podemos designar cada uma por um nome e assim reconhecê-la. Em contraste, para Bose, os *quanta* de luz são absolutamente idênticos. Para Boltzmann, a troca da molécula A pela molécula B permite uma nova configuração, que deve ser considerada à parte; mas para Bose a troca de dois *quanta* idênticos não implica outra configuração. O resultado é uma nova confirmação da fórmula do corpo negro. Einstein leu o trabalho que Bose lhe havia enviado, traduziu-o e fez com que fosse publicado em um periódico alemão, acrescentando algumas palavras de louvor e o comentário de que o que Bose tinha feito pelos *quanta* de luz ele mesmo, Einstein, demonstraria ser também possível para as moléculas. Einstein manteve a promessa e em 1924 publicou um trabalho sobre o tema. Assim surgiram as novas estatísticas, que seriam complementadas dois anos depois pela obra de Fermi e Dirac, que mostraram não serem as estatísticas de Bose e de Einstein as únicas possíveis, mas que, na natureza, existem os dois tipos. Trataremos dessa questão mais adiante, quando falarmos de Fermi.

Como era de se esperar, Einstein também calculou as flutuações de um gás Bose-Einstein e mais uma vez descobriu um indício da natureza dual não apenas dos *quanta*, mas também – e aí vinha uma novidade – das moléculas.

A dualidade onda-corpúsculo estava-se tornando cada vez mais evidente a partir da nuvem de mistério em que estava envolvida. Mais ou menos naquela época, L. de Broglie fez progressos decisivos nesse campo. Vamos falar a esse respeito mais tarde, mas aqui também a contribuição de Einstein foi muito importante, sobretudo em seu papel de avalista de conceitos novos e surpreendentes.

À proporção que a fama de Einstein crescia, ele ia fazendo pronunciamentos políticos e humanitários com maior frequência. Também assumiu uma posição firme de pacifista e de defensor do Estado de Israel. Quando Israel foi criado, muitos anos mais tarde, ofereceram a Einstein o cargo de Presidente, mas, sabendo de suas próprias qualidades e limitações, ele declinou do convite. Qualquer boa causa podia ganhar o apoio de Einstein, do mesmo modo como qualquer bom físico que ele conhecesse poderia obter uma recomendação de sua parte. Assim, ironicamente, qualquer recomendação feita por Einstein, que *prima facie* deveria significar muito, passou a não ter valor.

Em 1927, a mecânica quântica não-relativista já poderia ser considerada completa e as primeiras linhas de sua interpretação, segundo a famosa interpretação de Copenhague, já tinham sido formuladas. Bohr apresentou um trabalho a esse respeito à Conferência Internacional de Física, realizada em Como para celebrar o centenário de Volta. Einstein não compareceu à Conferência porque não queria visitar a Itália fascista, mas pouco mais tarde, quando Bohr repetiu as mesmas idéias no Conselho Solvay, recebeu a oposição de Einstein. Bohr, que muitas vezes se inspirara em Einstein, tinha por ele verdadeira idolatria, e Einstein já fizera repetidas manifestações de admiração e apreço por seu colega. A rejeição de Einstein aos mais caros conceitos de Bohr deixaram-no amargurado e desorientado. Surgiu daí um longo debate, durante o qual Bohr destruiu todas as objeções apresentadas por Einstein, mas teve de enfrentar outras, sem, contudo, conseguir

convencê-lo. Até o fim da vida, Einstein, um dos grandes criadores da física quântica, manteve-se cético quanto à interpretação de Copenhague, embora estivesse ficando cada vez mais isolado em seu ponto de vista.

Com a ascensão do nazismo, Einstein finalmente emigrou da Alemanha, onde sem dúvida alguma teria sido morto, e, depois de alguma peregrinação, fixou-se no Institute for Advanced Study de Princeton, New Jersey. A chama de seu gênio estava-se enfraquecendo e Einstein, que durante décadas enxergara mais à frente do que qualquer outro homem e que introduzira algumas das mais profundas e mais proficuas idéias no campo da física, passou a dedicar-se a problemas que aparentemente não tinham solução e que talvez estivessem sendo colocados de forma errônea. As linhas mestras da nova física que se originaram em Berna, Zurique e Berlim não tiveram seqüência a partir de Princeton.

Não obstante, Einstein ainda estava destinado a desempenhar um papel importante, embora paradoxal para um pacifista: pressionar os Estados Unidos para que fosse construída a bomba atômica. Chamo esse papel de paradoxal, mas trata-se de posição que se enquadrava em seus próprios princípios nas circunstâncias da Segunda Guerra Mundial. Mas era um passo mais político do que técnico: Einstein certamente não estava em dia com a física nuclear da década de quarenta, nem contribuiu tecnicamente para o desenvolvimento da energia atômica. Em 18 de abril de 1955, terminou seus dias tranqüilamente, em Princeton, aos setenta e seis anos de idade.

A respeito de si próprio, certa vez afirmou o seguinte: “Deus é inexorável no oferecimento de dons. Deu-me apenas a teimosia de uma mula. Não! Deu-me também um agudo sentido do olfato!”