
ALBERT EINSTEIN E A FÍSICA QUÂNTICA⁺*

Paulo Henrique Dionísio
Instituto de Física – UFRGS
Porto Alegre – RS

Resumo

Discute-se o artigo “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz”, publicado por Albert Einstein em 1905. Mostra-se que Einstein propôs, para o problema da radiação de corpo negro, uma solução diferente e independente da apresentada por Max Planck cinco anos antes, o que se pode considerar, então, como uma segunda fundação da Física Quântica. Cumpre-se, assim, o propósito deste trabalho, qual seja o de contribuir para que a obra de Albert Einstein seja apreciada em sua totalidade, de modo que as suas repercussões no mundo moderno sejam devidamente compreendidas, reconhecidas e avaliadas. Colateralmente, sugere-se uma pequena alteração nos cursos de física moderna, no que diz respeito à introdução do conceito de fóton.

Palavras-chave: *Albert Einstein, Física Quântica, radiação de corpo negro, fótons, regra de Stokes.*

Abstract

The paper "On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light" published by Albert Einstein in 1905 is discussed. It is shown that Einstein proposed a different and independent solution to the problem of blackbody radiation from the one presented by Max Planck in 1900, thus beginning Quantum Physics for the second time. The present work intends to contribute for the knowledge of the work of Albert Einstein in its whole extension, so that its meaning and consequences for the modern world could be fully recognized and evaluated. It is suggested, in addition, a small modification concerning the presentation of the concept of photons in modern physics classes.

⁺ Albert Einstein and Quantum Physics

* Recebido: maio de 2005.
Aceito: julho de 2005.

Keywords: *Albert Einstein, Quantum Physics, blackbody radiation, photons, Stokes rule.*

I. Introdução

2005 é o Ano Mundial da Física. Há cem anos, em 1905, Albert Einstein surpreendeu o mundo científico com a publicação de cinco artigos nos *Annalen der Physik*, um dos mais prestigiosos periódicos especializados do mundo. Esses artigos desencadearam uma verdadeira revolução científica e, por via de consequência, contribuíram decisivamente para a revolução tecnológica que ocorreu principalmente na segunda metade do Século XX. Não há como ignorar a relevância desses eventos: basta reconhecer a onipresença da tecnologia em nossas vidas e a sua influência decisiva no estabelecimento de novas relações sócio-econômico-culturais na aldeia global. Eis porque 1905 ficou conhecido como *o ano miraculoso de Einstein*.

Einstein tornou-se famoso por sua Teoria da Relatividade. Todos o reconhecem na figura do quase ancião de cabelos revoltos e basto bigode, geralmente sério, mas às vezes irreverente, mostrando a língua aos fotógrafos. E não há quem, diante de sua figura e de seu nome, não pense imediatamente na palavra *relatividade*. No entanto, apenas dois dos cinco artigos de 1905 versavam sobre esse tema tão popular. O primeiro artigo, o único considerado revolucionário pelo próprio Einstein, intitulado “*Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz*”¹, tratava de Física Quântica. Einstein, portanto, contribuiu decisivamente para o estabelecimento das **duas** colunas sobre as quais se assenta a Física contemporânea: a Teoria da Relatividade e a Física Quântica. Roger Penrose, eminente matemático e físico teórico, deixa isto muito claro em sua brilhante apresentação do livro *O ano Miraculoso de Einstein*². Após considerar que a Física, nos primeiros anos do Século XX, foi sacudida por **duas** revoluções simultâneas, quais sejam o estabelecimento dessas duas colunas mestras, afirma:

*... é particularmente notável que um único físico – Albert Einstein – tivesse percepções tão extraordinariamente profundas a respeito do funcionamento da natureza, que tenha podido estabelecer as bases de **ambas** as revoluções do século em um **único ano**, 1905.*

Assim, quem associa Einstein exclusivamente com a Teoria da Relatividade despreza metade da sua obra, reduz à metade a sua importância. Nosso propósito, neste artigo, é contribuir para que a imagem desse magnífico homem de ciência seja exposta em toda a sua grandiosidade e para que sua obra seja apreciada por inteiro, de modo que a repercussão de suas idéias e realizações em nossas vidas seja devidamente avaliada e compreendida. Para tanto, daremos especial atenção ao papel que

desempenhou no momento histórico em que se estabeleceu a Física Quântica, ou seja, no início do Século XX. Ao final, comentaremos brevemente a sua participação posterior no desenvolvimento dessa área da Física. Embora a narrativa histórica não seja o objetivo deste trabalho, faremos uma descrição resumida do estado da arte na virada do século e alguns poucos dados biográficos serão comentados.

II. A Física ao final do século XIX

Por volta de 1890, a Física vivia uma situação um tanto paradoxal. Por um lado, as hoje denominadas *teorias clássicas da Física* estavam perfeitamente estabelecidas, gozavam de inteira confiança. A Mecânica, a Termodinâmica e o Eletromagnetismo constituíam um formidável arcabouço teórico ao qual nada mais parecia necessário, nem mesmo possível, acrescentar. Aos físicos restava, agora, medir com maior precisão os valores das constantes físicas fundamentais e trabalhar na implementação de aplicações para tantos conhecimentos acumulados. Mas, por outro lado, havia também um certo desconforto, talvez mesmo uma certa perplexidade, pois algumas dificuldades, cuja superação era de início considerada como mera questão de tempo, iam cada vez mais assumindo o aspecto de imensos desafios. O primeiro grande desafio era uma inconsistência teórica entre o Eletromagnetismo e a Mecânica. Por ora, digamos apenas que aquele não atendia a certos requisitos exigidos por esta. O segundo grande desafio era representado por uma série de fenômenos “rebeldes” que, teimosamente, não admitiam explicação no contexto de nenhuma das teorias vigentes então. Três desses fenômenos merecem destaque desde já: a radiação de corpo negro, o efeito fotoelétrico e o espectro de raias dos elementos³. E havia, também, a questão da constituição íntima da matéria. Os químicos de há muito falavam em átomos e moléculas e os físicos já haviam desenvolvido a Teoria Cinética dos Gases, em cujo contexto o comportamento dos gases ideais era razoavelmente bem descrito e fisicamente interpretado sob a hipótese de que fossem constituídos por moléculas. Mas, muitos físicos não admitiam que a matéria fosse *de fato* constituída por tais corpúsculos, de modo que um certo confronto de opiniões se estabelecera no ambiente científico.

III. O problema da radiação de cavidade (ou radiação de corpo negro)

Foi o estudo da chamada radiação de cavidade, ou radiação de corpo negro, que desencadeou o processo de desenvolvimento da Física Quântica. Sabe-se, há muito tempo, que um objeto suficientemente aquecido irradia luz, torna-se incandescente (por exemplo, um ferro em brasa na forja do ferreiro ou o filamento de uma lâmpada). Sabe-se, também, que a coloração da luminosidade irradiada depende da temperatura: à medida que o objeto esquenta, sua cor passa de um vermelho fosco a um

vermelho vivo, a um alaranjado, depois amarelo, branco e, finalmente, azulado. O estudo desse fenômeno, conhecido como *radiação térmica*, era de grande importância já no Século XVIII, pois, com base nele, funciona o *pirômetro ótico*, instrumento de grande aplicação na siderurgia, que experimentava um surto de desenvolvimento naquela época. Deve-se a Kirchhoff a demonstração, por argumentos termodinâmicos, de que o corpo que mais eficientemente emite radiação é também aquele que mais eficientemente absorve a radiação que recebe⁴. A melhor realização prática de um corpo negro ideal, ou seja, aquele capaz de absorver completamente toda a radiação que recebe, é um pequeno orifício na superfície de um objeto oco: toda a radiação que por ele penetra ficará sofrendo sucessivas reflexões nas paredes internas, até ser eventualmente absorvida por completo. Pelo teorema de Kirchhoff, tal orifício é também a melhor realização prática de um irradiador ideal. Quando o objeto oco é aquecido, suas paredes emitem radiação eletromagnética. A radiação emitida pelas paredes internas fica presa na cavidade, sofrendo sucessivas reflexões e sendo em parte reabsorvida. No equilíbrio térmico, a quantidade de energia que as paredes emitem é igual à que reabsorvem. A radiação de cavidade, ou radiação de corpo negro, consiste na pequena porção de radiação que escapa pelo orifício.

Ao final do Século XIX, havia uma considerável massa de dados experimentais a respeito da radiação de cavidade. A grandeza de maior interesse era a chamada radiância espectral, que designaremos por $R_\lambda(T)$ e que serve para mostrar como a radiação emitida pela cavidade se distribui pelos vários comprimentos de onda do espectro eletromagnético. $R_\lambda(T)$ é a quantidade de energia emitida sob a forma de ondas eletromagnéticas de comprimento de onda λ , por unidade de tempo e de área, por uma cavidade mantida à temperatura T . A descrição do fenômeno, do ponto de vista puramente experimental, completou-se quando Max Planck mostrou que os dados podiam ser satisfatoriamente reproduzidos pela expressão matemática

$$R_\lambda(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1)$$

Esta é a Fórmula de Planck para a radiação de corpo negro, na qual as constantes c_1 e c_2 podem ser obtidas por ajuste numérico, isto é, fazendo-se com que o gráfico da função matemática coincida com o gráfico experimental $R_\lambda(T) \times \lambda$. É curioso notar que a fórmula de Planck representa uma alteração mínima em outra fórmula anteriormente aceita, devida a Wien, que é a seguinte:

$$R_\lambda(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T}} \quad (2)$$

Como se vê, a única diferença entre ambas é a subtração da unidade no denominador. Para valores pequenos de λT , elas coincidem; mas, para grandes valores de λT , a fórmula de Planck ajusta-se melhor aos dados experimentais⁵.

A fórmula de Planck e a fórmula de Wien podem ser caracterizadas como semi-empíricas, pois se baseiam em parte na aplicação de argumentos da Termodinâmica, em parte nos dados experimentais. Nenhuma delas, portanto, pode ser considerada uma teoria. Para isso, é necessário deduzi-las a partir de pressupostos teóricos.

IV. A solução de Planck para a radiação de cavidade

As tentativas de explicação teórica do fenômeno supunham a existência de radiadores elementares nas paredes da cavidade, que seriam sistemas mecânicos oscilantes dotados de carga elétrica. De acordo com a Teoria Eletromagnética, tais osciladores, uma vez agitados termicamente, seriam emissores de radiação, mas poderiam também absorver radiação que porventura sobre eles incidisse. No equilíbrio térmico, emissão e absorção se igualariam. Os cálculos baseados em tal modelo teórico, no entanto, não conseguiam reproduzir os resultados experimentais, uma vez que previam a emissão de uma quantidade infinita de energia nas frequências mais altas, o que, obviamente, não correspondia aos fatos observados. Esta embaraçosa dificuldade ficou conhecida como *a catástrofe do ultravioleta*.

Em dezembro de 1900, Max Planck apresentou uma solução ao problema. Este momento marca o nascimento oficial da Física Quântica. A solução, no entanto, era ainda mais embaraçosa do que a dificuldade que viera superar.

A solução proposta por Planck consistia em estabelecer uma séria limitação ao movimento dos osciladores elementares. Segundo ele, um oscilador não poderia vibrar com qualquer energia, mas apenas com algumas poucas energias permitidas, cujos valores seriam múltiplos inteiros de um valor mínimo fundamental, denominado o *quantum* de energia. Sendo ν a frequência natural de um dado oscilador, seu quantum de energia valeria $E = h\nu$, onde h é uma constante universal, denominada *constante de Planck*. E suas energias permitidas seriam:

$$E_n = nh\nu \quad (3)$$

n representando um número natural.

Em suma, Planck postulou que a energia dos osciladores é uma variável discreta. Ou, como se passou a dizer então, a energia dos osciladores é uma grandeza *quantizada*. Refazendo os cálculos, agora submetendo os osciladores elementares a esta restrição, Planck deduziu, a partir de princípios teóricos, a mesma fórmula empírica extraída dos dados experimentais. Estava explicado o fenômeno da radiação de cavidade. Foi a primeira grande vitória sobre os desafios que os físicos enfrentavam ao final do Século XIX.

Porém, o alívio de encontrar uma solução para um problema que já se arrastava há anos veio acompanhado de uma certa perplexidade e desconforto. Ocorre que este peculiar comportamento dos osciladores de Planck violava as tão bem suce-

didadas e confiáveis leis da Mecânica. Segundo elas, a frequência dos osciladores físicos depende de sua natureza e constituição, mas a energia de oscilação tem a ver apenas com a amplitude do seu movimento periódico. Opor restrições à energia seria o mesmo que opor restrições à amplitude e não havia como compreender que um oscilador fosse proibido de oscilar com qualquer amplitude por causa de sua frequência. Compreenderemos melhor este impasse analisando um exemplo bem conhecido.

Considere um pêndulo simples. Suas leis de movimento podem ser facilmente deduzidas das leis da Mecânica. Para o caso de pequenas oscilações, sua frequência ν depende apenas de seu comprimento ℓ :

$$\nu = \sqrt{g/\ell} / 2\pi \cong 1/2\sqrt{\ell} \quad (4)$$

onde g é a aceleração da gravidade e a igualdade aproximada vale quando se usam unidades SI. Admitindo-se que o pêndulo se comportasse como um oscilador de Planck, teríamos, para o seu quantum de energia e para suas energias de oscilação permitidas, respectivamente:

$$E = h\nu \cong h/2\sqrt{\ell} \quad (5)$$

$$E_n = nh\nu \cong n(h/2\sqrt{\ell}) \quad (6)$$

Mas a energia de oscilação depende da massa suspensa m e da altura H_n que o pêndulo alcança acima de sua posição de repouso:

$$E_n = mgH_n \cong 10mH_n \quad (7)$$

Ora, se apenas algumas energias E_n são permitidas, então apenas algumas alturas H_n sê-lo-ão também.

Suponhamos, por exemplo, um objeto de 100g de massa suspenso por um fio de 4m de comprimento. Pela eq. 4, a frequência deste pêndulo será $\frac{1}{4}$ de oscilação por segundo, ou seja, levará quatro segundos para perfazer uma oscilação completa. Suponhamos, por um momento, que a constante de Planck valha 1 Joule×segundo. Pela eq. 5, este pêndulo somente poderia oscilar com energias, de $\frac{1}{4}$ J, $\frac{1}{2}$ J, $\frac{3}{4}$ J e assim sucessivamente. Pela eq. 7, isto implica apenas oscilações até alturas de 25cm, 50cm, 75cm etc. acima da posição de repouso. Seria impossível, por exemplo, dar a esse pêndulo uma energia de 0,4 J, que o faria oscilar até uma altura de 40cm. Ele simplesmente se negaria a mover-se e devolveria o impulso a quem o empurrou, obrigando-o a recuar. Ora, nenhum pêndulo ou oscilador físico conhecido funciona desta maneira. Imagine-se tentando embalar uma criança em um balanço que funcionasse assim! Como, então, admitir que seja este o comportamento dos osciladores eletromecânicos nas paredes da cavidade?!

Restauramos, agora, a verdade completa. Os ajustes numéricos necessários à concordância da teoria de Planck com os dados experimentais conduzem a um valor extremamente pequeno para a constante de Planck:

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

No exemplo acima, se o pêndulo oscilar até uma altura $H_n = 1\text{m}$, sua energia de oscilação valerá $E_n = 1\text{J}$, mas seu quantum de energia valerá $E = h\nu = 1,66 \times 10^{-34}\text{ J}$. A separação entre as alturas de oscilação permitidas será de apenas $1,66 \times 10^{-34}\text{ m}$, ou seja, infinitamente menor do que o próprio núcleo atômico. Assim, para todos os fins práticos, tanto faz considerar o espectro de energias e o conjunto das amplitudes permitidas como contínuos ou discretos e não há como saber se o pêndulo se comporta, de fato, a *la Newton* ou a *la Planck*. Mas, considere agora um pêndulo hipotético onde m fosse da ordem da massa atômica (10^{-27} kg), ℓ fosse da ordem das distâncias interatômicas nos sólidos (10^{-10} m) e g fosse substituída por 10^{20} m/s^2 , um valor mais compatível com a intensidade das interações elétricas entre partículas submicroscópicas. Neste caso, considerando-se H_n da ordem de 10^{-11} m , a energia de oscilação E_n seria da ordem de 10^{-18} J e a separação $h\nu$ entre os valores permitidos de energia seria da ordem de 10^{-19} J , o que indica que os efeitos da quantização dominariam o comportamento do sistema.

Hoje, está claro que a Mecânica Clássica não é uma teoria de validade universal, pois conduz a resultados errados quando aplicada a sistemas microscópicos e submicroscópicos, conforme ilustra o exemplo acima. Na época de Planck, no entanto, não se admitia tal possibilidade e ninguém acreditou que se pudesse atribuir qualquer conteúdo físico a sua hipótese. Segundo suas próprias palavras, *“tratou-se de uma hipótese puramente formal, e não refleti muito sobre ela, mas apenas sobre o fato de que, sob quaisquer circunstâncias, custasse o que custasse, um resultado positivo (para o problema da radiação de cavidade) tinha de ser obtido”*⁶.

V. Albert Einstein

No mesmo ano em que Planck apresentou a sua solução para o problema do corpo negro, Einstein, então com vinte e um anos de idade, licenciou-se em Matemática e Física na *Eidgenössische Technische Hochschule* (Escola Politécnica de Zurique – ETH). Lá, teve professores eminentes, como o físico Heinrich Weber e o matemático Hermann Minkowski, que o consideravam negligente e medíocre. Fora das aulas, no entanto, lia textos avançados de Física, buscava informação atualizada sobre o “estado da arte” e dedicava muito tempo a processar mentalmente tudo o que lia. Einstein era um autodidata, um pensador independente. Segundo seus biógrafos, manifestava desde cedo grande interesse pelos fenômenos físicos e movia-o um profundo desejo de descobrir de que são feitas as coisas, como funciona o mundo.

Durante os cinco anos que mediaram entre a sua graduação na ETH e o seu *ano miraculoso*, consciente dos problemas que desafiavam os físicos de então, Einstein assumiu-os como sendo os seus próprios desafios e dedicou-se com obstinação a enfrentá-los. Analisou em profundidade as teorias clássicas, dissecou os seus

fundamentos. Convenceu-se da constituição atômico-molecular da matéria. Inteirou-se dos esforços envidados pelos físicos no sentido de explicar os fenômenos “rebeldes”. Estudou matemática com dedicação invulgar, tendo ele próprio desenvolvido alguns procedimentos de cálculo e de análise estatística, ao perceber que esta disciplina seria uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento de suas idéias. Foi, enfim, um estudante diligente e disciplinado, um trabalhador incansável, um obstinado na busca de respostas para as perguntas que o afligiam e que eram, nada mais, nada menos, do que todas as perguntas em aberto na Física de então. Diante deste quadro, é impossível evitar o lugar comum: um gênio se faz com muita inspiração, sim; mas é necessário, também, uma boa dose de transpiração...

E foi assim que Albert Einstein transformou-se no maior dos físicos do século XX, se não o maior da história da humanidade. Os cinco artigos que publicou em 1905 só podem ser devidamente apreciados se forem vistos em conjunto, no contexto acima descrito. É o que faremos nas seções seguintes, detendo-nos especialmente no primeiro dos cinco artigos, no qual ele praticamente retoma da estaca zero o processo de criação da Física Quântica.

VI. A proposta de Einstein sobre os quanta de luz

O primeiro resultado dos estudos e cogitações de Einstein foi o seu convencimento acerca da constituição atômico molecular da matéria. Partiu, então, para a busca de fatos “*que garantiriam tanto quanto possível a existência de átomos de tamanho finito definido*”⁷. Desenvolveu uma teoria a respeito das forças moleculares e nela baseou sua primeira tentativa de apresentar uma dissertação de doutorado à Universidade de Zurique, já em 1901. Sua dissertação definitiva foi aceita em julho de 1905. Nela, descrevia um método para o cálculo das dimensões moleculares, mediante o qual obteve um diâmetro de $9,9 \times 10^{-8}$ cm para o raio de moléculas de açúcar e o valor de $2,1 \times 10^{23}$ para o número de Avogadro⁸. Um de seus artigos de 1905 é uma versão ligeiramente modificada dessa dissertação. Outro é o seu famoso trabalho sobre o movimento browniano, a respeito do qual muito haveria a ser dito, não fosse outro o nosso propósito aqui. Ressalte-se, apenas, que, neste artigo, Einstein desenvolveu um cálculo teórico para o deslocamento quadrático médio de partículas microscópicas em suspensão em um líquido, cuja confirmação experimental, obtida principalmente por Jean Perrin a partir de 1908, muito contribuiu para a aceitação definitiva da realidade física das moléculas.

A adesão de Einstein à concepção atômico-molecular foi de tal forma convicta, que se propôs aplicá-la à própria luz. Foi o que fez no artigo intitulado “*Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz*”. Nele, praticamente reinventa a Física Quântica; a ele dedicaremos nossa atenção nesta e nas próximas seções.

A Teoria Eletromagnética descrevia a propagação da luz como um fenômeno ondulatório, mas Einstein propôs, no artigo em foco, que um raio luminoso fosse considerado como uma rajada de partículas, mais tarde denominadas *fótons*⁹. Einstein introduziu, assim, a idéia da *quantização do campo eletromagnético*, qualificando-se como precursor da moderna Teoria Quântica de Campos. Utilizando-se desta hipótese revolucionária, explicou quatro daqueles fenômenos “rebeldes” que não se enquadravam nas teorias clássicas, inclusive o efeito fotoelétrico, explicitamente mencionado pelo comitê do Prêmio Nobel como justificativa para conceder-lhe essa honraria em 1921.

Vale a pena transcrever alguns trechos da curta introdução de Einstein a este seu artigo¹⁰. Inicia dizendo:

Há uma profunda diferença formal entre os conceitos teóricos que os físicos formaram a respeito dos gases e de outros corpos ponderáveis e a teoria de Maxwell dos processos eletromagnéticos no assim chamado espaço vazio.

Mais adiante:

De acordo com a teoria de Maxwell, a energia é considerada uma função espacial contínua para todos os fenômenos puramente eletromagnéticos, e, portanto, também para a luz, enquanto, de acordo com o ponto de vista atual dos físicos, a energia de um corpo ponderável deve ser representada como uma soma sobre os átomos e elétrons. A energia de um corpo ponderável não pode ser dividida em um número arbitrariamente grande de partes arbitrariamente pequenas, mas, de acordo com a Teoria de Maxwell, (...) a energia de um raio de luz, emitido de uma fonte puntiforme, espalha-se continuamente sobre um volume sempre crescente.

E ainda:

*De acordo com a hipótese aqui considerada, na propagação de um raio de luz emitido por uma fonte puntiforme, a energia não é continuamente distribuída sobre volumes cada vez maiores de espaço, mas consiste em um número finito de **quanta de energia**¹¹, localizados em pontos do espaço, que se movem sem se dividir e que podem ser absorvidos ou gerados somente como unidades integrais.*

Este é o estilo de Einstein: simples, claro, direto, quase agressivo. Evita a discussão sobre a constituição atômico molecular da matéria, considerando-a, desde logo, como aceita majoritariamente pelos físicos. Confronta-a, sem hesitar, com a consagrada teoria eletromagnética de Maxwell. E sugere, sem cerimônias, a existência dos quanta de energia, na descrição de cujas propriedades por pouco não usa a palavra partículas. No entanto, adverte de maneira surpreendente:

A teoria ondulatória da luz (...) provou-se sobremaneira adequada na descrição de fenômenos puramente ópticos e provavelmente nunca será substituída por outra teoria.

Mas, como poderia a luz ser, ao mesmo tempo, concebida como constituída de quanta e descrita por uma teoria ondulatória? Estava lançado o famoso paradoxo da onda-partícula.

VII. Comparação entre as concepções de Maxwell e de Einstein a respeito da luz

Vale a pena esclarecer melhor a distinção estabelecida por Einstein entre os seus *quanta* e a descrição maxwelliana da luz. De acordo com a Teoria Eletromagnética Clássica, uma fonte luminosa puntiforme e monocromática emite ondas eletromagnéticas cujas frentes de onda expandem-se sob a forma de esferas concêntricas, uniformemente distanciadas no tempo e no espaço. (ver Fig. 1). Assim, conforme escreveu Einstein, “*a energia de um raio de luz, emitido de uma fonte puntiforme, espalha-se continuamente sobre um volume sempre crescente.*” À medida que as frentes de onda se afastam, a onda enfraquece, perde intensidade, pois sua energia se distribui por áreas cada vez maiores. Tecnicamente, a **amplitude de oscilação** diminui. No entanto, uma certa superfície S, colocada conforme mostra a figura, será sempre uniformemente iluminada, isto é, a distribuição da energia luminosa sobre ela será sempre contínua, não importa quão fraca seja a fonte ou quão longe dela esteja a superfície.

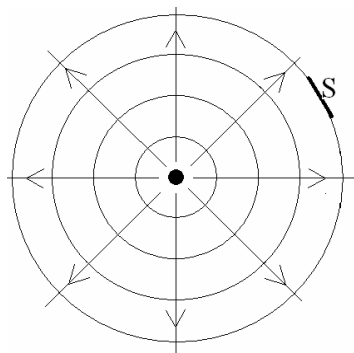


Fig. 1 - A propagação da luz segundo Maxwell: frentes de onda esféricas expandem-se a partir da fonte puntiforme.

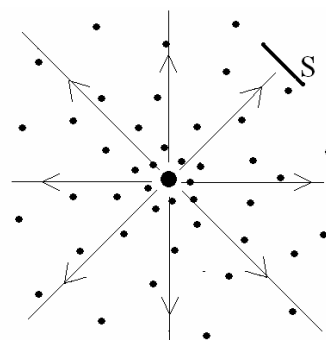


Fig. 2 - A propagação da luz segundo Einstein: fótons gerados pela fonte puntiforme afastam-se radialmente.

Já na descrição proposta por Einstein, a luz consiste em uma certa quantidade de partículas (fótons) expelidas pela fonte, que se afastam radialmente espaço afora (Fig. 2). Um fóton não enfraquece enquanto viaja. Cada fóton possuirá sempre a mesma energia com a qual foi criado e depositará exatamente esta energia sobre uma superfície sobre a qual vier eventualmente a incidir, já “*que se movem sem se dividir e que podem ser absorvidos ou gerados somente como unidades integrais.*” Aqui, a redução de intensidade se faz sentir pela rarefação na concentração de fótons. Se a fonte for fraca e se a superfície S for colocada cada vez mais longe, veremos cada vez menos fótons cintilando sobre ela, mas as cintilações manterão sempre o mesmo brilho.

VIII. A solução de Einstein para a radiação de cavidade

Mas, a Física não vive de argumentos verbais. Einstein encontrou inspiração e justificativas a favor de sua proposta ao estudar a radiação de cavidade (que preferia chamar de radiação de corpo negro) com base nos princípios da Termodinâmica e da Mecânica Estatística. Seu ponto de partida foi a lei semi-empírica de Wien, nossa equação 2. Numa primeira etapa, usando apenas Termodinâmica, deduziu uma relação entre a entropia da radiação e o volume ocupado por ela e, por mera comparação com uma expressão análoga válida para um sistema molecular, concluiu que¹² “*a entropia da radiação monocromática de densidade suficientemente baixa varia com o volume, de acordo com a mesma lei, como a entropia de uma gás ideal ou de uma solução diluída.*”

Em seguida, fazendo uso do princípio de Boltzmann da Mecânica Estatística, segundo o qual a entropia de um sistema em um dado estado é proporcional à probabilidade relativa de ocorrência deste estado ($S = k \ln \omega$, conforme a notação usual na maioria dos textos sobre o assunto), conseguiu detalhar mais ainda a comparação, mostrando que existe correspondência entre o número n de partículas num sistema ga-

so ou numa solução diluída e a grandeza $NE/R\beta v$ no caso da radiação:

$$n \Leftrightarrow \frac{E}{R\beta v / N} \quad (8)$$

Nesta expressão, E é a energia total do sistema; R é a constante universal dos gases; $\beta = c_2/c$ onde c_2 provém da Lei de Wien (equação 2) e c é a velocidade da luz; v é a frequência da radiação; e N é o número de Avogadro. Então, como n é o número total de partículas e E é a energia total do sistema, o denominador $R\beta v/N$ só pode ser a energia por partícula¹³:

A partir disso, podemos concluir também que a radiação monocromática de baixa densidade (...) comporta-se termodinamicamente como se ela consistisse em quanta de energia mutuamente independentes de magnitude $R\beta v/N$.

Pode-se mostrar que $R\beta/N$ equivale à constante de Planck h , mas Einstein não se preocupou com isto. Ele acabara de demonstrar, de maneira totalmente independente, que o fenômeno da radiação de corpo negro admite uma interpretação bem fundamentada na Termodinâmica e na Mecânica Estatística com muito mais conteúdo físico do que a solução encontrada por Planck cinco anos antes.

IX. Comparação entre as propostas de Planck e de Einstein

Assumindo-se a igualdade $R\beta/N = h$, vê-se que a expressão $E = hv$ serve para calcular tanto *os quanta de energia* de Planck quanto *a energia dos quanta* de Einstein. O jogo de palavras enfatiza que, apesar da semelhança formal e da equivalência numérica, o conteúdo físico de ambas as propostas é inteiramente diferente e uma não implica necessariamente na outra.

A Fig. 3 representa um oscilador eletromecânico em interação com a radiação eletromagnética que o circunda, de acordo com a concepção de Planck. Nas paredes de uma cavidade, existem osciladores de todas as frequências possíveis. Em seu interior, propagam-se radiações também de todas as frequências possíveis. Cada oscilador absorve energia somente das ondas cuja frequência é igual a sua frequência própria de oscilação ν , assim como um rádio só pega a emissora na qual está sintonizado. Numa situação de equilíbrio, um oscilador reemite tanta energia quanto absorve, de modo que pode permanecer oscilando indefinidamente em qualquer um de seus estados permitidos de energia $E_n = nh\nu$, pois não existe qualquer restrição ao tempo de permanência neste estado ou à duração espacial ou temporal da onda com a qual interage. Ou seja, embora a energia de oscilação do oscilador seja quantizada, a radiação eletromagnética dentro da cavidade pode continuar sendo vista como composta por ondas eletromagnéticas contínuas no tempo e no espaço, *à moda* Maxwell.

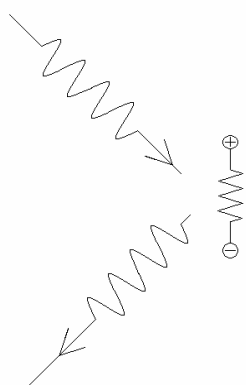


Fig. 3 - Um oscilador eletromecânico em interação com a radiação eletromagnética, na descrição de Planck.

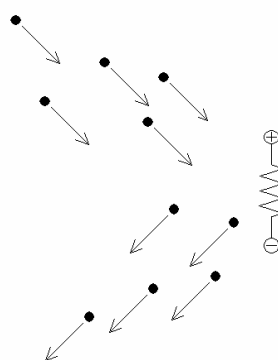


Fig. 4 - um oscilador eletromecânico em interação com a radiação eletromagnética, na descrição de Einstein.

A Fig. 4 mostra o mesmo processo conforme a proposta de Einstein. O oscilador responde apenas à radiação de frequência igual a sua própria frequência de oscilação, como antes. Agora, no entanto, a energia lhe chega aos *quanta*, e ele deve reemitir da mesma forma. Assim, sua energia da oscilação pode estar a todo o momento sofrendo alterações para mais ou para menos, mas sempre em quantidades múltiplas inteiras de $E = h\nu$. No entanto, nada o impede de oscilar com *qualquer* energia. Ele pode, por exemplo, estar, ao mesmo tempo, perdendo energia de maneira contínua por processos dissipativos. Isto é, a energia do oscilador em si não é, obrigatoriamente, uma grandeza quantizada.

Fica claro, assim, que, ao abordarem o mesmo problema, Planck e Einstein encontraram, cada um, uma solução inteiramente original, independente uma da outra, sem qualquer implicação mútua ou recíproca, embora não incompatíveis. Hoje, sabe-se que ambas se realizam simultaneamente.

É interessante, também, acentuar a diferença metodológica entre os tratamentos dados ao mesmo problema por Planck e por Einstein. Planck **deduziu** a lei que governa a radiação espectral da cavidade a partir de primeiros princípios, mesmo que um desses princípios fosse uma inverossímil restrição ao comportamento dos osciladores físicos. Já Einstein partiu dos dados experimentais, conforme descritos pela fórmula semi-empírica de Wien e, interpretando-os à luz da Termodinâmica e da Mecânica Estatística, **inferiu** (o que não é o mesmo que deduzir ou provar) a “*estrutura granular*” da radiação eletromagnética. Aliás, embora Einstein mencione em seu trabalho a fórmula de Planck (eq. 1), partiu, sem justificar, da fórmula de Wien (eq. 2), que não descreve tão bem os resultados experimentais, conforme expusemos na seção III. Aparentemente, esta escolha deveu-se à maior simplicidade matemática da fórmula de Wien, o que facilitou o seu manejo¹⁴. Está claro, então, que Einstein não partiu nem se baseou no postulado de Planck, nem sequer o pressupôs.

Einstein denominou a sua proposta, modestamente, de *um ponto de vista heurístico*. Isto significa que ela era mais voltada para os fatos do que para o conteúdo teórico. Assim, uma vez interpretados os fatos relativos à radiação de corpo negro, ele passou de imediato a justificar sua proposta por sua utilidade na explicação de outros fenômenos, quais sejam os relacionados com a regra de Stokes, o efeito fotoelétrico e a ionização dos gases pela radiação ultravioleta. A explicação do efeito fotoelétrico tornou-se mais famosa e foi explicitamente mencionada como um dos motivos pelos quais ele ganhou o Prêmio Nobel em 1921. Deve-se isto, provavelmente, ao fato de que, ao aplicar ao caso a hipótese dos quanta, ele previu teoricamente o comportamento do potencial de corte em função da frequência da luz incidente¹⁵, um resultado desconhecido na época e confirmado somente cerca de dez anos depois, graças ao gênio experimental de Millikan. A explicação da regra de Stokes, no entanto, é surpreendentemente simples e igualmente eficiente como exemplo didático, conforme veremos a seguir.

X. Sobre a regra de Stokes

A regra de Stokes refere-se aos fenômenos de fotoluminescência, mais especificamente, à fluorescência. A regra, bem conhecida mas não entendida em 1905, especifica que o material fluorescente não pode emitir luz com frequência maior do que a que recebe. Temos um exemplo prático no funcionamento das lâmpadas fluorescentes. Nas lâmpadas a vapor de mercúrio, a excitação do pó que recobre internamente o tubo de vidro é feita por radiação ultravioleta, de maneira que a fluorescência ocorre em todo o espectro visível, resultando em luz branca. Já nas lâmpadas a vapor de sódio, a excitação é feita pela luz amarela característica deste elemento e a fluorescência resulta em luz amarelo-alaranjada, visto que não estão presentes, na luz reemitida, as frequências mais altas do espectro visível.

A regra de Stokes não encontra explicação na Física Clássica basicamente pelas mesmas razões que o efeito fotoelétrico. Classicamente, a energia transportada por uma onda luminosa, isto é, a sua intensidade, tem a ver com a sua amplitude e nada a ver com a sua frequência. Então, um raio de luz suficientemente intenso, seja qual for a sua frequência, deveria excitar fluorescência de *todas* as frequências do espectro eletromagnético, e não apenas das menores do que a sua. A simplicidade da explicação de Einstein, baseada na sua hipótese dos *quanta*, chega a ser acachapante. Deixando de lado os naturais cuidados e precauções de que se cercou, transcrevamos, aqui, apenas o núcleo da argumentação¹⁶:

... então, de acordo com o princípio da conservação da energia, a energia de um quantum emitido não pode ser maior do que a energia do quantum de luz que o produziu; portanto,

$$\frac{R}{N} \beta v_2 \leq \frac{R}{N} \beta v_1$$

ou

$$v_2 \leq v_1.$$

Esta é a já bem conhecida regra de Stokes.

A clareza e a obviedade do argumento são tais, que ousamos sugerir que, doravante, os professores e autores de textos introdutórios de Física Moderna passem a usar a regra de Stokes, e não mais o efeito fotoelétrico, como o primeiro exemplo ilustrativo e a primeira evidência experimental da existência dos fótons, tal como fez o próprio Einstein em seu artigo original.

XI. E a Relatividade?

Vimos, então, que Einstein contribuiu decisivamente para o estabelecimento da concepção sobre a constituição atômico molecular da matéria (ou dos *corpos ponderáveis*, como ele próprio se expressou) e que estendeu essa concepção também para a luz e para as ondas eletromagnéticas em geral. Logrou, assim, explicar vários daqueles fenômenos que não se enquadravam nos cânones da hoje assim chamada *Física Clássica*, quais sejam a própria radiação de corpo negro, a regra de Stokes, o efeito fotoelétrico e a excitação dos gases por radiação ultravioleta. Isto representou, no entanto, um duro golpe contra a Teoria Eletromagnética de Maxwell. Mas ele próprio advertira que essa teoria era por demais consistente e bem fundamentada em fatos, para que pudesse ser simplesmente descartada. Então, ao analisar o conflito entre a Teoria Eletromagnética e a Mecânica, conservou intacta a primeira e mostrou a necessidade de revisão dos conceitos fundamentais da segunda, quais sejam as noções de espaço, tempo e simultaneidade absolutos. Assim surgiu a Teoria da Relatividade.

Os dois últimos artigos de 1905 apresentam a Teoria da Relatividade Restrita. No primeiro deles, Einstein propõe o seu postulado a respeito da constância da velocidade da luz e desenvolve praticamente todo o corpo conceitual da nova teoria. Além da contração do espaço, da dilatação do tempo e da variação da massa com a velocidade, Einstein mostra como devem ser transformados os campos elétricos e magnéticos, de modo que as Equações de Maxwell permaneçam invariantes frente a mudanças entre referenciais inerciais. Resolveu, pois, a inconsistência que havia entre a Mecânica e a Eletrodinâmica. O último artigo é uma espécie de apêndice do anterior e nele propõe a equivalência entre matéria e energia, que se tornou popular sob a forma da equação $E = mc^2$.

XII. Comentários finais

Pode-se, pois, dizer que Einstein solucionou os principais desafios enfrentados pela Física ao final do Século XIX, mas criou desafios ainda maiores, abrindo amplos caminhos para a Física do Século XX. O paradoxo da onda-partícula sintetiza uma boa parte dos novos desafios. Se, no contexto da Física Quântica, a luz passa a ser vista como constituída de fótons, que se comportam como partículas indivisíveis, verdadeiros átomos de luz, cuja energia se relaciona com sua *frequência*, no contexto da Relatividade a luz continua a ser vista como uma onda eletromagnética, contínua no tempo e no espaço, cujo conteúdo de energia se relaciona com sua *amplitude*. Esse paradoxo viria a ser estendido às partículas subatômicas por de Broglie em 1924 e encontraria uma solução satisfatória no contexto da moderna Teoria Quântica de Campos.

Vê-se, então, que Einstein atacou em bloco todas as questões em aberto, e a todas respondeu em bloco, de maneira aparentemente contraditória, porém fecunda. É a isto que Penrose se refere quando fala em *percepções tão extraordinariamente profundas a respeito do funcionamento da natureza*. Contribuiu, pois, para o desenvolvimento da Física moderna em sua totalidade, estabelecendo os fundamentos das duas colunas sobre as quais ela se assenta: a Teoria da Relatividade e a Física Quântica.

A contribuição de Einstein para a Física Quântica não se restringiu ao artigo de 1905. Já em 1907, por exemplo, ele usou os princípios quânticos para explicar o calor específico dos sólidos a baixas temperaturas. Em 1913, Niels Bohr obteve uma descrição satisfatória da estrutura atômica e explicou os espectros de raios dos elementos, outro daqueles fenômenos “rebeldes”, com base na teoria dos fótons de Einstein. Em 1916, mais ou menos à mesma época em que completava a teoria da Relatividade Geral, Einstein publicou um importante trabalho sobre Física Quântica, no qual resolveu em definitivo o problema da radiação do corpo negro. Nesse trabalho, ele mostrou que o equilíbrio térmico entre a radiação e os átomos só é possível se for admitida a possibilidade de um novo mecanismo de interação, ao qual chamou de *emissão estimulada de radiação*. Novamente, só muito mais tarde foi possível comprovar experimentalmente sua proposta teórica, o que aconteceu na década de 1950, mediante a construção dos lasers¹⁷. Sua significativa participação no estabelecimento da estatística quântica está representada pela *estatística de Bose-Einstein*. Por volta de 1930, tornou-se um crítico ferrenho não da Física Quântica, mas da interpretação que ao seu formalismo era dada pelos membros da chamada Escola de Copenhague, liderados por Niels Bohr. Passou, então, a envolver-se em uma discussão de natureza mais filosófica do que científica. Mas isto já é outra história.

Se quisermos avaliar devidamente a importância da obra de Einstein para nossa cultura e nossa civilização, talvez devamos começar com a seguinte questão:

qual de suas contribuições, a criação da Teoria da Relatividade ou o desenvolvimento da Física Quântica, mais diretamente influenciou nossas idéias e nossas vidas? Respondamos de maneira direta e deixemos ao leitor com espírito inquisidor a discussão mais detalhada: certamente, foi a Física Quântica. É claro que, para a Física como ciência, ambas são igualmente importantes, em ambas se apóia a Física contemporânea. Mas não é esta a discussão que propomos. A Relatividade nos obriga a revisar os conceitos mais fundamentais, como as noções de espaço e tempo, de matéria e energia e conduz-nos a grandes discussões cosmológicas, como a finitude do universo e a existência de buracos negros. Mas é a Física Quântica que esmiúça a constituição íntima da matéria e provê ao homem os métodos e procedimentos que o tornam capaz de dominar a natureza, domínio este do qual resulta, em última análise, a tecnologia. Nossa civilização caracteriza-se muito mais pelo progresso material do que pelos avanços das idéias e das concepções filosóficas; em termos de Física, está, certamente, sob o impacto dominante da Física Quântica. A propósito, vale lembrar que, percorrendo a relação dos vencedores do Prêmio Nobel, encontramos facilmente uma dezena de agraciados por sua participação no desenvolvimento da Física Quântica e nenhum, nem mesmo Einstein, pelo estabelecimento da Teoria da Relatividade.

Mas se é assim, como explicar a popularidade da Teoria da Relatividade em detrimento da Física Quântica e a associação quase exclusiva de Einstein com a primeira? Eis aí um interessante fenômeno sócio-cultural a ser investigado por sociólogos, antropólogos, psicólogos das multidões... No que nos diz respeito, na qualidade de professores de Física, conscientizemo-nos de que estamos diante de um equívoco histórico à espera de reparação.

Notas e referências

¹ EINSTEIN, A. **O ano miraculoso de Einstein: cinco artigos que mudaram a face da física**. Organização e Introdução de JOHN STACHEL. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 2001. p. 201-222. Este é um livro de leitura obrigatória para quem deseja informar-se sobre a vida e a obra de Albert Einstein e dele foi extraída a maior parte das informações contidas neste trabalho.

² Ref. 1, p. 8. Os grifos são do próprio Penrose.

³ Consideramos que o leitor esteja familiarizado com esses fenômenos. Para uma introdução ou uma revisão rápida, ver, por exemplo: D. HALLIDAY; R. RESNICK. **Física**. Rio de Janeiro: LTC, 1984. 4. ed., v. 4, cap. 49, p. 272 e seguintes.

⁴ R. M. EISBERG. **Fundamentos da Física Moderna**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979. p. 41.

⁵ Ver figura 49-5 à p. 275 da referência mencionada na nota nº 3.

⁶ FLEMING, H. Max Planck e a Idéia do Quantum de Energia. In: HUSSEIN, M.; SALINAS, S. (Orgs.). **100 anos de física quântica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2001. p.10.

⁷ Ref. 1, p. 91.

⁸ Ref. 1, p. 81.

⁹ A palavra *fóton* foi cunhada pelo americano G. N. Lewis, em 1926. Ver p. 280 da referência mencionada na nota nº 3.

¹⁰ Ref. 1, p. 201-202.

¹¹ O grifo é nosso.

¹² Ref.1, p. 211.

¹³ Ref. 1, p. 215.

¹⁴ Mais tarde, Einstein refez os cálculos, partindo da fórmula de Planck. O resultado, muito interessante, mostra a dualidade do comportamento da luz, mas sua discussão foge ao escopo deste trabalho. Ver: SEGRÈ, E. **Dos Raios-X aos Quarks**. Brasília: Editora UNB, 1987. p. 92.

¹⁵ Ver eq. 49-12 à p. 282 da referência mencionada na nota nº 3.

¹⁶ Ref.1, p. 216.

¹⁷ A palavra *laser* é uma sigla para *light amplification by stimulated emission of radiation*.