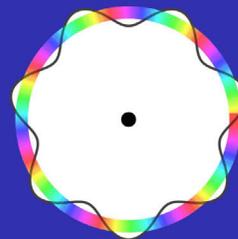
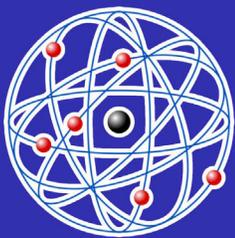


# A História do átomo: uma abordagem profunda e interdisciplinar para o Ensino Médio



M.F.S. Andrade<sup>1</sup>  
P.G. Vivas<sup>1</sup>  
S.L.L. Silva<sup>1, #</sup>

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Nepomuceno, MG, Brasil.

## RESUMO

A história do átomo confunde-se com a história de outras três grandes áreas do conhecimento: física, filosofia e química. Não surpreende, portanto, que estudar essa história nos leva aos maiores desafios intelectuais enfrentados pela humanidade, bem como aos seus maiores triunfos. Longe de ser uma história finalizada, o entendimento completo do átomo ainda possui várias lacunas e é objeto de pesquisas na fronteira da física, como as realizadas no maior acelerador de partículas do mundo, o LHC, na Suíça. Apesar do alto nível técnico exigido para se compreender os últimos avanços no entendimento do átomo, é possível, e muito enriquecedor, fazer um estudo com profundidade sobre os avanços nos modelos atômicos ao longo da história, de uma forma que possa ser trabalhada no Ensino Médio. Neste trabalho, apresentamos um estudo sobre o desenvolvimento da ideia do átomo desde os gregos antigos, como Demócrito e Leucipo, até os fundadores da mecânica quântica moderna, como Bohr, Sommerfeld, Heisenberg e Schrödinger, entre outros. Não utilizamos nenhuma equação ou ferramenta matemática que fuja ao escopo das matérias estudadas no Ensino Médio.

**Palavras-chave:** átomo; modelo atômico; história do átomo

## 1. Introdução

Do que são feitas as coisas? Essa é uma pergunta quase tão antiga quanto a humanidade. Sobre esse tema, não são poucos os volumes escritos ao longo de nossa história. Já acreditamos que tudo era feito de fogo, de água, de uma combinação de fogo, água, ar e terra. Já sugerimos até que tudo o que vemos e sentimos não passa de uma ilusão [1].

A física atual acredita que a natureza se manifesta de duas formas básicas: matéria e energia. Acredita ainda que matéria e energia são faces de uma mesma moeda, já que matéria e energia podem ser convertidas uma na outra, como atesta a famosa teoria da relatividade de Einstein. A relação entre as duas é representada matematicamente pela equação  $E = mc^2$ , onde  $E$  é energia,  $m$  massa e  $c$  é a velocidade da luz [2, 3].

Todas essas questões estão associadas a um conceito que teve sua definição e entendimento, até mesmo sua existência, modificada várias vezes ao longo da nossa história: o átomo! Essas mudanças foram significativamente mais radicais no final do século XIX e em todo o século XX, até nossos dias. O átomo existe? O que é o átomo? É uma partícula fundamental ou constituído por várias partes? Do que é feito? Todas essas questões continuam atuais em pleno século XXI. Não é por acaso que o grande físico e ganhador do prêmio Nobel de física em 1965, Richard P. Feynman, escreveu em suas famosas *Lições de Física* [4]:

Se, em algum cataclismo, todo o conhecimento fosse destruído e apenas uma sentença fosse passada adiante para as próximas gerações de criaturas, que enunciado conteria mais informações em menos

palavras? Acredito que seja a hipótese atômica, de que todas as coisas compõem-se de átomos - pequenas partículas que se deslocam em movimento perpétuo, atraindo umas às outras quando estão a certa distância, mas repelindo-se quando comprimidas umas contra as outras. Nessa única sentença existe uma enorme quantidade de informação sobre o mundo, bastando que apliquemos um pouco de imaginação e raciocínio.

Entender como se deu a evolução da ideia de átomo, em qual teoria repousa esse entendimento e como o vemos nos dias atuais é fundamental para se entenderem os avanços da física nos últimos séculos, bem como sua condição atual. Buscar aprofundar esse entendimento é o objetivo deste trabalho. O trabalho está dividido da seguinte forma: na Seção II será discutido como os gregos desenvolveram suas ideias sobre o conceito atômico (átomo grego). As principais ideias sobre o átomo no período que se estende desde a queda do Império Romano até o século XX (átomo clássico) são apresentadas na Seção III. O entendimento do conceito atômico à luz da mecânica quântica (átomo quântico) é discutido na Seção IV. Reservamos a Seção V para as principais conclusões do trabalho.

## 2. O átomo grego

Os padrões da civilização ocidental foram estabelecidos no curto espaço de tempo de dois séculos, na Grécia antiga. Tal fenômeno é único na história da humanidade. Podemos dizer que o pensamento grego como um todo é ordenado, finalista. Uma marca característica do

#Autor de correspondência. E-mail: saulosilva@cefetmg.br.

pensamento grego é o dualismo. Uma determinada escola adotava um dos lados de um determinado dualismo, a outra fazia duras críticas, adotando o ponto de vista oposto, e uma terceira adotava um ponto de vista intermediário, rejeitando e aceitando pontos de vista das duas outras escolas. Esse tipo de lógica levou Hegel a formular sua filosofia da dialética no século XIX [1].

Um desses dualismos gregos de interesse para nós é a respeito do movimento, objeto de estudo do ramo da física chamado de mecânica. Heráclito de Éfeso (540-470 A.C.) acreditava que tudo era movimento; a famosa frase “todas as coisas estão em constante fluxo” é atribuída a ele. Para Heráclito, o fogo era um elemento fundamental. Na chama de uma lamparina, por exemplo, o tempo todo o querosene está sendo consumido, transformando-se em chama e na fuligem que cai no ambiente. Da mesma forma, tudo o que acontece no mundo é um processo de trocas desse tipo; nada permanece sempre igual, mas tudo está em constante mudança [1, 5, 6].

Já Parmênides de Eléia (530-460 A.C.) não só pensava diferente de Heráclito, mas também seu pensamento era completamente oposto. Parmênides vai argumentar que o movimento simplesmente não existe, é ilusório. Para ele o que “é” é, o que “não é” não pode nem mesmo ser imaginado, pois não se pode imaginar o nada. Consequência direta desse pensamento é que o vazio não existe, o mundo está cheio de matéria por toda parte. Além disso, essa matéria está igualmente distribuída, caso contrário haveria algum lugar de densidade menor e isso seria, de certa forma, “não é”. Essa matéria não pode estar distribuída até o infinito, não pode ter sido criada, deve ser eterna, não pode surgir de algo, pois não existe nada além dela. Esse raciocínio nos leva a uma representação de mundo em forma de uma esfera material, uniforme, sólida e finita, o Uno de Parmênides. Nessa esfera não há tempo, movimento nem nenhuma mudança; é estática, em todos os sentidos [1, 5, 6]. Uma equação bem conhecida da cinemática pode ser usada para ilustrar o pensamento de Parmênides:

$$v_{med} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1},$$

onde  $v_{med}$  é a velocidade média,  $x$  denota posição e  $t$  o tempo. Note que nessa expressão  $x_2$  significa a posição no tempo presente  $t_2$ , enquanto  $x_1$  é a posição em um tempo passado  $t_1$ . Dessa forma, essa expressão compara algo no tempo presente com uma ilusão no passado, pois a partícula não está mais naquela posição. Ela compara algo que existe com algo que não existe mais, de onde

somos levados a concluir, conforme Parmênides, que o movimento (velocidade) é uma ilusão [7].

A ilusão do movimento pregada por Parmênides é bem ilustrada por seu discípulo Zenão de Eléia (504/489-430 A.C.) através de uma série de experi-

mentos mentais que ficaram conhecidos como paradoxos de Zenão. Um deles trata da corrida entre Aquiles e a tartaruga (que deu origem ao problema da lebre e da tartaruga); como Aquiles é 10 vezes mais rápido que a tartaruga, deixa-a começar a corrida a uma distância  $D$  na frente. Depois de dada a largada, após Aquiles percorrer a distância  $D$ , a tartaruga terá percorrido a distância  $D/10$ ; após Aquiles percorrer a distância  $D/10$ , a tartaruga terá percorrido a distância  $D/100$  e assim por diante, de tal forma que Aquiles jamais ultrapassará a tartaruga. Para Zenão esse é um dos exemplos que elucidam a ilusão do movimento [7]. Para resolver esse paradoxo, é necessário o desenvolvimento do ramo da matemática que estuda a convergência das séries infinitas, onde se mostra que uma soma infinita pode dar um resultado finito<sup>1</sup> [7, 8].

Como conciliar a ideia de Heráclito da eterna mudança com o Uno, imutável e estático de Parmênides? A teoria atômica surge para resolver esse problema. Podemos dizer que Melisso de Samos (470-? A.C.)<sup>2</sup> foi um precursor da teoria atômica ao afirmar que se as coisas são muitas, cada uma deve ser como o Uno de Parmênides. No entanto, ele não levou sua ideia adiante, isso foi feito pelos chamados atomistas. Leucipo (500-430 A.C.) introduziu a ideia de que as coisas devem ser constituídas por “átomos”, sendo que o termo átomo significa “indivisível”. Os átomos de Leuci-

po dividem com o Uno de Parmênides as características de serem rígidos, sólidos e indivisíveis. Os átomos possuem a mesma composição, mas diferem em sua forma. Eles se movimentam pelo espaço vazio e, devido a suas formas diferentes, podem se combinar das mais variadas formas possíveis. São essas composições que fornecem a diversidade que vemos à nossa volta. Essa ideia concorda com Heráclito de que tudo flui; por trás dessa fluidez, no entanto, há algo eterno e imutável que não flui: os átomos [1, 9].

Demócrito de Abdera (460-370 A.C.) desenvolveu a teoria do atomismo distinguindo entre o mundo como o percebemos e como ele realmente é. Na frase atribuída a Demócrito, “tudo é vazio e átomos”, fica claro como ele acredita que o mundo seja. Por outro lado, nós o percebemos como cores, sabores, sentimentos etc. Assim como todas as outras coisas, para Demócrito a alma também é feita de átomos. Esses átomos são de formato especial, arredondados e lisos. Quando uma pessoa morre, os átomos de sua alma espalham-se e poderão juntar-se a átomos de outra alma, de modo que a imortalidade de uma pessoa individual não existe [1, 9, 10].

Essa ideia será mais desenvolvida por Epicuro de Samos (341-270 A.C.). Posteriormente, é ele quem batiza essas partículas indivisíveis de átomos. Epicuro, em sua abordagem, antecipa as ideias de conservação da matéria e até o princípio de inércia, como podemos ver nesse trecho de uma carta enviada por ele ao historiador Heródoto [11]:

Nada vem do nada ou do que não existe, pois se assim não fosse, tudo nasceria de tudo sem necessitar de sementes. Se o que se destrói não passasse a ser outra coisa, passando à não existência, tudo já teria se acabado (...) Os átomos se movem continuamente. Devem ter igual velocidade quando se deslocam no vácuo, sem se tocar em nada, pois supondo que nada encontrem que os detenha, nem os mais pesados correm mais que os mais leves, nem os menores que os maiores.

Ele também acrescenta aos átomos a propriedade de peso; com essa introdução, ele pretende explicar o constante movimento dos átomos. Sua abordagem, no entanto, apresenta alguns pro-

**Os átomos se movimentam pelo espaço vazio e, devido a suas formas diferentes, podem se combinar das mais variadas formas possíveis. São essas composições que fornecem a diversidade que vemos à nossa volta**

blemas difíceis de contornar no que diz respeito ao referencial e à forma das ligações atômicas com átomos em constante queda [10].

Por último, destacamos a influência de Lito Lucrécio (95-52 A.C) no desenvolvimento das ideias de átomos. Lucrécio tem grande importância em sua época, por ter traduzido as ideias de Leucipo, Demócrito e Epicuro. Além da tradução, Lucrécio introduziu a ideia das diferentes formas geométricas dos átomos [11].

### 3.0 átomo clássico

Com a queda do Império Romano, a humanidade entra no que chamamos de Idade Média, dominada pela Igreja Católica. Graças aos estudos de Santo Agostinho e Santo Tomás de Aquino, principalmente, as ideias de Aristóteles e Platão são tomadas pela Igreja como verdades inquestionáveis. Como o pensamento atomista é contrário ao pensamento aristotélico, a Igreja não permitia a defesa desse pensamento. Essa censura imposta pela Igreja pode explicar, em parte, a relativa estagnação que observamos no desenvolvimento das ideias atomistas desde os primeiros séculos da Era Cristã até o século XVI no Ocidente.

No entanto, é um engano comum acreditar que até as teorias de Dalton o atomismo não teve relevância no pensamento ocidental. Com a humanidade entrando no que ficou conhecido como Renascimento, os cientistas e filósofos começaram a resistir à autoridade da Igreja Católica e a questionar o aristotelismo. O livro de Lucrécio *De rerum Natura*, onde ele defendia o atomismo, foi condenado pela Igreja nessa época, no V Concílio de Latão [12]. Em seu livro *Galileu herético*, Pietro Redondi defende que um dos principais motivos da condenação de Galileu pela Igreja foi sua defesa do atomismo [12, 13].

Além de Galileu, podemos identificar outros pensadores importantes que defenderam o atomismo. São alguns deles Cícero, Galeno, Giordano Bruno, Telesio, Boyle, Isaac Newton e Bernoulli. Para citar dois grandes pensadores desse período contrários às ideias atômicas, citamos Descartes e Leibniz.

No sentido do desenvolvimento das ideias atomistas, de fundamental importância foram os trabalhos de Robert Boyle (1627-1691). Ele descobriu uma relação entre a pressão de um gás e seu volume a uma temperatura fixa. Essa relação ficou conhecida como lei de Boyle. A lei de Boyle afirma que a pres-

são de um gás é inversamente proporcional ao volume quando a temperatura é mantida constante. Matematicamente, temos

$$P \propto \frac{1}{V},$$

onde  $P$  é a pressão e  $V$  é o volume. Para explicar esse resultado, Boyle propõe que o ar é composto por átomos que se repelem mutuamente quando muito próximos. Isso confere certas características elásticas ao ar: ele resiste a compressões e ocupa todo o volume que o encerra [14].

Em 1738, Daniel Bernoulli (1700-1782) defendeu em seu livro *Hidrodinâmica* que a pressão em um gás é consequência dos choques das partículas do gás com a parede do recipiente; além disso, ele defendia que a temperatura deveria estar relacionada com a agitação das partículas do gás. Ideias como essas de Bernoulli foram responsáveis pelo surgimento de uma área da física muito importante chamada de mecânica estatística ou física estatística [7].

Os trabalhos de Charles e Gay-Lussac mostraram que, mantendo-se a pressão constante, a variação de volume de um gás é proporcional à variação de sua temperatura. Ou seja,

$$V \propto T.$$

Em 1811, Avogadro introduz a ideia de que à mesma temperatura, pressão e volume, qualquer gás contém o mesmo número de moléculas. Em conjunto, as ideias de Boyle, Charles, Gay-Lussac e Avogadro nos permite chegar ao que chamamos de lei dos gases ideais:

$$PV = nRT, \quad (1)$$

onde  $P$  é a pressão,  $V$  é o volume,  $n$  é o número de mols,  $R$  é a constante dos gases ideais e  $T$  é a temperatura absoluta do gás, medida em Kelvin (K).

As ideias de Bernoulli foram desenvolvidas posteriormente por J. Herapath, J. Waterston, Kronig, Clausius e James Clerk Maxwell e foi possível deduzir a lei dos gases ideais partindo do pressuposto de que o gás é constituído por partículas e que a temperatura nada mais é que o grau de agitação (energia cinética) térmico das partículas. Essa é uma das demonstrações mais belas da física e o mais incrível é ser possível

realizá-la apenas com a física aprendida na 1ª série do Ensino Médio. Para fazermos essa demonstração, considere um recipiente de volume  $V$  contendo gás (que vamos considerar que são partículas indivisíveis e não interagentes umas com as outras, gás ideal). A densidade desse gás é  $d$  e dentro do recipiente temos um número  $N$  muito grande de partículas. Vamos estudar o choque dessas partículas na parede do recipiente.<sup>3</sup> Para isso, vamos delimitar um cilindro imaginário dentro do recipiente em que uma das bases do cilindro coincida com a parede do recipiente, conforme a Fig. 1.

No choque com a parede, as partículas transferem quantidade de movimento para ela.<sup>4</sup> Observe que é apenas a componente horizontal do vetor velocidade<sup>5</sup>  $\mathbf{v}$  que transfere quantidade de

movimento para a parede; vamos chamar essa componente de  $v_x$ . Além disso, apenas as partículas que se deslocam da direita para a esquerda colidirão com a parede, portanto apenas essas

transferirão quantidade de movimento. Num tempo  $\Delta t$ , apenas as partículas que estão dentro do cilindro imaginário colidirão com a parede do recipiente marcado pela área  $A$  da base do cilindro. Sabemos que na colisão a quantidade de movimento transferida à parede do recipiente por cada partícula será

$$\begin{aligned} \Delta q &= q_f - q_i = mv_x - (-mv_x) \\ &= 2mv_x, \end{aligned} \quad (2)$$

onde  $m$  é a massa de cada partícula e adotamos o sentido do movimento positivo da esquerda para a direita. O número de partículas dentro do cilindro imaginário é igual à densidade do gás vezes o volume do cilindro

$$n = dV_{cil} = dAv_x\Delta t,$$

já que a altura do cilindro será  $v_x\Delta t$ . A densidade,<sup>6</sup> por sua vez, é igual ao número total de partículas no recipiente dividido pelo volume do recipiente

$$d = \frac{N}{V},$$

logo,

$$n = \left(\frac{N}{V}\right)Av_x\Delta t. \quad (3)$$

Na média, metade das partículas no cilindro movimentam-se para a esquerda

**É um engano comum acreditar que até as teorias de Dalton o atomismo não teve relevância no pensamento ocidental**

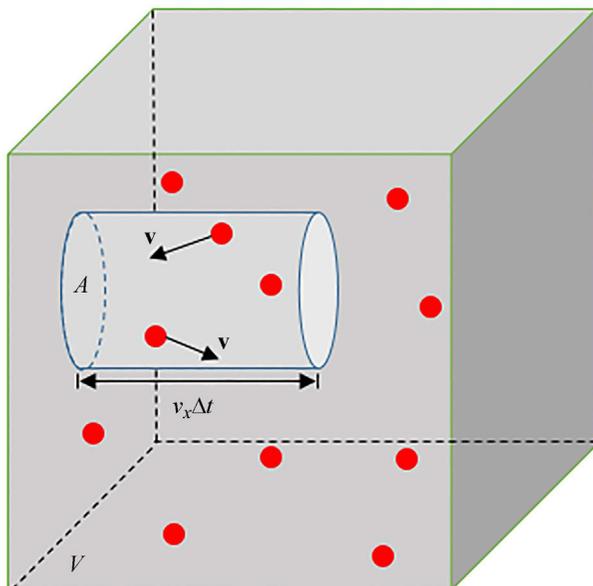


Figura 1 - Recipiente contendo  $N$  partículas de um gás de densidade  $d$ .

e metade para a direita (gás em equilíbrio), dessa forma apenas  $\frac{n}{2}$  partículas colidirão com a parede do recipiente. A quantidade total de quantidade de movimento transmitida à parede do recipiente na área  $A$  será então

$$\Delta Q = \frac{n}{2} \Delta q = \frac{n}{2} 2mv_x,$$

$$\Delta Q = \left(\frac{N}{V}\right) Av_x \Delta t \cdot mv_x,$$

$$\Delta Q = \frac{N}{V} mv_x^2 A \Delta t,$$

ou

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{N}{V} Amv_x^2. \quad (4)$$

Sabemos que  $\Delta q = m\Delta v$ , portanto

$$\begin{aligned} \frac{\Delta q}{\Delta t} &= m \frac{\Delta v}{\Delta t} = ma \\ &= f \quad (2^a \text{ Lei de Newton}) \end{aligned}$$

onde  $a$  é aceleração e  $f$  é a força resultante que uma partícula faz sobre a parede. Podemos dizer então que  $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$  na Eq. (4) é a força total feita na área  $A$  da parede do recipiente por todas as partículas do gás que colidiram nela. Vamos chamar essa força de  $F$ :

$$F = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{N}{V} Amv_x^2,$$

ou

$$\frac{F}{A} = \frac{N}{V} mv_x^2,$$

mas sabemos do estudo da hidrostática que força dividida por área é igual a

pressão  $P$ , logo

$$P = \frac{N}{V} mv_x^2 \Rightarrow PV = Nmv_x^2.$$

Ao levarmos em conta as outras duas dimensões espaciais, podemos escrever o resultado anterior em função da velocidade média quadrática  $v_{med}^2$  em vez apenas da velocidade na direção  $x$ . Como as velocidades das partículas são iguais nas três dimensões (podemos desprezar a gravidade devido à reduzida massa das partículas), temos que  $v_x^2 = \frac{v_{med}^2}{3}$ , logo

$$PV = \frac{1}{3} Nmv_{med}^2.$$

Sabemos também que  $\frac{1}{2}mv^2$  é energia cinética. Como  $N$  é o número total de partículas no gás,  $Nmv_{med}^2$  é o dobro da energia cinética total das partículas que compõem o gás  $E_{Ctotal}$ ; logo,

$$PV = \frac{2}{3} E_{Ctotal}.$$

Já vimos da Eq. (1) que

$$PV = nRT,$$

então, podemos escrever

$$E_{Ctotal} = \frac{3}{2} nRT.$$

Vamos parar um minuto para analisar a beleza do resultado que acabamos de demonstrar. Partimos da ideia de que um gás ideal é feito de átomos e apenas com essa ideia e usando a mecânica newtoniana fomos capazes de concluir que a temperatura nada mais é do que a manifestação macroscópica dos movi-

mentos das partículas microscópicas. Em outras palavras, a temperatura nada mais é do que o grau de agitação (energia cinética) das partículas [15, 16].

Nesse estágio de desenvolvimento, um grande número de cientistas já estava convencido da ideia de que as coisas eram constituídas por partículas. No entanto, ainda não havia nenhuma teoria sobre a forma dessas partículas, suas principais propriedades e como elas interagiam umas com as outras. O primeiro a formular uma teoria atômica com base no moderno método científico que preenche essas lacunas foi o inglês John Dalton (1766-1844), no início do século XIX. Depois de Dalton, a química passa a ter uma estruturação lógica e racional, sem o tratamento místico e pseudocientífico da alquimia [11].

O fascínio de Dalton por meteorologia teve grande contribuição no desenvolvimento da sua teoria atômica. Ele fez registros meteorológicos diários das condições do tempo e das condições atmosféricas durante 46 anos, totalizando aproximadamente duzentas mil observações [17]. O *start* para o desenvolvimento da sua teoria atômica foi dado ao estudar os trabalhos de Lavoisier. Este havia identificado que o ar atmosférico era composto por pelo menos dois gases de pesos diferentes.<sup>7</sup>

Dalton admitiu a hipótese atômica para explicar a formação da atmosfera, ao sugerir que as partículas que compunham os gases atmosféricos eram as mais elementares encontradas até o momento. Ele as chamou de partículas últimas da matéria (o átomo). Apesar de não acrescentar nenhuma novidade ao conceito de partícula, Dalton inovou quando agregou a esse conceito uma série de propriedades químicas. No entanto, manteve o antigo conceito de átomo, que seria imutável e indestrutível. O modelo de Dalton pode ser resumido nos seguintes postulados [11]:

- Os elementos químicos são constituídos de átomos que permanecem inalterados nas reações químicas e não podem ser subdivididos por qualquer reação química conhecida.
- Os átomos de um mesmo elemento são idênticos em todos os aspectos.
- Os compostos químicos são formados pela união de diferentes átomos em proporções simples, como 1:1, 1:2, 2:1 etc.

O próximo passo no desenvolvimento da história do átomo foi uma mudança radical de paradigma. Ela se

deveu ao grande físico J.J. Thomson, ganhador do prêmio Nobel de física de 1906 pela descoberta do elétron [18]. Até o modelo de Thomson, e como o próprio nome sugere, o átomo era visto como uma partícula indivisível, mas a partir dele o átomo deixa de possuir essa característica. No sentido teórico, podemos dizer que Thomson foi o primeiro a “quebrar” o átomo, já que foi o primeiro a propor um modelo atômico divisível. Em 1904, após vários experimentos envolvendo o tubo de Crookes, Thomson propõe seu modelo.

A Fig. 2 apresenta de forma esquemática um tubo de Crookes. Ele consiste em uma ampola de vidro dentro da qual se faz vácuo. Nos extremos da ampola são mantidas duas placas, uma com carga positiva (ânodo) e outra com carga negativa (cátodo). Além disso, entre as placas e próximo ao cátodo é colocado um filamento metálico por onde se passa uma corrente elétrica. A passagem da corrente por esse filamento causa seu aquecimento por meio do efeito Joule. Além disso, hoje sabemos, alguns elétrons do filamento ganham energia suficiente para se libertarem do filamento, o que é conhecido como efeito termiônico.

Quando as fontes de tensão apresentadas na Fig. 2 estão ligadas, verifica-se um raio luminoso entre o cátodo e o ânodo.<sup>8</sup> Esse raio recebe a denominação de raio catódico. De forma muito engenhosa, Thomson colocou uma espécie de ventoinha dentro do tubo e verificou que ela era colocada em movimento (no sentido do cátodo para o ânodo) pelos raios catódicos. Isso fez com que ele concluísse que os raios eram constituídos por partículas que possuíam massa. Além disso, os raios respondiam a campos elétricos e magnéticos. Como os raios eram repelidos por cargas negativas e atraídos por cargas positivas, Thomson concluiu que os raios eram constituídos por partículas negativas (que hoje conhecemos como elétrons).

A pergunta que Thomson se fez foi: o que são essas partículas? Não podem ser os átomos de Dalton, uma vez que no modelo de Dalton os átomos são eletricamente neutros. Em vez de chamar essas partículas de átomos - o que estaria mais próximo da origem grega da palavra -, Thomson concluiu que elas deveriam ser “pedaços” de átomos. Como o átomo deve ser eletricamente neutro, Thomson concluiu que o átomo deve ser constituído por partes positivas e negativas. O modelo proposto por

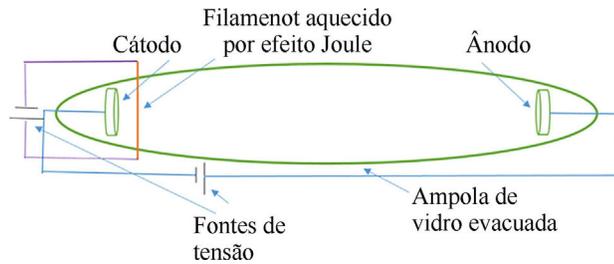


Figura 2 - Esquema de uma ampola de Crookes.

Thomson para explicar os fenômenos observados por ele foi de que o átomo deve ser constituído por partículas negativas (elétrons) distribuídas em uma esfera carregada uniformemente com carga positiva.<sup>9</sup> Mais precisamente, nas palavras do próprio Thomson [19]:

Nós temos primeiramente uma esfera positiva uniformemente eletrificada, e dentro dessa esfera um número de corpúsculos numa série de anéis paralelos, o número de corpúsculos varia de anel para anel: cada corpúsculo está girando em alta velocidade na circunferência do anel em que está situado, e os anéis estão distribuídos de forma que os com maior número de corpúsculos estão mais próximos da superfície da esfera, enquanto aqueles com menor número de corpúsculos estão mais internos.

Finalizando o que estamos chamando de modelo clássico, está um dos maiores físicos do século XX, Ernest Rutherford. Uma das grandes contribuições desse físico foi o estudo das radiações. Rutherford descobriu dois tipos de radiações naturais: raios  $\alpha$  (ou partículas  $\alpha$ ) e os raios  $\beta$  (ou partículas  $\beta$ ). Além disso, estudou também os raios  $\gamma$ , descobertos pelo francês Paul Ulrich

Villard. As partículas  $\alpha$ , sabe-se hoje, são constituídas por núcleos de hélio, carregadas positivamente. As partículas  $\beta$  são elétrons (ou pósitrons) de alta energia geradas no decaimento de um nêutron.<sup>10</sup> Já a radiação  $\gamma$  é uma onda eletromagnética mais penetrante e energética que os raios X.

Rutherford foi aluno de J.J. Thomson e nutria grande admiração pelo mestre. No intuito de testar experimentalmente o modelo de Thomson, ele se valeu de um experimento engenhoso elaborado por Hans Geiger: bombardear uma folha muito fina de um metal com partículas  $\alpha$  e verificar o espalhamento (desvios) sofrido por essas partículas ao passarem pela folha fina do metal. Se o modelo de Thomson estivesse certo, as partículas sofreriam apenas pequenos desvios, já que as partículas  $\alpha$  são muito maiores que os elétrons e a carga positiva está uniformemente espalhada pelo átomo.

Na Fig. 3 está representado esquematicamente, e de forma simplificada, o experimento de Hans Geiger do qual Rutherford se valeu. O experimento foi realizado no vácuo para evitar influência de impurezas no espalhamento das partículas  $\alpha$ . Como esperado, ao fazer o experimento, Rutherford verificou que a maioria das partículas passava com pequenos desvios, devido à interação eletromagnética entre as partículas  $\alpha$  e os constituintes dos átomos do metal.

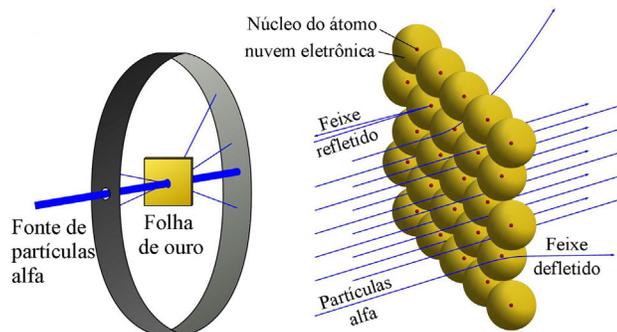


Figura 3 - Esquema do experimento de folha fina elaborado por Rutherford. Fonte: <https://www.tec-science.com/chemistry/atomic-models/rutherford-atomic-model-gold-foil-alpha-ray-particles/>

No entanto, de forma inesperada e muito surpreendente, algumas partículas  $\alpha$  eram ricocheteadas em grandes ângulos. Rutherford ficou tão impressionado com esse resultado que escreveu “Foi praticamente o acontecimento mais inacreditável que aconteceu em minha vida. Era tão inacreditável como se você atirasse um obus<sup>11</sup> de 15 polegadas sobre um pedaço de papel de seda e ele voltasse e o atingisse” [21].

Para explicar os resultados de espalhamento observados, em 1911 Rutherford propôs que o átomo é constituído por uma carga positiva concentrada em seu centro, que ele chamou de núcleo, e com os elétrons girando em torno desse núcleo, conforme a Fig. 4. Esse núcleo é milhares de vezes menor que o raio do átomo, por esse motivo a maioria das partículas a bombardeadas contra a fina folha de metal passa com pouco ou nenhum espalhamento e apenas algumas poucas partículas se aproximam do núcleo e sofrem grande desvio, devido à repulsão entre as partículas  $\alpha$  carregadas positivamente e o núcleo de mesma carga, conforme podemos ver esquematicamente no lado direito da Fig. 3.

O modelo atômico de Rutherford apresenta uma forma para o átomo análoga à do nosso Sistema Solar. Isso sugere uma unificação do macrocosmo com a microfísica. A beleza dessa ideia ainda hoje é espantosa, inebriante e de uma beleza sublime. Embora esse modelo explicasse os espalhamentos para grandes ângulos, ele apresentava vários pontos falhos. Um dos mais graves está relacionado ao que discutimos na Nota 8. Segundo a teoria eletromagnética

de Maxwell, qualquer partícula que possua carga elétrica, quando acelerada, emite radiação eletromagnética. Ora, o movimento dos elétrons em torno do núcleo é um movimento acelerado (aceleração centrípeta),<sup>12</sup> logo, esses elétrons precisam emitir radiação, mas ao emitir radiação perdem energia e caem em direção ao núcleo.<sup>13</sup> Os cálculos mostram que os elétrons cairiam no núcleo em um tempo em torno de  $10^{-12}$  segundos! O tempo estimado de um piscar de olhos é de  $10^{-1}$  segundos. Ou seja, os átomos, segundo o modelo de Rutherford, viveriam por apenas um centésimo de um bilionésimo de um piscar de olhos. Os átomos não seriam estáveis, a matéria não existiria. Mas sabemos que a matéria existe, nós existimos! Para solucionar esse impasse, seria necessária uma teoria totalmente nova e revolucionária que começava a engatinhar na época de Rutherford: a teoria quântica. Bohr (aluno de Rutherford) faria uso dela para propor um outro modelo atômico. Vamos discuti-lo na próxima Seção.

#### 4. O átomo quântico

Antes de discutirmos o próximo modelo atômico, vamos fazer um breve resumo de alguns pontos-chave da física no final do século XIX e início do século XX. Começaremos pelo espectro de emissão de um corpo negro. Um corpo

negro é um corpo que absorve toda a radiação que incide sobre ele. Nenhuma das teorias físicas conhecidas ao final do século XIX era capaz de explicar os experimentos que mediam a densidade de energia em uma cavidade de corpo negro [21]. Na Fig. 5 é apresentado o resultado experimental da medida e a previsão teórica usando a fórmula de Rayleigh-Jeans para a radiação de corpo negro. Vemos que as duas previsões coincidem para

baixas frequências, mas a previsão teórica aumenta indefinidamente quando a frequência aumenta. Esse resultado teórico é absurdo, pois prevê uma densidade de energia infinita. Esse problema ficou conhecido como “catástrofe do ultravioleta”.

Para resolver o problema da catástrofe do ultravioleta, Max Karl Ernst Ludwig Planck, em 1900, propôs uma solução revolucionária. Ele propôs que a energia não seria contínua, mas discreta, constituída por pequenos pacotes de energia, cada um denominado quantum de energia. Está aí o nascimento da teoria quântica e a origem do nome. A respeito dessa descoberta, Planck teria dito a seu filho: “Hoje eu fiz uma descoberta que é tão importante como as descobertas de Newton” [11].

Na proposta de Planck, ao contrário da teoria eletromagnética de Maxwell, a energia da radiação depende da frequência da radiação. A equação para a energia de uma radiação é

$$E_\nu = h\nu,$$

onde  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência da radiação. A constante de Planck vale  $6,62 \times 10^{-34}$  J.s. Observe que esse valor é extremamente pequeno quando comparado com as escalas a que estamos acostumados em nosso dia a dia.<sup>14</sup> Esse fato está por trás do motivo de não percebermos os estranhos fenômenos previstos pela mecânica quântica em nosso cotidiano.

Interessante mencionar que essa ideia é tão revolucionária que o próprio Planck chegou a dizer que essa era uma medida de desespero e que acreditava que era apenas um artifício matemático para resolver o problema, mas que não acreditava que a natureza realmente se

**O modelo atômico de Rutherford apresenta uma forma para o átomo análoga à do nosso Sistema Solar. Isso sugere uma unificação do macrocosmo com a microfísica. A beleza dessa ideia ainda hoje é espantosa, inebriante e de uma beleza sublime**

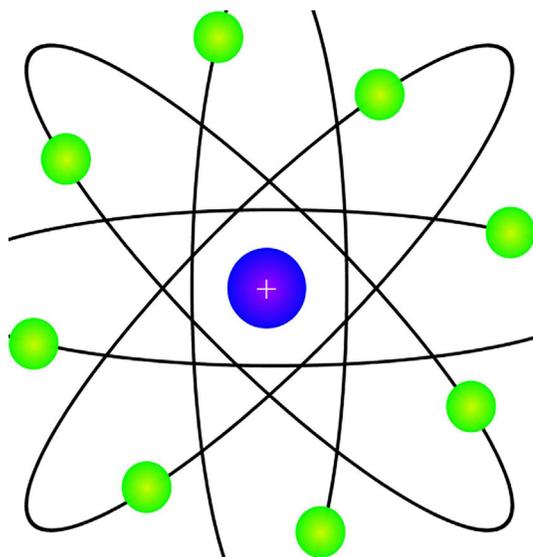


Figura 4 - Esquema do modelo atômico proposto por Rutherford.

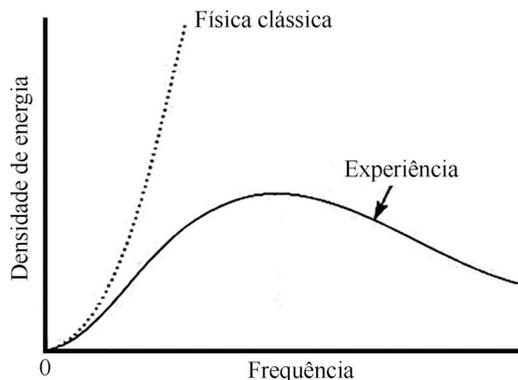


Figura 5 - Comparação entre os resultados para a densidade de energia em uma cavidade de corpo negro da fórmula de Rayleigh-Jeans e as medidas experimentais (modificado da Ref. [22, p. 247]).

comportasse dessa forma [22, 23].

Foi Albert Einstein, em 1905, que deu mais força a essa teoria ao usá-la para explicar um fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico. Esse efeito consiste no fato de que elétrons são ejetados de superfícies metálicas quando se incide luz sobre essa superfície. O interessante desse fenômeno é que se você aumentar a intensidade da luz incidente, aumenta o número de elétrons ejetados, mas não a energia deles. A energia dos elétrons ejetados só aumenta se você aumentar a frequência da luz incidente. A teoria clássica não é capaz de explicar esse fenômeno, mas usando a hipótese do quantum de energia de Planck, Einstein foi capaz de explicá-lo. Einstein interpretou que no efeito fotoelétrico a luz interage com a superfície metálica como se ela fosse constituída por pequenos pacotes cujas energias dependem da frequência da radiação. Nesse sentido, Einstein interpreta a luz como partícula e não como onda. A partir disso, a física não vê mais a luz como onda ou partícula, dizemos que a luz tem um comportamento dual: às vezes se comporta como onda, às vezes como partícula. Por esse trabalho - e suas contribuições à física teórica -, Einstein foi o ganhador do prêmio Nobel de física de 1921.

Outro ponto de grande relevância para nossa análise é o espectro atômico. Para entender esse fenômeno, imagine que um tubo esteja cheio de gás (hidrogênio, por exemplo). Depois aplicamos uma diferença de potencial entre os extremos desse tubo, de forma a passar

uma corrente elétrica pelo gás. Ao passar pelo gás, os elétrons da corrente elétrica acabam interagindo com os átomos do gás e transmitindo parte de sua energia para esses átomos. Com isso, os átomos do gás atingem um nível de energia maior que o anterior. Depois de um certo tempo, esse átomo volta ao seu estado de energia inicial, liberando a energia adquirida na forma de radiação eletromagnética (luz). Esse é o princípio de funcionamento de uma lâmpada fluorescente como a mostrada na Fig. 6.

Newton nos ensinou que ao passarmos luz por um prisma (ou rede de difração), a luz é decomposta em seus comprimentos de onda (cor). Se passarmos a luz do sol por um prisma, como fez Newton, veremos as cores do arco-íris (conforme representação artística mostrada na Fig. 7). As cores do arco-íris que vemos é o que

**A física não vê mais a luz como onda ou partícula, dizemos que a luz tem um comportamento dual: às vezes se comporta como onda, às vezes como partícula**

chamamos de espectro eletromagnético. Observe que as cores vão mudando continuamente de uma para outra: é o que chamamos de espectro contínuo.

Agora imagine que passamos uma corrente por um tubo contendo gás hidrogênio até o gás emitir luz. Podemos passar essa luz por um prisma para verificar o espectro de emissão do átomo de hidrogênio. Ao fazermos isso, não veremos um espectro contínuo como o arco-íris, mas apenas linhas coloridas, conforme a Fig. 8. Esse é um espectro discreto.

O mais interessante é que se você colocar um gás de outro elemento, as linhas espectrais que você observará serão diferentes dessas. Cada elemento tem seu próprio espectro de emissão. Sendo assim, as linhas espectrais funcionam como um tipo de “impressão digital” dos elementos. Esse fato tem uma utilidade prática incrível. Analisando o espectro de emissão, podemos identificar de que é feito determinado objeto desconhecido, como as estrelas, por exemplo<sup>15</sup> [22].

O padrão que se observa nas linhas de emissão dos átomos motivou muitos cientistas a buscar uma equação que descrevesse esses padrões. A equação que descreve as linhas de emissão do espectro visível<sup>16</sup> do hidrogênio foi obtida, empiricamente, por Johann Jakob Balmer, em 1885. A equação encontrada por ele é

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (5)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz que vemos na linha espectral,  $R$  é uma constante e  $n = 3, 4, 5$  e  $6$ . Com  $n$  adequado, essa equação prevê o comprimento de onda das faixas do espectro



Figura 6 - Lâmpada fluorescente tubular.



Figura 7 - Representação artística do experimento de Newton com o prisma. Fonte: [https://warehouse-13-artifact-database.fandom.com/wiki/Isaac\\_Newton%27s\\_Prism?file=Newton%2527s\\_prism\\_experiment.jpg](https://warehouse-13-artifact-database.fandom.com/wiki/Isaac_Newton%27s_Prism?file=Newton%2527s_prism_experiment.jpg)



Figura 8 - Linhas espectrais de emissão do hidrogênio. Fonte: adaptado de [www.promma.ac.th](http://www.promma.ac.th).

do hidrogênio conhecidas na época de Balmer. Vários outros pesquisadores descobriram equações análogas para o espectro de emissão para comprimentos de onda que não são visíveis para o olho humano. No entanto, nenhuma dessas equações explica o motivo da existência dessas linhas. Isso nos leva novamente ao estudo do modelo atômico.

Vimos que de acordo com a física clássica, os elétrons no átomo do modelo de Rutherford deveriam espiralar em direção ao núcleo, emitindo radiação à medida que dele se aproximavam. Ou seja, o modelo de Rutherford prevê a emissão de luz pelo átomo, mas essa emissão seria contínua, não discreta como a observada experimentalmente (Fig. 8). Um modelo atômico realista precisava explicar essa emissão discreta observada. É nesse contexto que surge o dinamarquês Niels Henrik David Bohr, discípulo de Rutherford, para propor um novo modelo atômico que

preenchesse as lacunas deixadas pelo modelo do mestre. O modelo de Bohr parte dos seguintes postulados:

- O elétron, em um átomo, gira em torno do núcleo em um movimento circular uniforme sob ação da força elétrica entre o núcleo (carregado positivamente) e o elétron (carregado negativamente).
- Os elétrons não podem ter qualquer órbita em torno do núcleo. As únicas órbitas possíveis para os elétrons são as que possuem momento angular orbital  $L$  na forma  $L = n\hbar$ , com  $\hbar = h/2\pi$  e  $n$  sendo um número natural,  $n = 1, 2, 3, \dots$
- Mesmo estando acelerado, o elétron não emite radiação quando se move em uma dessas órbitas; sua energia, portanto, permanece constante.
- Quando um elétron muda de uma órbita mais energética com energia  $E_i$  para uma órbita menos energética com energia  $E_f$ , ele faz isso por meio de emissão de radiação cuja frequên-

cia é dada por  $\nu = \frac{E_i - E_f}{h}$ .

Observe que com o primeiro postulado, Bohr mantém a essência do modelo de Rutherford. No segundo postulado, ele utiliza a quantização de Planck, por isso estamos considerando esse o primeiro modelo atômico quântico. No terceiro postulado, Bohr pretende solucionar o problema da estabilidade do átomo. É esse postulado que, nesse modelo, explica o porquê de o elétron não espiralar em direção ao núcleo, perdendo energia rapidamente, como previa o modelo de Rutherford. No quarto postulado, é resgatada a ideia de Einstein sobre a relação entre frequência da radiação e energia e introduzida a ideia de saltos quânticos, uma vez que os elétrons passam de uma órbita para outra sem passar pelo espaço intermediário entre elas.

Você pode estar achando estranho Bohr introduzir esses postulados apenas para “salvar” o modelo de Rutherford, e é estranho mesmo. No entanto, em ciência, o que vai dizer se os postulados são válidos ou não são os resultados que você pode tirar deles. Esses resultados precisam estar de acordo com as medidas experimentais. A natureza é sempre a juíza suprema para dizer se uma teoria e seus postulados são válidos ou não. Não há verdades absolutas em ciência. Mesmo que os experimentos confirmem uma teoria, sempre podem vir, em algum momento, outros experimentos que vão mostrar falhas na mesma teoria. Essa é a grande beleza da ciência, ser inerentemente incompleta, como nós, humanos.

Vamos estudar os principais resultados que os postulados de Bohr nos fornecem. Imaginemos um átomo de hidrogênio, com um próton no núcleo e um elétron girando em torno desse núcleo, conforme a Fig. 9. Como o elétron executa um movimento circular uniforme em torno do núcleo, a força resultante que atua sobre ele é uma resultante centrípeta devido à atração eletrostática cuja intensidade pode ser calculada pela lei de Coulomb,<sup>17</sup>

$$F_{el} = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

onde  $r$  é a distância entre as cargas,  $q_1 = e$  é a carga do núcleo,  $q_2 = -e$  é a carga do elétron ( $e = 1,602 \times 10^{-19}$  C),  $k$  é uma constante dada por  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  e  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  C<sup>2</sup> N<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> é a constante de permissividade do vácuo.

Da 2ª lei de Newton, podemos relacionar a intensidade da força elétrica

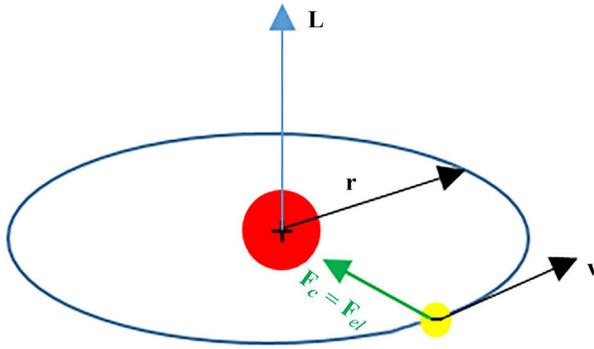


Figura 9 - Representação esquemática de um átomo de hidrogênio segundo o modelo de Bohr.

com a resultante centrípeta

$$F_c = F_{el} \Leftrightarrow \frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}. \quad (6)$$

Sabemos que o módulo do momento angular de um corpo se movendo em movimento circular uniforme com velocidade  $v$  é

$$L = mvr$$

sendo assim, usando o segundo postulado de Bohr,  $L = n\hbar$ , temos

$$L = n\hbar = mvr \Leftrightarrow v = \frac{n\hbar}{mr}. \quad (7)$$

Substituindo a Eq. (7) na Eq. (6), obtemos

$$r = \frac{4\pi\epsilon_0(n\hbar)^2}{me^2}. \quad (8)$$

Tomando a massa do elétron como sendo  $m = 9,11 \times 10^{-31}$  kg e substituindo nessa última equação as constantes já apresentadas e tomando  $n = 1$  (estado fundamental), obtemos o raio de Bohr (raio do estado fundamental do átomo de hidrogênio). O resultado desse cálculo é aproximadamente  $0,5 \times 10^{-10}$  m = 0,5 Å, o que está de acordo com as estimativas feitas desde Thomson.

Outro cálculo interessante de se fazer é o da velocidade do elétron em torno do núcleo no estado fundamental ( $n = 1$ ) do átomo de hidrogênio. Esse cálculo pode ser feito facilmente usando as Eqs. (7) e (8). Fazendo isso, obtemos

$$v = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 n\hbar}, \quad (9)$$

que nos fornece um valor de  $2,2 \times 10^6$  m/s para a velocidade do elétron.<sup>18</sup>

É possível calcularmos a energia orbital no átomo de hidrogênio. Para tanto, sabemos que a energia mecânica do elétron girando em torno do núcleo

é

$$E = E_{pot} + E_{cin},$$

ou seja, é a soma da energia cinética mais potencial do elétron. A energia potencial do elétron girando em torno do núcleo como na Fig. 9 é

$$E_{pot} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

logo,

$$E = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{1}{2}mv^2.$$

fazendo uso da Eq. (6) temos

$$E = -\frac{e^2}{2(4\pi\epsilon_0 r)},$$

Substituindo nessa equação o valor de  $r$  obtido na Eq. (8), chegamos a

$$E = -\frac{me^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{1}{n^2\hbar^2}. \quad (10)$$

Interessante observar que os postulados de Bohr levam naturalmente a energias quantizadas para o átomo de

hidrogênio, já que  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Observe que  $n$  não pode ser igual a zero, como podemos ver da Eq. (9). Observe também que a menor energia possível para o átomo de hidrogênio é quando  $n = 1$  (estado fundamental). A Fig. 10 apresenta os valores das energias para os primeiros níveis. Observe que quanto maior o valor de  $n$ , mais próximos serão os valores das energias. Se aumentarmos muito o valor de  $n$ , os valores de energia se tornarão contínuos (voltando ao caso clássico).

Vamos ver agora o espectro de emissão do átomo de hidrogênio de acordo com o modelo de Bohr. Sabemos que quando um elétron decai de uma órbita mais externa com  $n = n_i$  para uma mais interna com  $n = n_f$  ele emite radiação com frequência (quarto postulado)

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h}.$$

Substituindo nessa expressão a Eq. (10), temos

$$\nu = -\frac{me^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2 h \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2} \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2}\right).$$

Sabemos também que a velocidade de uma onda está relacionada com sua frequência e comprimento de onda através da relação  $v = \lambda\nu$ . No caso de uma onda eletromagnética, chamamos sua velocidade de  $c$ , logo  $c = \lambda\nu$  ou  $\nu = c/\lambda$ .

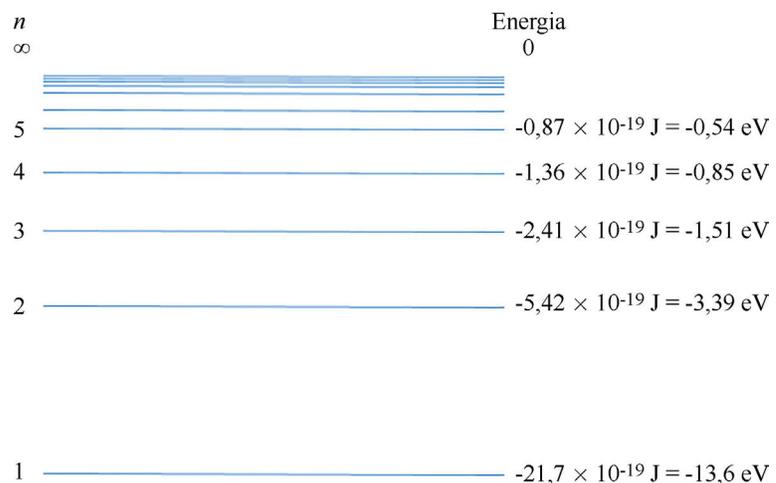


Figura 10 - Representação esquemática dos níveis de energia no átomo de hidrogênio.

Dessa forma, podemos escrever

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right),$$

ou ainda

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right), \text{ com}$$

$$R = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c}. \quad (11)$$

Observe que se fizermos  $n_f = 2$  na Eq. (11) obtemos a equação de Balmer (5). Isso quer dizer que quando um elétron decai para a órbita de  $n = 2$  ele emite luz com os comprimentos de onda previstos por Balmer em sua equação. É nesse decaimento que o elétron emite luz na faixa do visível. Quando o elétron decai para órbitas com  $n$  diferente de 2, ele também emite radiação, mas em frequências que não são visíveis para o olho humano. Na Fig. 11, podemos ver as possíveis transições de orbital do elétron, bem como as linhas de emissão relacionadas aos cientistas que primeiro obtiveram uma equação para elas.

É notável o avanço que o modelo de Bohr alcançou no estudo do átomo. Ele prevê o raio atômico fundamental para o átomo de hidrogênio corretamente, resolve o problema da estabilidade do átomo e prevê corretamente o espectro de emissão. Tudo leva a crer que esse seria o último modelo atômico. Afinal, o

que falta para ser explicado? O modelo de Bohr apresenta alguma falha? Não temos a intenção de te desanimar, mas a verdade é que o modelo de Bohr deixa muitas questões sem resposta e apresenta vários pontos fracos que ainda precisam ser mais bem discutidos.

Antes de mais nada, do ponto de vista fundamental, os postulados de Bohr são muito inquietantes, para dizer o mínimo! O primeiro postulado considera o movimento do elétron sob ação da força de Coulomb, ou seja, considera válida a teoria eletromagnética clássica. No entanto, no terceiro postulado ele considera que o elétron, mesmo acelerado, não emite radiação, em contradição com a mesma teoria clássica que ele aceitou no primeiro postulado. O segundo e quarto postulados correspondem à incorporação de uma teoria completamente nova sugerida por Planck e Einstein e que estava em total contradição com a física clássica. Mesmo em acordo com os experimentos, parece faltar algo no modelo de Bohr. O fato é que, além desses problemas teóricos, o modelo de Bohr começou a apresentar discrepâncias com os experimentos à medida que as técnicas experimentais foram ficando mais elaboradas.

O tratamento matemático a partir desse ponto foge muito ao escopo do Ensino Médio. Como nosso objetivo é apresentar a história do átomo através de uma abordagem que seja compreensível por um aluno do Ensino Médio, os próximos desenvolvimentos que apre-

sentaremos serão puramente qualitativos.

Com o aperfeiçoamento dos espectrômetros, foi verificado que havia sublinhas entre as linhas apresentadas pelo átomo de hidrogênio (Fig. 8). A essas sublinhas deu-se o nome de estrutura fina do espectro. O modelo de Bohr não conseguia explicar essas linhas. Esse problema foi resolvido em 1916 por A. Sommerfeld e W. Wilson. Eles fizeram uso do formalismo Lagrangiano-Hamiltoniano da mecânica clássica (que foge ao escopo deste trabalho) para mostrar que as órbitas dos elétrons em torno do núcleo são, na verdade, órbitas elípticas. Esse fato deixa ainda mais próxima a relação entre o átomo e o Sistema Solar. Kepler nos mostrou que os planetas giram em torno do Sol descrevendo uma elipse e que sua velocidade muda ao longo da trajetória, sendo maior quando estão mais próximos do Sol e menor quando estão mais afastados. Sommerfeld e Wilson mostraram que com o átomo acontece algo parecido e, por conta dessa variação de velocidade, é necessário fazer uma correção relativística na massa dos elétrons. No entanto, de acordo com a relatividade de Einstein, uma mudança na massa gera uma mudança na energia. Está aí a explicação do surgimento da estrutura fina no espectro atômico. Na Fig. 12, apresentamos um esquema do átomo no modelo de Sommerfeld-Wilson com número quântico principal  $n = 3$ . Nela, vemos as órbitas possíveis dos elétrons para os números quânticos secundários  $l = 0$ ,  $l = 1$  e  $l = 2$  possíveis para esse caso [11, 21].

Um passo extremamente importante para se entender o motivo de os elétrons em torno do núcleo não emitirem radiação, mesmo estando acelerados, foi dado pelo príncipe Louis de Broglie em 1924. Einstein havia mostrado que a luz tem um comportamento dual onda-partícula. O que De Broglie fez foi entender esse comportamento dual aos elétrons. A partir de De Broglie, não só

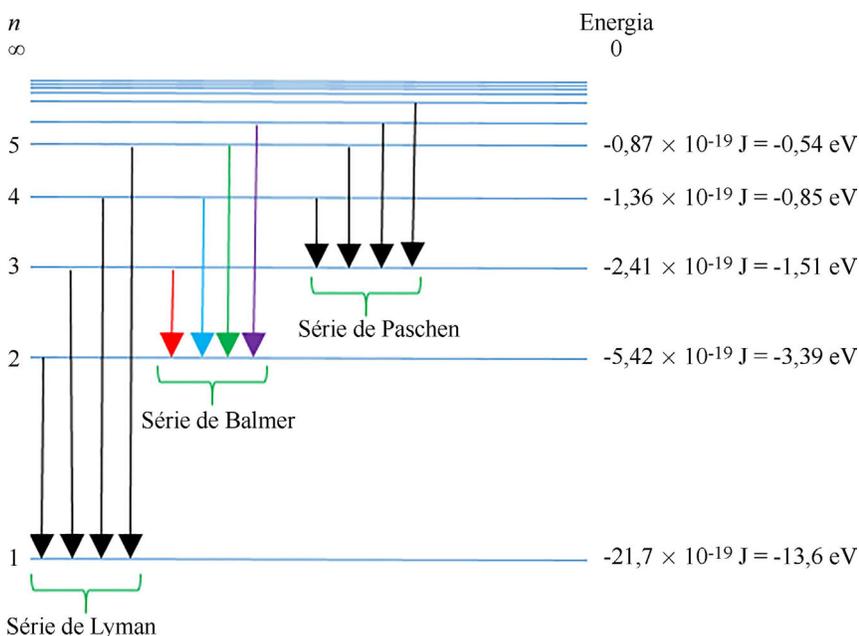


Figura 11 - As transições entre os diferentes níveis de energia do átomo de hidrogênio.

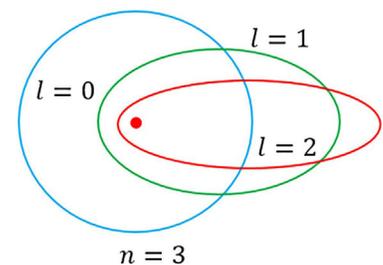


Figura 12 - Ilustração do átomo no modelo de Sommerfeld-Wilson.

a luz pode ser onda e partícula, mas também matéria pode ser onda e partícula, dependendo do experimento que você faça. Levando em conta esse resultado e usando o formalismo introduzido por Sommerfeld-Wilson, é possível mostrar que se entendermos o elétron como uma onda, o movimento dele em torno do núcleo seria uma onda estacionária (como as produzidas em uma corda com as duas extremidades fixas, como em um violão). Uma ilustração dessa ideia é apresentada na Fig. 13. Uma onda estacionária pode ser entendida como sendo a superposição de duas ondas em sentidos opostos com mesma amplitude e frequência em alguma condição de contorno específica. Dessa forma, a potência média, que é a energia dissipada por tempo, na onda é zero. Essa comparação pode nos dar uma ideia intuitiva sobre o motivo pelo qual não é emitida radiação pelo elétron quando ele se move em torno do núcleo em uma órbita estacionária.

O leitor atento e curioso perceberá que o modelo atômico foi se aproximando cada vez mais do modelo do Sistema Solar. Não seria estranho se questionar se o elétron não teria também um movimento de rotação em torno de um eixo que passe pelo seu centro, como a Terra e os outros planetas. E o fato

é que existe algo análogo a isso para o elétron, é o que chamamos de *spin* do elétron. Com avanços ainda maiores na espectroscopia atômica, os cientistas descobriram que além da estrutura fina nas raias espectrais havia também uma estrutura hiperfina. Para explicar esse fenômeno, S.A. Goudsmith e G.E. Uhlenbeck consideraram a hipótese de um giro intrínseco do elétron (*spin*) em torno de um eixo principal [11]. Embora seja tentador fazer a analogia entre o *spin* e a rotação da Terra, por exemplo, é importante salientar que rigorosamente falando o *spin* não é o giro do elétron em torno de um eixo que passa pelo seu centro. Existem várias propriedades do *spin*, previstas pela mecânica

quântica, que nos mostram que essa comparação não faz sentido. O mais correto é tratar o *spin* como o momento angular intrínseco do elétron. O *spin* é uma característica das partículas elementares, não só dos elétrons. No caso dos elétrons, eles só podem “girar” com eixos de quantização dirigidos para cima ou para baixo. É o que chamamos de *spin up* e *spin down*. O valor do *spin* para o elétron é

$$s = \frac{1}{2} \hbar.$$

Uma formulação completa da teoria quântica e seus postulados se deu com

**O que realmente nos dá informação física sobre o sistema quântico é o módulo quadrado da função de onda. Esse número está associado à probabilidade de você fazer uma medida no sistema quântico e encontrá-lo em um determinado estado. Esse é o ponto-chave da mecânica quântica: ela é uma teoria probabilística!**

o físico austríaco Erwin Schrödinger e o físico alemão Werner Heisenberg. As formulações feitas por esses dois físicos são independentes e distintas, embora ambas tenham sido influenciadas pelas ideias de De Broglie. Mesmo com formulações distintas, ambas fornecem os mesmos resultados [11].

Schrödinger elaborou uma teoria ondulatória para a mecânica quântica. Nela, um sistema quântico é descrito pela função de onda de Schrödinger. Essa função de onda pode ser obtida resolvendo a equação conhecida como equação de Schrödinger. O curioso é que a função de Schrödinger é uma função complexa e, portanto, não tem significado físico. O que realmente nos dá informação física sobre o sistema quântico é o módulo quadrado da função de onda, que pertence ao conjunto dos números reais. Esse número está associado à probabilidade de você fazer uma medida no sistema quântico e encontrá-lo em um determinado estado. Esse é o ponto-chave da mecânica quântica: ela é uma teoria probabilística!

Já a formulação de Heisenberg baseia-se no uso de matrizes para representar grandezas cinemáticas e dinâmicas. Por esse motivo, ela é conhecida como formulação matricial da mecânica quântica. É devido a Heisenberg um dos mais famosos princípios da mecânica quântica: o princípio da incerteza de Heisenberg. Esse princípio diz que é impossível se conhecer simultaneamente a posição e a velocidade de um sistema. Quanto mais se conhece a posição (velocidade), mais incerteza se terá sobre a velocidade (posição). Observe que aqui, como na formulação de Schrödinger, somos obrigados a abrir mão da certeza que a física newtoniana nos dava.

Fazendo uso dessa nova formulação da mecânica quântica, somos capazes de entender o átomo de forma mais completa. Uma das mudanças radicais no entendimento dos átomos que a mecânica quântica nos impôs foi que não pode haver órbitas bem definidas para os elétrons em torno do núcleo. Como ela é uma teoria inerentemente probabilística, o que temos é uma maior ou menor probabilidade de observar o elétron a alguma distância específica do núcleo. Nesse caso, falamos em nuvem de probabilidade. Um modelo mais em acordo com a mecânica quântica seria o apresentado esquematicamente na Fig. 14. Quanto mais escuros os pontos na figura, maiores as probabilidades de se encontrar o elétron nessa posição.

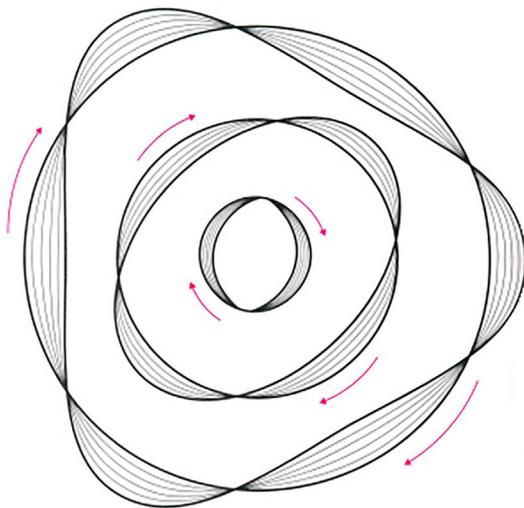


Figura 13 - Ilustração das ondas estacionárias associadas ao elétron em torno do núcleo no átomo [25].

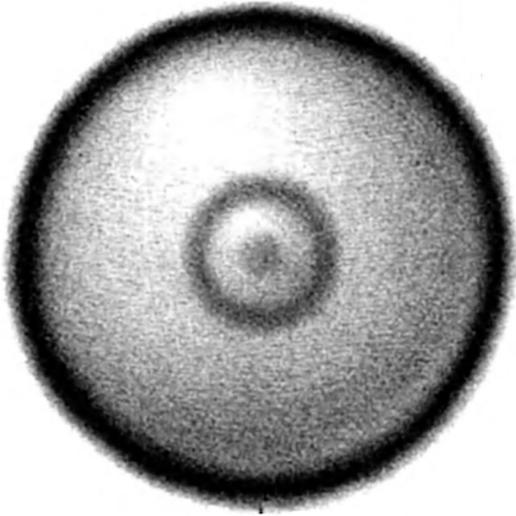


Figura 14 - Representação do aspecto da função densidade de probabilidade para o átomo de hidrogênio [21].

Até o presente momento, a mecânica quântica foi capaz de explicar todos os fenômenos observados experimentalmente envolvendo os átomos e com uma precisão nunca alcançada antes em nenhum ramo do conhecimento humano. Ela ainda se encontra nesse pedestal. É a teoria mais bem-sucedida já desenvolvida pelo intelecto humano. Esse enorme sucesso da teoria não faz dela, no entanto, uma teoria intuitiva, longe disso. Nas palavras do próprio Bohr, “quem diz que a teoria quântica é clara é porque não a entendeu”. Einstein era profundamente incomodado com o caráter probabilístico da teoria quântica, dizia que não acreditava que Deus jogava dados [26]. O fato é que até o momento ela continua sendo a teoria de maior sucesso da ciência, gostemos ou não dela. A história do átomo não se encerra aqui. Ela está em pleno desenvolvimento, mesmo nos dias de hoje - um bom exemplo disso são os experimentos fei-

tos em aceleradores de partículas, como o LHC, no CERN, por exemplo.

Não vamos, e nem poderíamos, contar a história completa do átomo, mesmo porque ela está em pleno desenvolvimento neste momento. Esperamos que este trabalho tenha despertado o interesse por essa incrível história que se confunde com a própria história da ciência e, por que não dizer, da própria humanidade. Como ponto de partida para os interessados em estudar a continuidade dessa história, sugerimos que continuem a partir do estudo do núcleo atômico, que praticamente não abordamos. Essa história daria outro trabalho e o ramo da física que se ocupa desse estudo é a física nuclear. Ela tem grande florescimento a partir do ponto em que paramos: Schrödinger-Heisenberg. Espero que você esteja curioso em saber como o nêutron (uma partícula que não interage com o campo eletromagnético) foi descoberto. Como o núcleo é

constituído por várias (dependendo do elemento) partículas carregadas positivamente (que se repelem) em um espaço inimaginavelmente pequeno ( $\approx 10^{-15}$  m), o que mantém essas partículas ligadas? Prótons e nêutrons podem ser “quebrados” em outras partículas? Quais outras partículas são conhecidas e quais suas propriedades.<sup>19</sup> Enfim, as perguntas são muitas e é muito enriquecedor ir em busca dessas respostas. Algumas ainda não foram encontradas e esse é o grande barato: podemos participar ativamente dessa história.

## 5. Conclusão

Neste trabalho, apresentamos a história do desenvolvimento do modelo atômico desde os gregos até as formulações modernas fornecidas pela mecânica quântica nos anos 20 do século passado. Foi dado um tratamento aprofundado e rigoroso aos modelos, mas mantivemos um formalismo que não fugisse ao escopo das matérias aprendidas no Ensino Médio. Por esse motivo, os modelos posteriores ao apresentado por Bohr foram apresentados de forma puramente qualitativa.

Acreditamos que o texto tenha grande potencial para ser trabalhado em sala de aula, tanto de forma interdisciplinar como em matérias isoladas como física e química. Acreditamos também que o trabalho possa contribuir para despertar o interesse dos alunos pela ciência e pela busca de conhecimento tanto nessa área como em outras.

## Agradecimentos

M.F.S. Andrade agradece à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Recebido em: 19 de Abril de 2021

Aceito em: 6 de Setembro de 2021

## Notas

<sup>1</sup>Um exemplo desse tipo de soma é a soma dos termos de uma progressão geométrica infinita de razão maior que zero e menor que um.

<sup>2</sup>Data da morte de Melisso de Samos é incerta.

<sup>3</sup>Consideraremos que as colisões das partículas que compõem o gás com as paredes do recipiente são perfeitamente elásticas.

<sup>4</sup>Considere que as paredes do recipiente possuem massa infinita, são perfeitamente rígidas e não se movem.

<sup>5</sup>Por simplicidade, vamos considerar que todas as partículas possuem a mesma velocidade.

<sup>6</sup>É mais comum encontrarmos a definição de densidade como sendo massa dividida pelo volume. Nesse caso, no entanto, estamos nos referindo à densidade numérica de partículas no gás. A densidade numérica é calculada dividindo-se o número de partículas por volume.

<sup>7</sup>Fisicamente, o termo correto é massa, mas optamos por usar peso por ser mais usual quando se apresenta o modelo de Dalton, uma vez que foi esse o termo usado por ele.

<sup>8</sup>Nesse período, a teoria eletromagnética clássica de James Clark Maxwell já estava consolidada. Essa teoria nos ensina que qualquer carga, quando acelerada, emite ondas eletromagnéticas (luz). É por isso que os raios catódicos são luminosos, porque os elétrons são acelerados entre o cátodo e o ânodo pelo campo elétrico existente entre esses dois polos.

<sup>9</sup>É comum encontrarmos uma analogia entre esse modelo e um pudim de ameixas ou pudim de passas. Embora essa analogia seja didaticamente ilustrativa e frequentemente utilizada, ela simplifica demasiadamente a ideia original de Thomson e, por esse motivo, optamos por não dar ênfase a ela.

<sup>10</sup>Um pósitron é a antipartícula do elétron, ele possui mesma massa e *spin* do elétron, mas carga elétrica contrária. Um nêutron pode decair em um próton, um elétron e um antineutrino (antipartícula do neutrino) do elétron. Uma questão curiosa é que essa propriedade do nêutron faz com que ele nos lembre o átomo proposto por Thomson. Importante deixar claro que a descoberta do nêutron só se deu em 1932, por James Chadwick [20].

<sup>11</sup>Tipo de ogiva lançada por peça de artilharia.

<sup>12</sup>A configuração dos elétrons em repouso próximo ao núcleo não é estável, pois os elétrons seriam atraídos para dentro do núcleo pela força eletromagnética.

<sup>13</sup>Observe que o Sistema Solar não tem esse problema, pois tanto o Sol quanto os planetas que giram em torno dele são eletricamente neutros.

<sup>14</sup>A constante de Planck tem unidade de momento angular; no sistema internacional de unidade, ela é medida em J.s. A título de comparação, uma massa de 30 kg em movimento circular uniforme com módulo da velocidade 2 m/s e raio de 2 m (situação que pode representar idealmente uma criança em um carrossel) teria um momento angular de 120 J.s. Observe a discrepância entre esse valor e a constante de Planck.

<sup>15</sup>Para ser mais preciso, muitas vezes o que se analisa é o espectro de absorção, mas, para fins de nosso objetivo, a descrição em termos do espectro de emissão já é suficiente [22].

<sup>16</sup>Os elementos também possuem linhas espectrais de emissão com comprimentos de onda que não correspondem à luz visível pelo olho humano. Elas possuem comportamento análogo à Eq. (5), previstos, por exemplo, por Lyman no UV, Paschen no IR, como veremos adiante.

<sup>17</sup>Rigorosamente falando, esse não é um caso eletrostático, já que o elétron está em movimento acelerado em torno do núcleo. Em casos como esse, o correto seria usar a lei de força de Lorentz em vez da de Coulomb, mas para nossos propósitos nesse trabalho, o uso da lei de Coulomb é suficiente [24].

<sup>18</sup>Observe que esse valor é muito menor que a velocidade da luz ( $c = 3 \times 10^8$  m/s), o que justifica se fazer o tratamento feito por Bohr sem levar em conta a teoria da relatividade de Einstein.

<sup>19</sup>Para começar a se inteirar sobre esses assuntos, sugerimos as Refs. [20, 27].

## Referências

- [1] B. Russel, *História do Pensamento Ocidental* (Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 2013).
- [2] A. Einstein, *A Teoria da Relatividade Especial e Geral* (Contraponto, Rio de Janeiro, 2001).
- [3] A. Einstein, *Annalen der Physik* **323**, 639 (1905).
- [4] R.P. Feynman, *Física em Seis Lições* (Ediouro, Rio de Janeiro, 2001), 6ª ed.
- [5] J.C. Souza, *Os Pré-Socráticos*, (Nova Cultural, São Paulo 1996).
- [6] A.S.T. Pires, *Evolução das Ideias da Física* (LF Editorial, São Paulo, 2011), 2ª ed.
- [7] J.F. Rocha, R.I.L. Ponczek, S.T.R. Pinho, R.F.S. Andrade, O.F. Júnior, A.R. Filho, *Origens e Evolução das Ideias da Física* (EDUFBA, Salvador, 2002).
- [8] P. Boulos, *Introdução ao Cálculo* (Edgard Blucher, São Paulo, 1974) vol. 1.
- [9] J. Gaarder, *O Mundo de Sofia* (Cia das Letras, São Paulo, 1995).
- [10] C.M. Porto, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **35**, 4601 (2013).
- [11] J.B. Martins, *A História do Átomo - De Demócrito aos Quarks* (Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2001).
- [12] E. Simões, *Dialektiké* **2**, 104 (2015).
- [13] P. Redondi, *Galileu herético* (Cia das Letras, São Paulo, 1991).
- [14] I. Prigogine, D. Kondepudi, *Termodinâmica* (Éditions Odile Jacob, Lisboa, 1999).
- [15] C. Torres, N. Ferraro, P. Soares, P. Penteado, *Física, Ciência e Tecnologia* (Moderna, São Paulo, 2016), v. 1 e 2, 4ª ed.
- [16] F.W. Sears, M. W. Zemansky, H.D. Young, R.A. Freedman. *Física II* (Pearson, São Paulo, 2011), 12ª ed.
- [17] C.A.L. Filgueiras, *Química Nova na Escola* **20**, 38 (2004).
- [18] J.J. Thomson, *Philosophical Magazine* **44**, 293 (1897).
- [19] J.J. Thomson, *Philosophical Magazine* **7**, 237 (1904).
- [20] D. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles* (Wiley-Vch, New York, 2008).
- [21] R. Eisberg, R. Resnick, *Física Quântica* (Elsevier, Rio de Janeiro, 1979).
- [22] H.M. Nussenzweig, *Curso de Física Básica* (Editora Blucher, São Paulo, 2011) vol. 4.
- [23] P. Strathern, *Bohr e a Teoria Quântica em 90 Minutos* (Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1999).
- [24] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics* (Prentice Hall, New Jersey, 1999) 3ª ed.
- [25] A. Gaspar, *Física: Eletromagnetismo e Física Moderna* (Ática, São Paulo, 2003).
- [26] S. Carroll, *Something Deeply Hidden: Quantum Worlds and the Emergence of Spacetime* (Dutton Books, Boston, 2019).
- [27] M.C.B. Abdala, *O Discreto Charme das Partículas Elementares* (Livraria da Física, São Paulo, 2016).