



JOÃO VICTOR DE OLIVEIRA NETO

**As aplicações da Física Quântica no cotidiano: uma análise
dos livros de Física do Ensino Médio**

SANTA CRUZ / RN
JULHO 2019

JOÃO VICTOR DE OLIVEIRA NETO

**As aplicações da Física Quântica no cotidiano: uma análise
dos livros de Física do Ensino Médio**

Trabalho de Conclusão apresentado à
Coordenação do Curso, como requisito à
obtenção do título de Licenciada em
Física, pelo Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Rio
Grande do Norte Campus Santa Cruz.

ORIENTADOR: Prof. Me. Geogenes Melo
de Lima

SANTA CRUZ / RN
JULHO 2019

JOÃO VICTOR DE OLIVEIRA NETO

**As aplicações da Física Quântica no cotidiano: uma análise
dos livros de Física do Ensino Médio**

Trabalho de Conclusão apresentado à
Coordenação do Curso, como requisito à
obtenção do título de Licenciada em
Física, pelo Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Rio
Grande do Norte Campus Santa Cruz.

Trabalho de conclusão de curso apresentado e aprovado em ___/___/___,
pela seguinte Banca Examinadora:

BANCA EXAMINADORA

Professor Orientador: Prof. Me. Geogenes Melo de Lima
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

1ª Examinador: Prof. Me. Jardel Lucena da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

2º Examinador: Prof. Dr. Francisco Tiago Leitao Muniz
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

SANTA CRUZ / RN
JULHO 2019

Catálogo da publicação na fonte
IFRN

O48a Oliveira Neto, João Victor de.

As aplicações da Física Quântica no cotidiano: uma análise dos livros de Física do Ensino Médio/ João Victor de Oliveira Neto. – 2019.
72 f : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Santa Cruz, 2019.

Orientador: Prof. Me. Geogenes Melo de Lima.

1. Física Quântica. 2. Física no Ensino Médio. 3. Aplicações da Física.
I. Lima, Geogenes Melo de. II. Instituto Federal do Rio Grande do Norte.
III. Título.

CDU 539.1:37

Dedico este trabalho à Deus por me proporcionar forças para enfrentar as dificuldades encontradas ao transcorrer do curso, à minha família e amigos que sempre me motivaram a seguir em frente e ao professor Geogenes Melo de Lima por suas excepcionais orientações que sem dúvida alguma, contribuíram grandemente para minha formação como professor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos meus companheiros de curso, familiares e professores que de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial, agradeço a minha irmã Joemia de Farias Victor, companheira inseparável de vida, que muitas vezes teve de aturar meus discursos sobre o “fantástico mundo da Física Quântica”, enquanto elaborava o presente documento. Além dela, também me sinto na obrigação de citar três grandes amigos que fiz no curso de Licenciatura em Física: Erikarlos David, Maria Adna e Sandyeva Francione. O apoio e incentivo destes motivaram-me a chegar adiante. Jamais esquecerei os cansativos, longos, mas, sobretudo, divertidos dias nos quais estivemos estudando juntos na sala 51 do IFRN Santa Cruz. Por último, agradeço em especial também ao professor Geogenes Melo de Lima, um excelente profissional e grande pessoa. Seus ensinamentos contribuíram grandemente para minha formação não só como docente, mas, também como ser humano.

Mesmo desacreditado e ignorado
por todos não posso desistir, pois,
para mim, vencer é nunca desistir!
(Albert Einstein).

RESUMO

Durante toda a história da humanidade, a observação dos fenômenos naturais e a pretensão de ter controle, sobre os mesmos, possibilitou ao homem o poder de se desenvolver cada vez mais. Com o surgimento da Física Quântica, no início do século XX, a observação dos fenômenos naturais tornou-se mais difícil por se tratar de um “universo extremamente misterioso”. Entretanto, essa Física tem diversas aplicações e está presente em nosso cotidiano, bem mais do que se pode imaginar. Diante disto, será abordado no presente trabalho algumas das diversas aplicações que se baseiam na Física Quântica. Será realizada também uma investigação, nos livros de Física do Ensino Médio, a fim de analisar de que forma tais aplicações vem sendo abordado pelos autores.

Palavras-chave: Física Quântica, Física no Ensino Médio, Aplicações da Física.

ABSTRACT

Throughout the history of mankind, the observation of natural phenomena and the claim to control over them have enabled man to develop ever more. With the advent of quantum physics in the early twentieth century, the observation of natural phenomena has become more difficult because it is an "extremely mysterious universe." However, this Physics has several applications and is present in our daily life, more than you can imagine. In this paper, some of the applications that are based on Quantum Physics will be approached in the present work. An investigation will also be carried out in the books of Physics of High School, in order to analyze how these applications have been approached by the authors

Keywords: Quantum Physics, Physics in High School, Applications of Physics.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	9
CAPÍTULO 2 - A FÍSICA E SUAS CONTRIBUIÇÕES NA HISTÓRIA	11
CAPÍTULO 3 - BREVE HISTÓRIA DO INÍCIO DA FÍSICA MODERNA	14
3.1 Os raios catódicos e a descoberta do elétron	14
3.2 A descoberta dos raios X	16
3.3 Os raios de Becquerel	17
3.4 As descobertas do casal Curie e Rutherford.....	19
CAPÍTULO 4 - O PROBLEMA DA RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO	20
4.1 A radiância espectral	20
4.2 A teoria de Planck para a radiação do corpo negro	23
CAPÍTULO 5 - EINSTEIN E O EFEITO FOTOELÉTRICO	25
CAPÍTULO 6 - ONDAS DE MATÉRIA E O PRINCÍPIO DA INCERTEZA	28
CAPÍTULO 7 - MODELOS ATÔMICOS	30
7.1 O pudim de passas de J.J. Thomson.....	30
7.2 Rutherford e o grande vazio atômico	32
7.3 O modelo atômico quantizado de Bohr	32
CAPÍTULO 8 - A NOVA TEORIA PARA A MECÂNICA QUÂNTICA	36
8.1 A equação de Schroedinger	36
8.2 Soluções da equação de Schroedinger	39
8.3 O caso da barreira de potencial	41
CAPÍTULO 9 - A QUÂNTICA NO COTIDIANO	46

9.1 O LDR e a iluminação pública.....	47
9.2 Produção de raios X e suas aplicações	49
9.3 A tecnologia do Laser	53
9.4 Os microscópios STM e a Nanotecnologia	56
CAPÍTULO 10 - ANÁLISE DOS LIVROS DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO	59
10.1 Metodologia	59
10.2 Bibliografia utilizada	59
CAPÍTULO 11 – DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

A Física é uma das ciências que sem dúvida alguma, proporcionou ao homem inúmeras formas de se desenvolver nas mais diversas áreas sociais no transcorrer da história. Hoje ela está presente na Engenharia, na Eletrônica e até mesmo na Medicina. Como toda ciência, a Física continua a se desenvolver e novas teorias surgem com esse desenvolvimento.

Uma dessas é a chamada *Física Quântica (FQ)*¹, cujos primeiros fenômenos observados e descritos matematicamente se deram a pouco mais de um século. Mesmo sendo uma teoria recente, os estudos realizados em torno dos fenômenos observados pela teoria quântica já são utilizados cotidianamente, sobretudo em aplicações tecnológicas. Ela é a base do funcionamento dos lasers, está presente na formulação de códigos de barra, na produção dos sensores, nos exames de radiografia, na fabricação dos controles remotos, etc.

Devido a todas essas aplicações, alguns temas abordados pela FQ são citados, pelos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM), como sendo importantes no processo de formação dos estudantes da última etapa da Educação Básica.

“A natureza ondulatória e quântica da luz e sua interação com os meios materiais, assim como os modelos de absorção e emissão de energia pelos átomos, são alguns exemplos que também abrem espaço para uma abordagem quântica da estrutura da matéria, em que possam ser modelados os semicondutores e outros dispositivos eletrônicos contemporâneos”. (PCNEM, p. 26)

Todavia, pesquisas científicas voltadas ao Ensino da Física apontam que a teoria quântica ainda não é bem explorada pelos professores no Ensino Médio (EM). Silva e Almeida (2011) levantam em seu trabalho uma série de publicações científicas, produzida por professores de Física, que sugerem a introdução deste conteúdo nas aulas do EM.

¹ A Física Quântica busca explicar, de forma resumida, a natureza de “objetos” de dimensões subatômicas, como por exemplo, elétrons e como funciona a dinâmica destes.

A preocupação em introduzir os conceitos da FQ nas aulas do EM, destacada por Silva e Almeida e também pelos textos dos PCNEM, justifica-se quando analisamos a Lei de Diretrizes e Bases (LDB). Ao lermos o documento, percebemos que hoje, mais que nunca, busca-se aplicar nas escolas uma aprendizagem que torne nossos alunos capazes de perceber os diversos meios de produção que fazem o mundo moderno, juntamente com os processos científicos que constituem os mesmos. Sendo assim, não faz sentido deixar de fora desta aprendizagem conteúdos relacionados à FQ, extremamente presente no mundo em que vivemos.

“O ensino médio, etapa final da educação básica, com duração mínima de três anos, terá como finalidades: [...] a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos [...]”
(LDB, Seção IV, Art. 35)

Acreditamos que uma forma viável de trazer para as salas de aulas do EM, conteúdos ligados a FQ, possa se dar através dos Livros Didáticos. De acordo com Libâneo (2002), o livro didático é uma ferramenta de extrema importância no contexto escolar seja para o professor, seja para o aluno. Através do livro didático é possível que o docente aprimore seus conhecimentos acerca de determinado conteúdo. O livro didático pode apresentar uma forma mais sistematizada e organizada dos conceitos a serem estudados, além de, proporcionar ao discente a possibilidade do estudo em casa. (José Carlos Libâneo apud Amanda Penalva Batista, em: “*Uma análise da relação professor e o livro Didático*”, publicado em 2011).

Diante deste cenário, será realizado no presente trabalho uma análise de alguns livros didáticos de Física para o EM com o propósito de verificar de que forma os autores abordam (se abordam) as aplicações da FQ. Antes de apresentarmos esta análise, faremos uma apresentação dos principais conceitos da teoria quântica, enfatizando o processo histórico no qual estes foram desenvolvidos, e onde estes podem ser observados no nosso dia a dia.

CAPÍTULO 2- A FÍSICA E SUAS CONTRIBUIÇÕES NA HISTÓRIA

Desde a pré-história o ser humano observava os fenômenos naturais e, de alguma maneira, buscou fazer uso destes para sua sobrevivência. Pode-se destacar, por exemplo, a relação do homem com a descoberta do fogo. Provavelmente você já deve ter visto em algum livro de História, ilustrações de homens das cavernas contemplando árvores em chamas após terem sido atingidas por raios. Estas ilustrações sugerem que ao observar tal fenômeno, o ser humano percebeu, de forma natural, que poderia sobreviver nos períodos de inverno se fosse capaz de, ele mesmo, ter domínio para produzir fogo. Esse “domínio” sobre a natureza não serviu apenas para a sobrevivência humana, como também, para o desenvolvimento da espécie na Terra, indo muito além do período pré-histórico.

Rocha (2002, p. 29) em seu livro “*Origens e Evolução das ideias da Física*” destaca a importância dada no Egito antigo à observação do céu. Os registros de aparições e repetições dos astros, no céu, ao decorrer do tempo, permitiu a este povo uma forma bastante eficaz de contar o tempo e desenvolver atividades importantes, como por exemplo, na área da agricultura. Na Grécia antiga, destacam-se as grandes contribuições sociais, atribuídas à Arquimedes, com a construção das primeiras máquinas simples a fim de mover grandes massas e, desta forma, auxiliar na construção das primeiras cidades.

Na Idade Média, surgem na Física grandes nomes como: Nicolau Copérnico, Galileu Galilei, Isaac Newton, dentre outros vários que deram contribuições fantásticas para a humanidade, observando os fenômenos Naturais. Para ter uma noção da importância destes físicos, o próprio Isaac Newton, considerado o pai da Mecânica Clássica, foi responsável por consolidar e apresentar de forma simples, toda a mecânica desenvolvida até então em um conjunto de leis das quais o homem foi capaz de realizar feitos antes nunca imagináveis, como enviar satélites ao espaço ou mesmo fazer uma viagem espacial até a Lua. E não só isso, estudos voltados aos fenômenos ópticos, realizados nessa mesma época, por Snell Van Royen, Descartes, o próprio Isaac Newton e mais adiante por Christiaan Huygens, Pierre de Fermat e outros físicos tem implicações até os dias atuais. Um

exemplo muito claro disso é a famosa “Lei de Snell-Descartes” da óptica geométrica que é a base do funcionamento da tecnologia da fibra óptica usada por diversas empresas modernas de comunicação.

No século XVIII nomes como Sadi Carnot, Thomas Newcomen e James Watt idealizaram e construíram máquinas que contribuíram fortemente para a primeira Revolução Industrial na Europa. O “estudo” dessas máquinas resultou na área da Física que hoje concebemos como Termodinâmica. Os modelos propostos nas máquinas daquela época nos são úteis até os dias de hoje, tendo em vista que a construção dos motores de automóveis, condicionadores de ar e usinas de energia são baseadas nos mesmos princípios de funcionamento das máquinas idealizadas e construídas pelos físicos/engenheiros do século XVIII.

Hoje é incomum que existam casas sem a presença de luz elétrica e, sendo isto verdade, a Física foi a grande responsável por tal fato. De acordo com Moraes (2014, p. 3), foi o médico britânico William Gilbert (1544-1603) quem deu início as primeiras explicações acerca das pesquisas modernas em eletricidade e magnetismo. O fenômeno da eletricidade já era observado pelo homem na Grécia Antiga e há registros de que foi Tales de Mileto (640-546 a.C.) quem primeiro observou que o âmbar, ao ser atritado com outro corpo, ganhava a propriedade de atrair corpos leves. Gilbert foi importante, pois, descobriu uma diversidade de materiais que possuíam essa propriedade do âmbar. Sobre o magnetismo, Isola (2003) destaca que Gilbert ganhou boa reputação em Londres com o trabalho “*De Magnete*” no qual apresentava as propriedades de atração dos ímãs.

As pesquisas feitas em sequência na área da eletricidade e magnetismo por físicos como: Charles Augustin Coulomb (1736-1796), Michael Faraday (1791-1867), André-Marie Ampère (1775-1836), Benjamin Franklin (1706-1790), dentre outros, foram de grande importância para a compreensão da natureza dos fenômenos da eletricidade e do magnetismo. Como consequência do conhecimento adquirido acerca destes fenômenos, puderam-se obter diversas formas de utilizá-los no cotidiano, uma vez que invenções como a da

lâmpada elétrica e o para-raios estão diretamente ligadas à compreensão destes fenômenos.

Já no final do século XIX o físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879), fortemente influenciado com o conhecimento que já se tinha sobre os fenômenos da eletricidade e magnetismo, unificou essas teorias, incorporando-as à Óptica e criou desta forma, uma nova teoria na Física denominada Eletromagnetismo. Maxwell resumiu o Eletromagnetismo em um conjunto de equações que vieram a ser conhecidas como as quatro equações de Maxwell do Eletromagnetismo. Graças à teoria de Maxwell hoje temos diversas tecnologias que tem como princípio de funcionamento o eletromagnetismo, como por exemplo, o trem maglev, a ressonância magnética, o forno micro-ondas dentre outros.

Toda a Física desenvolvida até o fim do século XIX, dividida nas áreas da Mecânica, Termodinâmica, Óptica, Ondas e Eletromagnetismo, é chamada hoje de *Física Clássica*. Essa Física era capaz de explicar quase todos os fenômenos naturais observados pelo homem. Entretanto, no início do século XX surgem problemas dos quais os físicos não eram capazes de explicar através das teorias existentes. Uma frase que ficou bastante popular no meio científico seja ela uma lenda urbana ou não, a respeito destes problemas, está vinculada a Lorde Kelvin (William Thomson), sendo essa frase: “*No céu azul da Física Clássica existem apenas duas nuvens a serem dirimidas*”. As duas nuvens, citadas nesta frase, referem-se às incompatibilidades encontradas entre as transformações de Galileu, da Mecânica Clássica, com o Eletromagnetismo (que resultou mais tarde na criação da Teoria Especial da Relatividade, de Albert Einstein) e aos conflitos presentes no princípio da equipartição da energia, da Termodinâmica Clássica, também em choque com a teoria eletromagnética de Maxwell. Esses dois conflitos marcam o início do que conhecemos hoje como *Física Moderna*, sendo este último o que origina a teoria Quântica. Para uma melhor compreensão do assunto, será apresentada a seguir uma breve história a respeito da origem da Física Moderna a fim de estabelecer como as descobertas nessa nova Física contribuíram para a formulação da FQ.

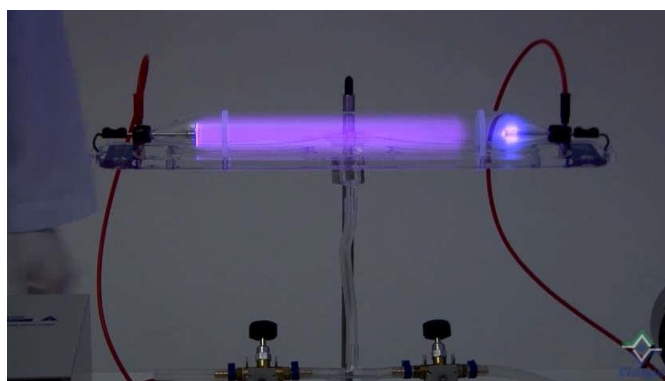
CAPÍTULO 3- BREVE HISTÓRIA DO INÍCIO DA FÍSICA MODERNA

O desenvolvimento da FQ pode ser atribuído a duas frentes de pesquisas que vinham sendo realizadas em grande escala no final do século XIX e constituem o início da Física Moderna. Uma dessas pesquisas estava relacionada ao estudo dos raios catódicos enquanto que a outra estava relacionada com a espectroscopia. Neste capítulo faremos uma breve apresentação histórica a respeito do início da Física Moderna, baseado na obra de Emilio Segrè².

3.1. Os raios catódicos e a descoberta do elétron

Vamos iniciar nossa apresentação histórica falando sobre o que são os raios catódicos. Para isso, vamos voltar ao ano de 1858. Nesta época os físicos esforçavam-se para explicar a estranha luminescência produzida nos equipamentos que vieram a ser chamados de *tubos de Geissler*³, em homenagem a seu criador Heinrich Geissler (1814-1879).

Figura 3.1.1. Tubo de Geissler.



Fonte: Portal online da Cidepe⁴.

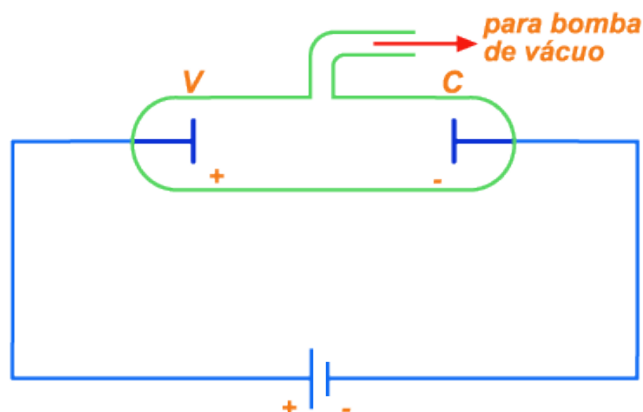
² Emilio Segrè foi um físico Italiano naturalizado norte-americano, ganhador do prêmio Nobel de Física no ano de 1959.

³ Os tubos de Geissler são equipamentos composto por tubos de vidros, os quais têm em suas extremidades, dois eletrodos (catodo e anodo). Também fazem parte do experimento uma bomba de ar e uma fonte de tensão.

⁴ Disponível em: <https://www.cidepe.com.br/index.php/br/produtos-interna/conjunto-tubo-de-geissler-com-fonte-e-bomba-de-vacuo-6536>. Acesso em: jul. 2019.

A figura 3.1.2 ilustra o funcionamento desse tubo.

Figura 3.1.2. Ilustração de funcionamento do tubo de Geissler.



Fonte: USP – Ensino de Física Online⁵.

Uma bomba de vácuo (indicada pela seta vermelha) é responsável por retirar parte do ar contido em um tubo de vidro (em verde). Com a retirada das moléculas de ar, a pressão dentro do tubo diminui e ao se aplicar uma diferença de potencial entre os eletros V e C, o gás comporta-se como condutor. Se o experimento é realizado em ambiente com pouca luz é possível observar luzes ondulando, dentro do tubo de vidro.

Conforme destacam Pieres e Dalt (2011, p. 34) em 1858 Julius Plucker iniciara uma série de atividades experimentais envolvendo descargas elétricas produzidas em tubos de Geissler. Ele percebeu que em funcionamento, os raios produzidos nesses tubos sofriam influência de campos magnéticos e que os raios detectados por ele partiam sempre do catodo. Mais tarde, em 1876, Eugen Goldstein introduziu a estes raios o nome de *raios catódicos*. Três anos depois William Crookes aperfeiçoou o tubo de Geissler de forma que, o novo equipamento construído por ele (chamado de ampolas de Crookes) era capaz de reduzir com mais eficiência a pressão do gás de trabalho.

Pieres e Dalt (2011, p. 34) comentam ainda que embora feitas várias observações utilizando os equipamentos de Geissler, nada se sabia acerca da natureza destes raios. O físico francês Jean Baptiste Perrin (1870-1942) em

⁵ Disponível em: http://efisica.if.usp.br/moderna/conducao-gas/cap1_05/. Acesso em jul. 2019.

1895, colheu provas de que os raios emitidos nas descargas elétricas nos tubos de Geissler poderiam ser partículas carregadas negativamente. Entretanto tais evidências se chocavam com os dados experimentais obtidos, três anos antes, pelo físico alemão Heinrich Hertz. Os dados de Hertz atribuíam aos raios catódicos propriedades ondulatórias. Segundo Segrè (1980, p. 16) a comprovação da natureza corpuscular dos raios catódicos se deu em 1897, através de uma experiência realizada pelo físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940). Hoje se sabe que os raios catódicos são na verdade *elétrons*⁶, movendo-se em alta velocidade.

A comprovação da natureza corpuscular dos raios catódicos, isto é, a descoberta do elétron utilizando os tubos de Crookes, foi de extrema importância para todo o início da Física Moderna. Entretanto, como destaca Segrè (1980, p. 23), uma grandiosa experiência feita dois anos antes, também utilizando equipamentos semelhantes aos tubos de Crookes acabou por ofuscar, de certa forma, a grandeza do trabalho realizado por J.J. Thomson. Este experimento, de grande importância, tratava-se das primeiras obtenções de emissões de um novo tipo de raio: os raios X, que foram observados inicialmente por Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923) em 1895.

3.2. A descoberta dos raios X

De acordo com Segrè (1980, p. 20), na noite de 8 de novembro de 1895, Roentgen estava em seu laboratório trabalhando com uma válvula de Hittorf (equipamento que produz luminescência semelhante ao equipamento de Crookes). A experiência realizada pelo cientista naquela noite consistia, basicamente, em cobrir a válvula de Hittorf com uma cartolina negra. O equipamento utilizado por ele estava a certa distância de uma folha de papel (utilizada como tela), tratada com platinocianeto de bário. Estando o laboratório totalmente às escuras, esperava-se que ao ligar o equipamento, nenhuma luz fosse observada na tela, já que a válvula estava completamente vedada pela cartolina negra. Entretanto, o físico pôde contemplar a emissão de luz, vinda

⁶ O nome "elétron" foi sugerido por G. Johnstone Stoney em 1894.

dessa folha de papel. “Alguma coisa devia ter atingido a tela para que ela reagisse dessa forma” (SEGRÈ, 1980, p. 20). Mas isso não foi tudo, espantado com o resultado que acabara de observar, ele continuou realizando experiências, inserindo, entre a válvula e a tela, diversos objetos e percebendo, desta forma, que estes se mostravam transparentes. O acontecimento mais surpreendente, das experiências efetuadas por Roentgen, deu-se quando o mesmo deixou escapar sua mão na frente da válvula e pôde enxergar seus ossos. De tal forma, ele acabou por descobrir “um novo tipo de raio” os quais chamou de raios X⁷.

Segrè (1980, p. 23) cita ainda que Roentgen, em 28 de dezembro de 1895, entregou ao secretário da Sociedade Física-Médica um relatório preliminar no qual descrevia os resultados provenientes de sua descoberta. Neste, Roentgen afirmava que chapas fotográficas eram sensíveis aos raios X. Isso significava que era possível obter imagens utilizando tais raios.

Os resultados publicados por Roentgen, acerca dos raios X geraram uma enorme comoção e deslumbramento no mundo inteiro naquela época, principalmente na área da Medicina, pois, enxergar através do tecido humano significaria uma enorme revolução na área. “Podiam-se ver praticamente os dedos sem os músculos, mas com anéis, como se podia ver também uma bala alojada no corpo” (SEGRÈ, 1980, p. 22). Embora tamanha fosse a contribuição desta descoberta para a Medicina, Roentgen não conseguiu compreender a natureza dos raios X. Todavia, sua descoberta abriu caminho para outra importante descoberta na Física: a radioatividade.

3.3. Os raios de Becquerel

Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908) é a primeira figura que surge na Física responsável pela descoberta da Radioatividade (embora não tenha sido ele a ter estabelecido este termo). Fato curioso é que esta descoberta se deu de forma “acidental”, conforme veremos nos próximos parágrafos.

⁷ Esses raios foram chamados assim por Roentgen, pois, ele desconhecia a origem dessa radiação.

Como citado no item anterior, foram os raios X de Roentgen que levaram a descoberta da Radioatividade, isto porque Henri Becquerel tentara, de alguma maneira, obter algo semelhante aos raios X, através de experiências utilizando compostos de urânio (sal de urânio e sulfato de potássio de urânio). Após realizar algumas experiências, ele teve êxito em suas pesquisas e tratou logo de fazer um relato à Academia Francesa detalhando a experiência que acabara de realizar.

Conforme diz Segrè (1980, p. 29), basicamente o que Henri fez foi cobrir uma chapa fotográfica com dois papéis grossos e expor esse material ao Sol. Durante um dia inteiro de exposição, nenhuma mancha se quer apareceu na chapa fotográfica. Em outras palavras, ele comprovou que a luz solar não era capaz de produzir nenhuma mancha na chapa, devido à presença dos papéis. Sendo assim, ele realizou novamente a experiência, mas, desta vez, colocando sobre um dos papéis uma camada de substância fosforescente, composta de urânio. Após algumas horas de exposição ao Sol ele havia presenciado a silhueta do composto fosforescente na chapa fotográfica. Concluiu então que os raios obtidos por ele (capazes de pressionar a chapa fotográfica) poderiam então ser emissões do composto fosforescente de urânio enquanto este fluorecia.

O leitor atento deve recordar-se que substâncias fluorescentes são aquelas que, após receber uma quantidade de energia de uma determinada fonte de luz, são capazes de emitir radiações visíveis. Entretanto essa emissão ocorre apenas durante o período em que se fornece energia a tal substância. Disto se deriva um fato curioso na história da Física. Pois, Becquerel estava convicto que a emissão dos raios, observados por ele, tinha relação direta com a luz solar emitida sobre o composto de urânio. Quando fora apresentar seus novos resultados à academia, em outra reunião, havia antes ocorrido com Becquerel, de fato, um acontecimento “predestinado”.

O que ocorreu é que nos dias seguintes após as primeiras obtenções positivas de suas experiências, Becquerel tentou reproduzi-la novamente, mas havia um imprevisto: o Sol havia se escondido em Paris. Segrè (1980, p. 30) comenta que à vista disso, o físico imaginou que ao revelar as chapas

fotográficas apareceriam imagens defeituosas. Mesmo assim, realizou o procedimento experimental e guardou, em uma gaveta escura, as chapas fotográficas utilizadas, deixando sobre estas o composto de urânio. Para sua surpresa, as silhuetas do composto apresentaram-se com maior intensidade na chapa, bem mais que quando expostas ao Sol. Isto é, alguma coisa emanava da substância de urânio de forma espontânea. Becquerel descobriu ainda que as emissões providas do urânio não só manchavam a chapa fotográfica como também eram capazes de ionizar gases, transformando-os em condutores. “Era possível medir a “atividade” de uma amostra simplesmente medindo a ionização que ela produzia” (SEGRÈ, 1980, p. 30). Becquerel, para tanto, utilizava-se de um eletroscópio de lâminas de ouro.

3.4. As descobertas do casal Curie e Rutherford

O termo Radioatividade surge de fato com a polonesa, naturalizada francesa, Marie Curie (1867-1934) e seu esposo o francês Pierre Curie, logo após as evidências obtidas por Becquerel. Pode-se dizer que ela deu um salto à frente, em relação às pesquisas de Becquerel, pois, não se limitou apenas em realizar pesquisas com o urânio.

Segrè (1980, p. 35), salienta que Marie Curie iniciou suas pesquisas sobre a radioatividade, reproduzindo as experiências de Becquerel, entretanto, não utilizando o eletroscópio para verificar a “atividade” do urânio, mas sim uma aparelhagem construída por seu esposo, Pierre. Algum tempo depois Marie confirmou o que Becquerel já havia proposto: a emissão dos raios de Becquerel é uma propriedade atômica do urânio. Curie decidiu então examinar “todos” os elementos conhecidos na época para verificar propriedades semelhantes as do urânio, mas encontrou apenas o tório. Percebendo que o urânio não era o único elemento a emitir radiação espontaneamente, atribuiu ao fenômeno o nome de Radioatividade. Após investigações, o casal Curie acabou por descobrir outros novos elementos radioativos: o *polônio* (assim chamado por Marie, em homenagem a sua naturalidade) e o rádio.

Paralelamente as descobertas de Becquerel e os Curie, outro físico começava a se destacar nos estudos da Radioatividade, seu nome era Ernest Rutherford (1871-1937). Rutherford era aluno de J. J. Thomson (aquele que

atribuiu propriedades corpusculares ao elétron). Em 1898 ele percebeu que havia dois tipos de radiações emitidas pelo urânio que chamou de raios alfa e beta. Na França, o físico Villard descobriu raios penetrantes, similares aos raios X, e os chamou de gama. Segundo Segrè (1980, p. 51), após algum tempo de pesquisa Rutherford chegou à conclusão de que os raios betas eram na verdade raios catódicos, isto é, elétrons. Por outro lado, verificou também que os raios alfa tinham a mesma carga que o Hélio ionizado.

Todas estas descobertas marcaram o surgimento da chamada Física Moderna, entretanto, como o leitor pode averiguar, ainda não foram apresentadas conexões diretas entre estas descobertas e o início o surgimento da FQ. Para estabelecer tal conexão é necessário antes apresentarmos o problema da radiação do corpo negro. Este, por sua vez, está vinculado às pesquisas realizadas na área da espectroscopia e, conforme veremos a seguir, tornou-se o “embrião” do *quanta* de energia.

CAPÍTULO 4- O PROBLEMA DA RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

4.1. A radiância espectral

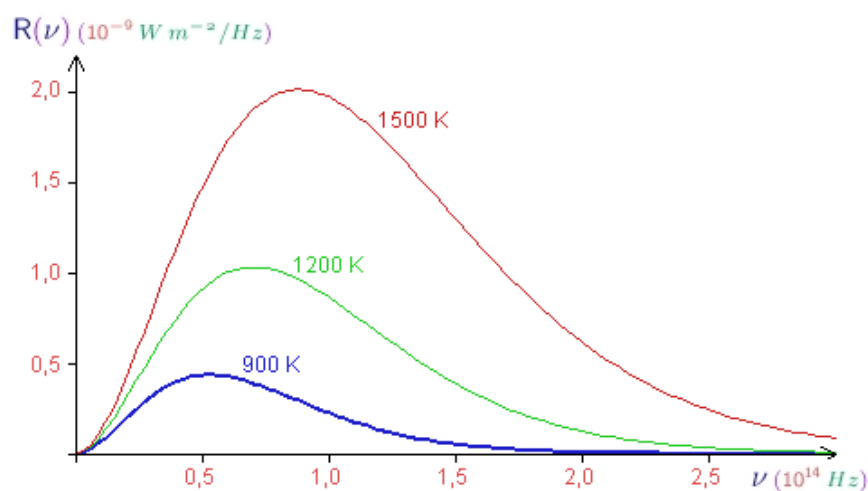
Da Termodinâmica clássica sabemos que todos os corpos emitem radiação térmica, devido suas temperaturas. É de nosso conhecimento também que a matéria no estado sólido ou líquido emite um espectro de frequência contínuo de radiação que depende de sua temperatura. Por exemplo, se colocarmos em uma fornalha, uma barra metálica e a retirarmos periodicamente (sem que o fogo seja apagado) perceberemos que a cor da barra muda, conforme a temperatura da mesma varia. Em outras palavras, à medida que a temperatura da barra é elevada, a radiação térmica do corpo aumenta, alterando também sua frequência. Foi observado experimentalmente que existe um tipo de corpo que emite espectro térmico de caráter universal. Estes são os chamados *corpos negros*. Os Corpos negros não fazem referência a seu nome, estes são na verdade corpos capazes de absorver toda radiação incidente sobre eles.

A distribuição espectral da radiação do corpo negro, especificada por $R_T(\nu)d\nu$, chamada de radiância espectral, é definida como a quantidade de energia (ΔE) emitida por unidade de tempo (Δt) em radiação de frequência (ν) com intervalos de ν a $\nu + d\nu$ por unidade de área de uma superfície (S) a temperatura absoluta (T).

$$R_T(\nu)d\nu = \frac{\Delta E}{S\Delta t} \quad (4.1.1)$$

Conforme destacam Eisberg e Resnick (1979, p. 20) esta grandeza física teve suas primeiras medidas precisas feitas por Lummer e Pringsheim em 1899. A dependência observada por eles experimentalmente de $R_T(\nu)$ em ν e T , é apresentada na figura 4.1.1.

Figura 4.1.1. Radiância espectral de um corpo negro em função da frequência da radiação, mostrada para temperaturas de 900 K, 1200 K e 1500 K.



Fonte: Portal online da UFRGS⁸.

Tomando como exemplo a radiância do corpo negro à temperatura de 900 K, percebe-se, do gráfico obtido experimentalmente, que:

⁸ Disponível em: https://www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/radTerm/aRadTermFrame.htm. Acesso em jul. 2019.

- a. Há pouca energia irradiada em intervalos fixos de frequência $d\nu$ se este intervalo estiver em uma frequência muito pequena em relação a $0,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$;
- b. Se ν é igual a zero, a potência irradiada também é zero;
- c. Quando ν se aproxima de valores infinitamente grandes, a potência irradiada vai à zero.

Os físicos Rayleigh e Jeans realizaram o cálculo da densidade de energia irradiada pelo corpo negro. Todavia, o resultado obtido pelos dois físicos mostrou uma série de divergências com os resultados previstos experimentalmente. Eles chegaram a seguinte expressão para a densidade de energia:

$$\rho_t(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2 kT}{c^3} d\nu \quad (4.1.2)$$

Podemos notar da equação 4.1.2 que para valores de baixa frequência, esta representa bem os resultados obtidos experimentalmente. Entretanto, a mesma expressão indica que para altos valores de frequências, a densidade de energia irradiada por um corpo negro tenderia a infinito (quando na verdade, percebe-se experimentalmente que tende a zero). Segundo Eisberg e Resnick (1979, p. 31), a divergência existente entre a previsão fornecida pela teoria clássica e os resultados experimentais, para a radiação do corpo negro, ficou conhecida como *catástrofe do ultravioleta*, enfatizando a não validade da expressão obtida por Rayleigh e Jeans nesta região.

4.2. A teoria de Planck para a radiação do corpo negro

A equação obtida por Rayleigh e Jeans, baseia-se em dois princípios físicos: o princípio da equipartição da energia e a teoria do eletromagnetismo de Maxwell. Tendo isso em vista, o físico alemão Max Planck (1858-1947), em busca de uma solução para a discrepância entre os resultados teóricos e experimentais da radiação do corpo negro, decidiu que seria necessário uma “correção” para o princípio da equipartição da energia. Esta correção não se deu arbitrariamente, na verdade, Planck levou em consideração a afirmação do brilhante trabalho desenvolvido por Maxwell e “apostou” que sua teoria de fato estava correta.

De acordo com o princípio da equipartição da energia, a energia total média (ε) é definida como:

$$\varepsilon = kT \tag{4.2.1}$$

A utilização desta expressão nos fornece uma equação para a radiação do corpo negro, válida apenas para valores de frequências baixas. Planck sabia que a discrepância teórica poderia ser eliminada se, (por algum motivo que ele ainda não sabia), houvesse um “corte” de forma que a energia irradiada fosse zero, quando a frequência tendesse a infinito.

Eisberg e Resnick (1979, p. 33), enfatizam que a grande contribuição de Max Planck para a formulação da teoria quântica se dá quando este “descobre” que poderia obter tal corte, “tratando a energia ε como se ela fosse uma variável discreta em vez de uma variável contínua, como sempre foi considerada na Física Clássica” (EISBERG, et al., 1979, p. 33). Ou seja, ele simplesmente (uma simplicidade genial, diga-se de passagem) supôs que a energia não poderia assumir qualquer valor, na realidade, ela deveria assumir apenas valores discretos e que fossem uniformemente distribuídos. Após o desenvolvimento de alguns cálculos, ele viu que era possível tornar a relação mais simples possível, entre $\Delta\varepsilon$ e ν e fez uma segunda suposição: supôs que essas grandezas eram proporcionais. Em forma de equação, Planck mostrou que:

$$\Delta\varepsilon = h\nu \quad (4.2.2)$$

Onde h é uma constante de proporcionalidade, (hoje muito famosa) conhecida como constante de Planck. O valor, aproximado, da mesma é $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

Eisberg e Resnick (1979, p. 19), citam que estes resultados foram apresentados, na reunião da Sociedade Alemã de Física em 14 de Dezembro de 1900, em um artigo intitulado por Planck: “Sobre a Teoria da Lei de Distribuição de Energia do Espectro Normal”. Neste, Planck postulou ainda que: qualquer ente físico com um grau de liberdade cuja “coordenada” é uma função do tempo (executa oscilações harmônicas simples) pode possuir apenas energias que satisfaçam à relação:

$$E = nh\nu \quad (4.2.3)$$

A solução obtida por Planck para solucionar o problema do espectro de radiação do corpo negro, sugerindo que a energia só poderia assumir valores discretos, pode parecer muito estranho se analisarmos esses resultados com exemplos do mundo *macroscópico* (o mundo que nos é visível). Afinal de contas, em nossos experimentos já conhecidos a energia pode assumir valores contínuos. Entretanto, devemos ficar atentos ao fato de que a constante de Planck é da ordem de 10^{-34} . Em outras palavras, essa quantização é consideravelmente observada no mundo *microscópico*.

O poder de “enxergar” a energia como se comportando de maneira discreta, nas paredes do corpo negro, concedeu a Planck o título de pioneiro no desenvolvimento da FQ. Entretanto, a explicação do efeito fotoelétrico, por Albert Einstein, viria a contribuir de forma imponente para o desenvolvimento da teoria quântica, atrelando a esta, o chamado comportamento “Dual” para a radiação e matéria. Este, por sua vez, é considerado por alguns autores como Pessoa Junior (2003) como sendo uma das características mais marcantes da FQ. Vejamos o que disse Einstein acerca do efeito fotoelétrico.

CAPÍTULO 5-EINSTEIN E O EFEITO FOTOELÉTRICO

Em 1886 e 1887 Heinrich Hertz confirmava a teoria eletromagnética de Maxwell através de experiências. Nestas, Hertz constatou que: “uma descarga elétrica entre dois eletrodos ocorre mais facilmente se é incidido sobre um deles, radiação ultravioleta” (EISBERG, et al., 1979, p. 51). Hertz, porém, não deu muita atenção a observação deste fenômeno, mas em seguida, outro físico chamado Lenard mostrou que a radiação ultravioleta facilitava a descarga elétrica. A radiação ultravioleta faz com que os elétrons fossem emitidos da superfície do eletrodo. Essa emissão de elétrons através da incidência de radiação sobre uma superfície é o conhecido *efeito fotoelétrico*.

Diante desta experiência o leitor poderia fazer a seguinte indagação: sendo o efeito fotoelétrico produzido através da incidência de radiação sobre uma superfície, poderíamos o explicar através da teoria ondulatória? A resposta é Não! Eisberg e Resnick (1979, p. 53), listam três aspectos principais deste fenômeno que não podem ser explicados pela teoria ondulatória clássica da luz. São estes:

- a. De acordo com a teoria ondulatória, a amplitude do campo elétrico (E), oscilante da onda de luz luminosa, deve crescer se a intensidade da luz for aumentada. Isto implicaria dizer que, a força que essa luz aplica sobre um elétron na superfície de um eletrodo seria correspondente a eE . Ou seja, a energia cinética dos fotoelétrons (elétrons liberados pela incidência da luz) deveria aumentar conforme o aumento da intensidade da luz incidente. Todavia, as experiências mostraram que a *energia cinética dos fotoelétrons independia da intensidade da luz*.
- b. De acordo com a teoria clássica ondulatória este efeito poderia ser obtido qualquer que fosse a frequência da luz, desde que essa fosse suficientemente intensa para dar a energia necessária à ejeção dos elétrons de determinada superfície. Entretanto, novamente as experiências mostram que *para cada superfície havia uma frequência mínima (ν_0) na qual o efeito deve ocorrer*.

- c. Por fim, esperava-se que deveria haver um intervalo de tempo mensurável, entre o instante em que a luz começa a incidir sobre a superfície e o instante de ejeção do fotoelétron. Porém, *nenhum retardo jamais foi observado*.

Se não era possível explicar o efeito fotoelétrico pela teoria clássica da luz, coube a um grande gênio da Física, explicá-lo por outro caminho. Estamos falando de Albert Einstein (1879 – 1955), que ainda era pouco conhecido em 1905. Foi Einstein quem colocou em cheque a teoria clássica da luz. Para explicar o efeito fotoelétrico, Einstein baseou-se no trabalho da quantização da energia, proposta por Planck. Vale ressaltar que originalmente Planck havia limitado seu trabalho de quantização aos elétrons nas paredes de um corpo negro, acreditando que a energia irradiada por estes elétrons se propagava no espaço como ondas na superfície da água. Einstein, porém, propôs que a energia que era irradiada, estaria também quantizada, em pacotes concentrados que tempos depois vieram ser chamados de *fótons*.

A explicação de Einstein sobre o fenômeno era simples. Enquanto os demais físicos observavam o fenômeno através da forma com que a luz se propagava, ele se concentrou em observar a forma corpuscular com que a luz era emitida e absorvida. Vejamos quais foram as suposições de Einstein.

De acordo com Eisberg e Resnick (1979, p. 55), Einstein supôs que a energia de um fóton estaria relacionado com sua frequência (ν) pela equação 4.2.3:

$$E = h\nu$$

Supôs também que no processo fotoelétrico um fóton seria totalmente absorvido por um elétron no eletrodo em que a experiência fosse realizada. Sendo assim, Einstein concluiu que um elétron é emitido de tal superfície, sua energia cinética é dada por:

$$K = h\nu - w \tag{5.1}$$

Sendo (w) o trabalho necessário para remover o elétron do eletrodo. Esse trabalho se faz necessário, pois, é preciso que o elétron supere os campos atrativos dos átomos na superfície de metal do eletrodo. Claro que existem elétrons que estão menos presos aos átomos da superfície metálica. Nestes casos, o trabalho realizado por estes para que o efeito ocorra será mínimo (w_0) enquanto que a velocidade do elétron emitido, e conseqüentemente, sua energia cinética ($K_{m\acute{a}x.}$), serão máximas, sendo assim, neste caso a equação pode ser escrita como:

$$K_{m\acute{a}x.} = h\nu - w_0 \quad (5.2)$$

Com estas suposições, as objeções contra a interpretação ondulatória clássica são respondidas. Pois, se analisarmos os itens descritos em a, b e c, no início deste tópico. Em relação ao item “a” se triplicarmos, por exemplo, a intensidade da luz incidente sobre o eletrodo, estaríamos meramente triplicando a quantidade de fótons emitidos sobre o mesmo. Isto não muda a energia $h\nu$ de cada fóton. Com respeito ao item “b”, Se tomarmos $K_{m\acute{a}x.}$ como sendo uma quantidade nula, teremos que $h\nu_0 = w_0$, ou seja, existe uma frequência mínima ν_0 no qual o efeito deve ocorrer. Por último, sobre o item “c”, a teoria do fóton elimina a possibilidade de haver um tempo mínimo para a observação do fenômeno, pois, como estamos tratando de pacotes concentrados de energia, sempre haverá pelo menos um fóton que atinge a superfície metálica do eletrodo, é absorvido por algum átomo dessa superfície e emite imediatamente um fotoelétron.

Diversos fenômenos realizados anteriormente atribuíam à luz caráter ondulatório. Entretanto, o efeito fotoelétrico é extremamente bem compreendido ao considerarmos a luz com propriedades corpusculares. Isto implica que a radiação pode apresentar comportamento distinto (comporta-se como onda ou partícula), de acordo com os diferentes experimentos realizados.

CAPÍTULO 6-ONDAS DE MATÉRIA E O PRINCÍPIO DA INCERTEZA

Eisberg e Resnick (1979, p. 87) alegam que ideias como as de Einstein, defensoras da teoria onda-partícula para a radiação, influenciaram fortemente outros físicos da época. Um destes foi o francês Louis De Broglie (1892 – 1987). De Broglie talvez seja responsável por uma das ideias mais importantes de toda a Mecânica Quântica, tanto que após confirmações experimentais de suas teorias ele logo foi premiado com o Nobel de Física em 1929. Mas que ideia tão revolucionária era essa? Louis de Broglie apresentava em 1924, sua tese de doutorado, que tratava das *ondas de matéria*.

Nesta, de Broglie defendeu que o comportamento dual, apresentado pela radiação, também poderia se aplicar à matéria. Basicamente isso significava dizer que uma partícula (como por exemplo, um elétron) tem associada a ela uma onda de matéria que governa seu movimento. Ele afirmou que não só a radiação (como já havia afirmado Einstein), mas também a matéria possuem uma energia total (E) relacionada à frequência da onda (ν) associada a seu movimento, dada pela equação 4.2.3:

$$E = h\nu$$

O momento (p) é relacionado com o comprimento de onda λ através da equação:

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (6.1)$$

Conceitos relativos a partículas: energia e momento e relativos a onda: frequência e comprimento de onda, podem ser relacionados por meio da constante de Planck (h) de tal forma que podemos escrever:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (6.2)$$

A equação 6.2 é a conhecida *relação de de Broglie* (ou comprimento de onda de de Broglie).

Se nos colocássemos agora no lugar dos físicos daquela época, poderíamos nos indagar: podendo a radiação e a matéria apresentar comportamento dual, como saber o modelo correto a se usar em uma medida experimental? Eisberg e Resnick (1979, p. 97), dizem que podemos responder da seguinte forma: quando o “ente” analisado é detectado por alguma interação, damos a ele o tratamento de partícula. Porém, quando este se move, tem extensão e não pode ser localizado, agindo, portanto, como onda. De acordo com este pensamento, nunca podemos aplicar os dois modelos em uma mesma medida. A escolha do modelo adotado para verificar uma experiência se dá através da natureza da medida. Este constitui no chamado *princípio da complementaridade*⁹ de Niels Bohr. Uma consequência direta do postulado de de Broglie e do princípio da complementaridade nos leva ao famoso *Princípio da incerteza de Heisenberg*¹⁰ da FQ.

Eisberg e Resnick (1979, p. 98), enfatizam que diferentemente da Física Clássica, não é possível, na FQ, através de uma experiência real, determinar com precisão a posição e o momento, num mesmo instante, da matéria ou da radiação. O mesmo também é constatado em relação à energia e ao tempo. É este o famoso princípio da incerteza de Heisenberg, descrito matematicamente como:

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} \quad (6.3)$$

Onde Δp é a incerteza do momento e Δx é a incerteza da posição ou:

⁹ A interpretação da complementaridade é apenas uma entre diversas formas de explicar o comportamento dual apresentado pelos objetos quânticos. Sugerimos que para verificar outras interpretações o leitor realize a leitura do livro: “Conceitos de Física Quântica” de Pessoa Junior (2003).

¹⁰ Muitos físicos acreditam que seja possível determinar com precisão, posição e momento simultaneamente. Entretanto, isto se dá através de interpretações que o autor pode encontrar também na obra de Pessoa Junior (2003): “Conceitos de Física Quântica”.

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (6.4)$$

Onde ΔE é a incerteza no conhecimento da energia e Δt é o intervalo de tempo característico da rapidez com que ocorrem mudanças em um sistema.

A dualidade onda-partícula, o princípio da complementaridade e o princípio da incerteza apresentam papel importante dentro da teoria quântica. Através destes, muitos fenômenos quânticos são explicados de forma plausível. Entretanto, configuram-se ainda como um “mistério” para os físicos da atualidade, sendo tratados através de interpretações muitas vezes filosóficas, conforme destaca Pessoa Junior (2003). Vamos analisar, no próximo capítulo, a importância dada pelos físicos do século XX em determinar um modelo atômico e como este, por sua vez, relaciona-se com os conceitos quânticos.

CAPÍTULO 7- MODELOS ATÔMICOS

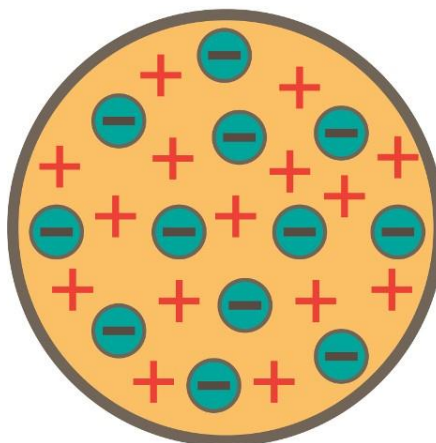
7.1. O pudim de passas de J.J. Thomson

Eisberg e Resnick (1979, p. 123) comentam que, por volta de 1910, haviam diversas evidências de que existiam elétrons nos átomos. Sendo os átomos encontrados neutros na natureza, eles deveriam também ser compostos por cargas positivas iguais em módulo à carga do elétron. Na época dessas suposições já se sabia que a massa do elétron era muito pequena, então a maior parte da massa do átomo deveria se dar pela carga positiva.

O primeiro modelo atômico que vamos descrever foi proposto por J.J. Thomson. Esse modelo ficou conhecido como “pudim de passas”. Este nome se deu pelo fato de seu criador imaginar que os elétrons carregados negativamente estariam uniformemente distribuídos (devido a repulsão entre cada elétron existente no átomo) ao redor de uma esfera de carga positiva. Mas esse modelo não durou muito, pois, experiências realizadas por

Rutherford, utilizando radiações de partículas alfa, mostravam incoerências com o modelo proposto por seu professor.

Figura 7.1.1. Ilustração do “pudim de passas” de J.J. Thomson.



Fonte: UOL – Brasil escola¹¹.

Recorde-se que já comentamos neste trabalho o fato de Rutherford já saber que as partículas alfas eram na verdade átomos ionizados de Hélio. Para pôr em prova o modelo do pudim de passas, ele fez a seguinte experiência: emitiu, através de uma fonte radioativa, partículas alfa que foram colimadas por um par de diafragmas, formando um feixe paralelo e estreito. Esse feixe era então incidido sobre uma folha, geralmente de metal, e sendo essa folha muito fina, as partículas a atravessavam por completo, sofrendo apenas uma pequena redução de velocidade. Ao atravessar a folha, cada uma das partículas alfa incididas sofria muita deflexão, devido à força coulombiana entre sua carga (positiva) e as cargas positivas e negativas dos átomos da folha. Conforme é mencionado por Eisberg e Resnick (1979, p. 125), a existência de uma probabilidade pequena, porém não nula para o espalhamento dessas partículas para ângulos grandes (de até 180°) não poderia ser explicada pelo modelo de Thomson que basicamente previa espalhamento em um ângulo pequeno por muitos átomos.

¹¹ Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/o-atomo-thomson.htm>. Acesso em jul. 2019.

7.2. Rutherford e o grande vazio atômico

Buscando uma forma de resolver os problemas enfrentados pelo modelo atômico proposto por seu mestre, Rutherford imagina seu próprio modelo do átomo com a seguinte característica: todas as cargas positivas contidas no átomo estariam agrupadas em uma pequena região central do mesmo (chamada de *núcleo*). Se a dimensão desse átomo for suficientemente pequena, uma partícula alfa que passe perto desse núcleo poderia, sem problemas, ser espalhada por um grande ângulo ao atravessar um único átomo (Eisberg e Resnick, 1979, p. 133). Outra característica desse modelo era que os elétrons estariam movimentando-se em órbitas circulares ao redor do núcleo de carga positiva. Os resultados experimentais obtidos pelo modelo nuclear de Rutherford foram bem aceitos e o novo modelo supria as falhas de seu antecessor, porém, ainda faltava responder questionamentos a respeito de sua estabilidade. De acordo com a teoria eletromagnética, partículas carregadas (como elétrons) em movimento acelerado, emitem radiação e sendo isto verdade, os elétrons no modelo de Rutherford liberariam radiação, isto é, perderiam energia e o átomo entraria em colapso. A solução para este problema estaria muito mais próximo do que Rutherford pudesse imaginar e viria com um visitante que participara de forma ativa de seu laboratório em Manchester: Niels Bohr.

7.3. O modelo atômico quantizado de Bohr

Assim como Rutherford, Niels Bohr (1885-1962) viria a trabalhar com J.J. Thomson no ano de 1911 em Cavendish. É importante ressaltar que embora o modelo atômico que vamos descrever neste item tenha recebido o nome de Bohr, ele é na verdade, uma tentativa de “salvar” o modelo de Rutherford. Segrè (1927, p. 124), ressalta em sua obra a grande admiração que Bohr tinha pelo trabalho de Rutherford. Em novembro do mesmo ano ele acabaria deslocando-se à Manchester para participar de um curso experimental, que tratava sobre medições radioativas e que ocorria justamente no laboratório de Rutherford.

Bohr acreditava fielmente no modelo proposto por Rutherford e sabendo dos problemas deste em relação à estabilidade ele precisaria propor algo totalmente radical para solucioná-los. Logo, Bohr martelava a ideia de que a constante de Planck, o quantum de ação, deveria desempenhar algum papel na estrutura atômica. Esta seria a “cereja do bolo” que faltava ao modelo de Rutherford. Entretanto, como é exposto por Segrè (1927, p. 125), Bohr não tinha a menor ideia de como se daria essa introdução, então preparou um memorando sobre o assunto para discuti-lo com Rutherford. Fato curioso é que em 1913, Hans Marius Hansen (amigo de Bohr), indagou dele como seu modelo explicaria o espectro. Percebendo que seu amigo nada tinha a dizer a respeito, Hans aconselhou Bohr a verificar a fórmula de Balmer (κ).

Para que o leitor compreenda o que é a fórmula de Balmer é preciso citar que os físicos daquela época perceberam um estranho comportamento do espectro de radiação eletromagnética, produzido por sólidos em alta temperatura. Esse espectro não era contínuo, na verdade, este espectro encontrava-se concentrado em um conjunto de *comprimento de ondas discreto*. (EISBERG, et al., 1979, p. 135). Johann Jakob Balmer (1825-1898) era professor do secundário e de forma genial percebeu uma regularidade nas frequências das linhas espectrais do hidrogênio e elaborou uma fórmula que expressava o comprimento de onda das linhas espectrais obtidas empiricamente. Essa fórmula era:

$$\kappa = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (7.3.1)$$

“ R_H ” é a constante de Rydberg, obtida em 1890, e tem valor de $10967757,6 \mp 1,2 m^{-1}$. Para esta fórmula, n só pode assumir os valores de $n = 3,4,5, \dots$

Outras expressões como esta foram obtidas mais tarde por outros físicos. Segrè destaca que, anos mais tarde, Bohr viria comentar que ao ver essa fórmula, tudo havia se tornado mais fácil, em relação à obtenção de um modelo atômico que coincidissem com os resultados obtidos nestas séries para o Hidrogênio.

Eisberg e Resnick (1979, p. 138), apontam qual foi a solução proposta por Bohr, enunciada na forma de postulados, para garantir a estabilidade do átomo de Hidrogênio:

Postulado I. *Os elétrons em um átomo se movem em órbita circular ao redor do núcleo atômico devido à influência da atração coulombiana entre o elétron (carga negativa) e o núcleo (carga positiva), de acordo com as leis da Mecânica Clássica;*

Postulado II. *É possível apenas que um elétron se mova em uma órbita na qual seu momento angular orbital (L) é um múltiplo inteiro de \hbar ;*

Postulado III. *Apesar do elétron (partícula carregada) encontrar-se acelerado devido a força coulombiana, ele não emite radiação eletromagnética. Sendo assim, sua energia (E) permanece constante.*

Postulado IV. *É emitida radiação eletromagnética se um elétron, movendo-se em uma órbita de energia total $(E)_i$, muda seu movimento descontinuamente de forma a se mover em outra órbita de energia total $(E)_f$.*

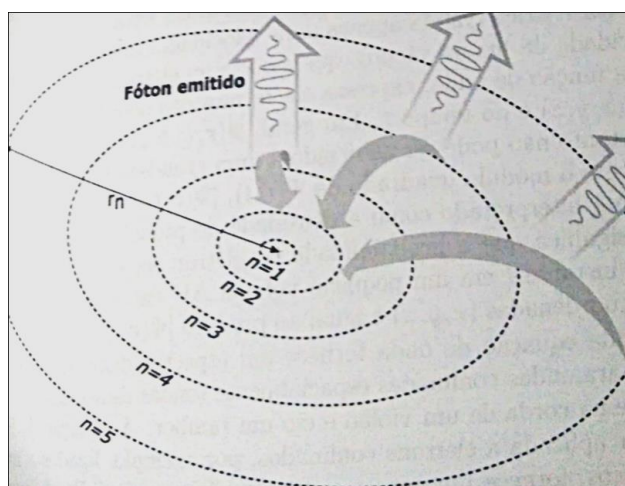
O Postulado IV implica em um resultado extremamente importante para entender o espectro do Hidrogênio. Conforme cita Valadares (2005, p. 5), a emissão de um fóton se dá no momento no qual o elétron passa de uma órbita de maior energia para outra de menor energia. Já a absorção de energia, por sua vez, corresponde ao processo inverso. É importante para a continuação do presente trabalho, expor alguns resultados obtidos por Bohr em relação ao átomo de Hidrogênio.

O modelo de Bohr para o átomo de Hidrogênio fornece energias que são expressas em unidade de eV dados pela seguinte expressão:

$$E_n = \frac{E_0}{n^2} \quad (7.3.2)$$

Nesta expressão, diz-se que quando $n = 1$ o elétron ocupa a órbita de menor energia possível E_0 (energia do estado fundamental). O valor obtido experimentalmente para E_0 é: -13,6 eV.

Figura 7.2.1. Órbitas possíveis no átomo de Hidrogênio em modelo proposto por Bohr.



Fonte: VALADARES, 2005, p. 5.

A figura 7.1.1 representa as transições previstas pelo modelo de Bohr, consistentes com os dados espectroscópicos disponíveis na época. Na figura, se considerarmos um elétron ocupando a órbita de $n = 1$, este possui uma energia E_0 . Se for fornecida energia para este elétron, diz-se, conotativamente que o elétron “salta” para outra órbita. Quando o elétron perde energia e salta para uma órbita de menor energia são emitidos fótons. Vamos ver adiante que a observação desse fenômeno resultou em invenções importantes para a sociedade como a criação dos lasers.

Diante de suas observações e postulados propostos, Bohr conseguiu elaborar um modelo atômico que acabou com os problemas de instabilidade da matéria, encontrado no modelo atômico proposto por Rutherford. Além disso, o modelo de Bohr explicava de forma satisfatória o fato do espectro de emissão do átomo ser formado por linhas discretas, algo que entrava em divergência com o espectro contínuo da luz emitida pelo Sol.

Todas as teorias apresentadas até aqui, desde a descoberta dos raios X até o modelo atômico proposto por Bohr, compreende-se no que se chama hoje de *antiga Física Quântica*. Embora o modelo atômico de Bohr resulte em boas previsões para o átomo de Hidrogênio, o modelo por ele apresentado falha grotescamente quando aplicados a átomos com mais de um elétron (por

exemplo, o Hélio). Desta forma, ficou evidente a necessidade de uma nova teoria que fosse capaz de suprir as falhas da antiga quântica. Essa “nova teoria” surge em 1925 com o alemão Erwin Schroedinger. No capítulo seguinte vamos explorar o que diz essa nova teoria.

CAPÍTULO 8- A NOVA TEORIA PARA A MECÂNICA QUÂNTICA

8.1. A equação de Schroedinger

Segundo Pessoa Junior (2003, p. 6), o regime quântico nada mais é que a “Física das Ondas” para baixas intensidades. Eisberg e Resnick (1979, p. 171), compactuam com esta ideia afirmando que quando experimentos são feitos, utilizando-se objetos¹² de ordem microscópica, estes nos revelam que tais objetos são governados por algum tipo de movimento ondulatório. Em resumo, pode-se dizer que estes são governadas por uma onda de de Broglie associada ou uma função de onda (ψ).

Sendo assim, poderíamos ser induzidos a pensar que o mundo quântico pode ser explicado pelas equações de de Broglie (equações 6.1 e 6.2). Este pensamento não está totalmente equivocado, entretanto, não é tão simples assim. As relações apresentadas por de Broglie explicam o comportamento de sistemas microscópicos triviais, como o caso de uma partícula em Movimento Harmônico Simples (MHS). Evidentemente, não é interessante que limitemos o nosso conhecimento acerca do comportamento das partículas microscópicas e sim que busquemos explorar os casos mais complexos que ocorrem na natureza. O estudo destes casos complexos torna-se possível graças à chamada *Teoria de Schroedinger da Mecânica Quântica*. Para compreender de maneira simples qual o significado dessa teoria, vamos fazer uma comparação desta com a Física Clássica.

¹² Embora possa parecer estranho, do ponto de vista da literatura, passaremos a chamar de “objetos quânticos” entidades que possuem dimensões microscópicas como, por exemplo, elétrons. Assim faremos, pois, devido o comportamento dual (onda-partícula) existente na teoria quântica, não podemos de fato definir se tais entidades são partículas ou onda.

De acordo com Griffiths (2011, p. 1), na Física Clássica, uma vez conhecidas as condições iniciais de um determinado sistema físico, podemos, através das leis de Newton, determinar a posição $x(t)$ de uma partícula com total precisão em qualquer instante. Consequentemente, seremos capazes também de determinar sua velocidade, sua energia dentre outros observáveis físicos (momento angular, momento linear, etc.).

É exatamente a obtenção destes observáveis que é pretendida pela teoria de Schroedinger. Todavia, para alcançar este objetivo não mais recorreremos às leis clássicas desenvolvidas por Isaac Newton e sim a chamada Equação de Schroedinger¹³:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} + V\psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} \quad (8.1.1)$$

O leitor pode observar que a equação 8.1.1, trata-se de uma equação diferencial ordinária (EDO). Existem diversas formas de solucionar tal equação, porém, não vamos focalizar na resolução desta por enquanto. O que pretendemos registrar agora é o fato de que, com tal equação, conseguimos obter justamente a função de onda $\psi(x, t)$ que governa os objetos quânticos.

Diferentemente das leis de Newton, uma vez que obtemos a função de onda $\psi(x, t)$ esta não nos fornece informações precisas sobre o estado de um objeto quântica. Na verdade, a equação de Schroedinger apenas nos fornece a probabilidade de encontrarmos tal objeto em uma determinada região do espaço. Ou seja, a função de onda $\psi(x, t)$ pode ser encarada como uma onda de probabilidade.

Para entender o quão estranho isso pode parecer vamos considerar o seguinte exemplo: suponha que em um laboratório serão realizadas duas medidas para obter a posição de um elétron, confinado em uma região onde a energia potencial é V . As medidas não serão feitas consecutivamente. Entretanto, vamos considerar que tanto na primeira, quanto na segunda medida, as condições iniciais do elétron são as mesmas e que o instante t no

¹³ Destacamos que a equação 8.1.1 trata-se da equação de Schroedinger em sua versão unidimensional.

qual as medidas são registradas são os mesmos. Classicamente, esperava-se que a posição registrada para o elétron, obtida nas duas medições, fosse a mesma, pois, estamos realizando uma medida para um mesmo objeto, sujeita a mesma energia potencial e sobre as mesmas condições iniciais. Entretanto, as experiências nos mostram que o elétron pode, no instante t , ocupar posições diferentes quando realizamos várias medições para sua posição. Ou seja, não é possível obter com precisão a posição de objetos quânticos, como elétrons. É a função de onda $\psi(x,t)$ obtida pela equação de Schroedinger, quem nos fornece a probabilidade de encontrarmos o elétron em uma determinada posição no instante t .

O caráter probabilístico da equação de Schroedinger foi duramente criticado por físicos que faziam parte de escolas denominadas realistas (ou deterministas). Um dos representantes mais influentes destas era Albert Einstein. Uma frase de Einstein, bastante conhecida diz que: “Deus não joga dados com o universo”. Segundo Griffiths (2011, p. 3), para Einstein a equação de Schroedinger deveria estar incorreta ou, no mínimo, incompleta já que ela não era capaz de determinar com precisão o comportamento dos objetos quânticos.

Incompleta ou não, o que sabemos é que essa equação nos fornece resultados que coincidem com os experimentos realizados com objetos quânticos. Inclusive, destaca-se o fato de que com a equação de Schroedinger o problema encontrado em descrever um modelo atômico ganha uma solução. Com essa teoria é possível chegar aos mesmos resultados obtidos por Borh para o átomo de hidrogênio e mais que isso, obter resultados teóricos que coincidam com os experimentos realizados também para outros átomos. Conforme veremos na próxima seção, alguns resultados obtidos por essa equação já são aplicados em laboratórios e, futuramente, podem nos beneficiar com tecnologias surpreendentes.

8.2. Soluções da equação de Schroedinger

Agora que já sabemos do que se trata a equação de Schroedinger, vamos resolvê-la para obter alguns resultados importantes no que diz respeito às aplicações da quântica no cotidiano, conforme será visto no capítulo 9.

Conforme já mencionamos anteriormente, a equação 8.1.1 é uma EDO. Dentre as diversas maneiras que podemos recorrer para solucionar a mesma, vamos escolher o método da separação de variáveis (método convencionalmente utilizado) para tanto. A equação de Schroedinger (equação 8.1.1) nos diz que:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} + V\psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t}$$

Podemos iniciar a resolução da equação supondo que a solução geral da mesma é composta por uma função que depende exclusivamente da posição $\psi(x)$ e outra que dependa exclusivamente do tempo $\phi(t)$, isto é:

$$\psi(x,t) = \psi(x)\phi(t) \quad (8.2.1)$$

Com isto, podemos substituir nossa proposta de solução geral (equação 8.2.1) na equação 8.1.1, de maneira que vamos ficar com:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x)\phi(t)}{\partial x^2} + V\psi(x)\phi(t) = i\hbar \frac{\partial \psi(x)\phi(t)}{\partial t} \quad (8.2.2)$$

Agora, pode-se verificar que $\phi(t)$ torna-se constante no primeiro membro da equação 8.2.2, já que estamos derivando este em relação à x . Já no último membro da equação quem se torna constante é $\psi(x)$ já que este será derivado em relação à t . Notando isso, podemos escrever a equação 8.2.2 da seguinte maneira:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\phi(t)}{1} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + V\psi(x)\phi(t) = i\hbar \frac{\psi(x)}{1} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (8.2.3)$$

Dividindo toda a equação por $\psi(x)\phi(t)$ ficamos com:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{\psi(x)} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V = i\hbar \frac{1}{\phi(t)} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (8.2.4)$$

O mais importante, ao chegar neste resultado, é perceber que estamos diante de uma equação matemática. Ora, a matemática nos diz que tudo que está do lado esquerdo deve ser igual ao que está no lado direito, na equação 8.2.4. Sendo assim, para que a equação seja satisfeita, concluímos que ambos os lados dessa equação devem ser iguais a uma constante “ E ” (vamos chamar assim por motivos que serão claros adiante).

Se olharmos para o lado direito da equação 8.2.4, vamos ter:

$$i\hbar \frac{1}{\phi(t)} \frac{d\phi(t)}{dt} = E \quad (8.2.5)$$

Que pode ser, naturalmente, escrita como:

$$\frac{d\phi(t)}{\phi(t)} = -\frac{iE}{\hbar} dt \quad (8.2.6)$$

Integrando ambos os lados dessa equação e aplicando a propriedade exponencial, chegamos na chamada solução temporal da equação de Schroedinger:

$$\phi(t) = e^{-\frac{iE}{\hbar}t} \quad (8.2.7)$$

Agora nos resta apenas determinar a parte da equação que depende apenas de x . De forma análoga à obtenção da parte temporal da equação, sabemos da equação 8.2.4 que:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{\psi(x)} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V = E \quad (8.2.8)$$

Com uma manipulação algébrica simples, pode-se escrever essa equação como:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V\psi = E\psi(x) \quad (8.2.9)$$

A Equação 8.2.9 é a conhecida *Equação de Schroedinger Independente do Tempo*.

O interessante é notar que conseguimos obter, através do método de separação de variáveis, a parte temporal da equação de Schroedinger $\phi(t)$. Entretanto, para determinar $\psi(x,t)$ por completo precisamos resolver a Equação de Schroedinger Independente do Tempo e, isto, por sua vez, só é possível se conhecermos o potencial V , o qual o objeto quântico está sujeito. Vejamos então a solução da equação de Schroedinger independente do tempo para um potencial específico.

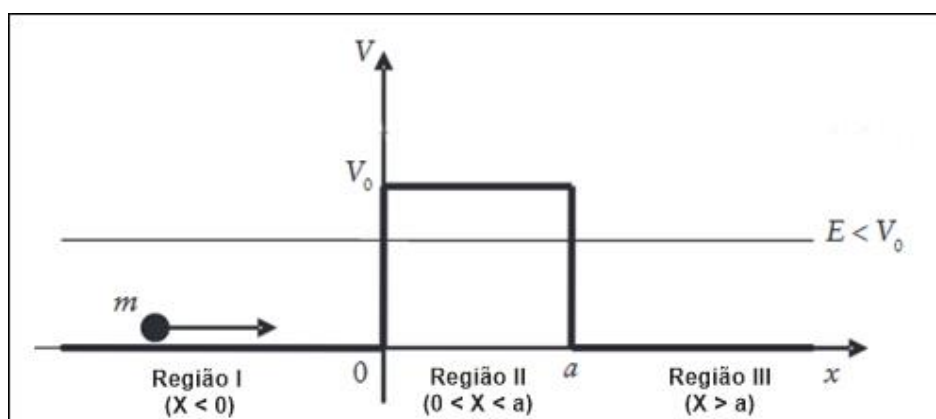
8.3. O caso da barreira de potencial

Para iniciar este tópico vamos fazer um experimento mental bem simples. Vamos pensar o seguinte: o que ocorre se você lança, horizontalmente e em linha reta, contra uma parede fixa, uma bola de tênis com uma velocidade considerável? Sua resposta será bastante lógica, não? A bola irá colidir contra a parede e retornar até suas mãos.

É improvável que você forneça uma energia suficientemente grande para que a bola de tênis atravessasse a parede (uma vez que esta possui uma massa muito grande). Mas, será que no mundo quântico o mesmo ocorre? Isto é, será que um objeto quântico, como um elétron, dotado de uma energia total E conseguiria atravessar uma parede ou, uma *barreira de potencial* de energia V_0 , sendo $V_0 > E$? Vamos Verificar!

Este problema é apresentado por Donangelo e Capaz (2009, p. 8). Para fins didáticos, vamos tratar este problema de acordo com o esquema proposto por estes, apresentado na figura 8.3.1.

8.3.1. Objeto quântico incidindo sobre barreira de potencial – Modificada.



Fonte: DONANGELO et al., 2009, p. 8¹⁴.

Um objeto quântico de massa m e energia total E incide da esquerda para a direita, sobre uma barreira de largura a cuja energia potencial é V_0 . Nos limites de $X < 0$ e $X > a$ (regiões I e III na figura) note que a partícula não está sobre influência de nenhum potencial, isto é, nessas regiões a partícula é livre. Já na região de $0 < X < a$ (região II da figura) a partícula encontra-se sob a influência de um potencial V_0 .

Através deste esquema, vamos tentar obter a função de onda $\psi(x)$ das três regiões de acordo com a equação 8.2.9.

Na região I, a partícula é livre. Logo, sua energia total E é:

$$E = \frac{p^2}{2m} \quad (8.3.1)$$

Como pretendemos obter $\psi(x)$ e a energia potencial V nesta região I é nula. A equação 8.2.9 pode ser escrita, após manipulações matemáticas, como:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{2m}{\hbar^2}E\psi(x) \quad (8.3.2)$$

Podemos simplificar ainda mais a equação diferencial observando que o termo da direita, entre o sinal negativo e a função de onda $\psi(x)$ é uma constante que podemos chamar de k_1^2 . Logo:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -k_1^2\psi(x) \quad (8.3.3)$$

Esta equação diferencial é bastante conhecida entre os estudantes de Física. Trata-se de uma equação diferencial cuja solução é semelhante a do caso de uma partícula em MHS. Obtemos desta forma a função de onda que governa a partícula na região I:

$$\psi(x)_I = Ae^{ik_1x} + Be^{-ik_1x} \quad (8.3.4)$$

A e B são constantes referentes à amplitude das ondas possíveis na região e devem ser determinadas para que seja possível descrever a função de onda por completo.

Um cálculo análogo pode ser realizado para determinar a função de onda na região III, já que a partícula também está livre nessa região. A função de onda para tal região pode ser escrita como:

$$\psi(x)_{III} = Ce^{ik_1x} + De^{-ik_1x} \quad (8.3.5)$$

Como estamos tratando de “ondas” é interessante analisar o significado físico das equações 8.3.4 e 8.3.5. Na primeira equação temos uma solução que indica uma onda se propagando no sentido positivo de x e outra caminhando

no sentido negativo de x . Neste caso a solução tem significado Físico aceitável, pois, estamos considerando que a onda se propaga da esquerda para a direita no eixo de x e isto está sendo representado pelo primeiro membro da equação 8.3.4. Com respeito ao segundo membro de $\psi(x)_I$ a exponencial com sinal negativo indica uma onda refletida devido a presença do potencial V_0 em $x = 0$.

Já na equação 8.3.5 encontramos um problema. Perceba que novamente $\psi(x)_{III}$ indica uma onda que se propagada no sentido positivo de x e outra que se propaga em sentido negativo. O primeiro membro está de acordo com nossa consideração, contando que a partícula consiga atravessar a barreira de potencial (ainda não temos certeza de que isso possa ocorrer, mas, vamos supor que sim). O problema físico de 8.3.5 é observado no segundo termo da equação, que indica uma onda sendo refletida. Note que não existe outro potencial posterior à posição $x = a$, capaz de fazer tal onda se refletir. Dessa forma, a constante D deve ser igual a zero para eliminar o problema. Sendo assim, conclui-se que as funções de onda que governam a partícula na região I e III são:

$$\begin{aligned}\psi(x)_I &= Ae^{ik_1x} + Be^{-ik_1x} \\ \psi(x)_{III} &= Ce^{ik_1x}\end{aligned}\tag{8.3.6}$$

Vamos realizar um cálculo semelhante para determinar a função de onda que governa nossa partícula no intervalo de $0 < X < a$ (região II). Nessa região a partícula se encontra sobre ação de um potencial V_0 . Logo, Sua energia total nessa região será:

$$E = \frac{p^2}{2m} + V_0\tag{8.3.7}$$

Substituindo 8.3.7 em 8.2.9 e realizando algumas manipulações algébricas chegamos ao seguinte resultado para a função de onda que governa a partícula na região II:

$$\psi(x)_{II} = Fe^{k_2x} + Ge^{-k_2x} \quad (8.3.8)$$

F e G são constantes a serem determinadas enquanto que k_2^2 é:

$$k_2^2 = \frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}$$

Agora conhecemos as funções de onda que governam o movimento da partícula em nosso esquema, nas três regiões consideradas. Lembre-se que todo este cálculo está sendo feito para descobrirmos se é possível que a partícula, portadora de uma energia E , consiga atravessar a barreira de potencial de energia V_0 sendo $V_0 > E$.

Uma vez conhecidos $\psi(x)_I$, $\psi(x)_{II}$, e $\psi(x)_{III}$ vamos obter o que é chamado de coeficiente de transmissão (T). O coeficiente de transmissão é a razão entre: o produto da amplitude de uma onda transmitida e seu conjugado pelo produto da amplitude de uma onda incidente e seu conjugado. Se realizarmos o cálculo deste e obtivermos um valor nulo ($T = 0$), significa que não há probabilidade da partícula ser transmitida de uma região para outra.

No caso que estamos tratando, a onda incidente é a onda vinda da região I, cuja amplitude é A . Já a onda transmitida é a onda na região III, cuja amplitude é C . Assim, de acordo com a definição do coeficiente de transmissão, vamos ter:

$$T = \frac{CC^*}{AA^*} \quad (8.3.9)$$

Onde A^* é o conjugado da amplitude A e C^* é o conjugado da amplitude C .

Não vamos abrir as contas para determinar explicitamente quem são as amplitudes A e C e seus conjugados. Donangelo e Capaz (2009, p. 10), comentam que isto pode ser feito aplicando as condições de continuidade nas equações 8.3.4, 8.3.6 e 8.3.8 e montando um sistema de três equações com

cinco variáveis: A, B, C, F e G . Ao fazer isto, e obter os valores de A, C e seus conjugados, obtemos o seguinte resultado para o coeficiente de transmissão:

$$T = \left[1 + \frac{(k_1^2 + k_2^2)^2 \operatorname{senh}^2(k_2 a)}{4 k_1^2 k_2^2} \right]^{-1} \quad (8.3.10)$$

Este não é um resultado fácil de interpretar, todavia, com ele percebemos que o coeficiente de transmissão é diferente de 0. Ou seja, existe uma probabilidade não nula da partícula de massa m e energia E , do nosso esquema, atravessar a barreira de potencial e chegar até a região III.

CAPÍTULO 9- A QUÂNTICA NO COTIDIANO

Diante do exposto até aqui, vemos que a FQ, segundo alguns físicos como Schroedinger, descreve a natureza do mundo microscópico por meio de fenômenos probabilísticos. Confrontando assim, físicos renomados como Einstein, defensor do caráter determinístico dos fenômenos naturais. Além dessas discrepâncias de ideias, têm-se também a presença, dentro desta teoria, do caráter dual para a radiação e matéria, juntamente com o princípio da incerteza de Heisenberg e o princípio da complementaridade de Bohr, os quais são ainda discutidos através de várias interpretações filosóficas.

Sendo assim, pode-se dizer que a FQ não é, a exemplo da Física Clássica, uma teoria bem “acabada”. Muitas pesquisas ainda são realizadas atualmente na tentativa de compreender mais sobre o universo quântico. Entretanto, essa área já é extremamente importante no que diz respeito às aplicações tecnológicas envolvendo os fenômenos estudados pela mesma. Veremos no item a seguir, algumas das diversas aplicações que a FQ desempenha no mundo em que vivemos.

9.1. O LDR e a iluminação pública

O leitor, em algum momento de sua vida, já se perguntou: “como funciona a iluminação pública”? Quer dizer, em alguns lugares não é necessário que alguém pressione um interruptor ou ligue uma chave para que todas as lâmpadas, nos postes de uma determinada rua, sejam acesas simultaneamente. A resposta para essa indagação é promovida pela FQ, através do efeito fotoelétrico.

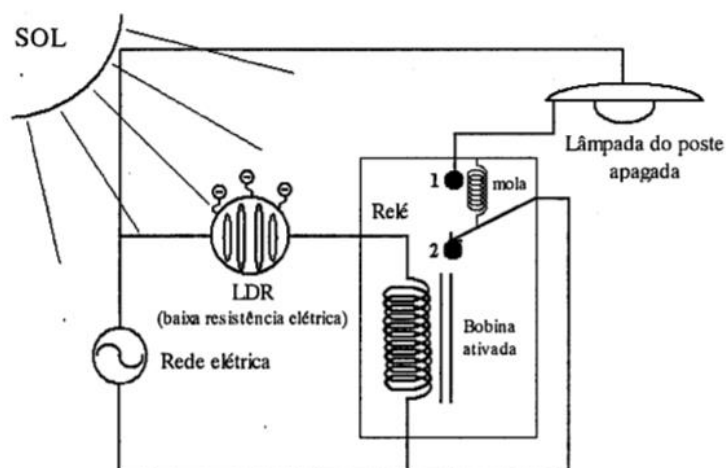
Conforme discutimos no capítulo 5, o efeito fotoelétrico trata da emissão de elétrons, de uma determinada superfície quando é incidida, sobre esta, luz com uma frequência mínima, capaz de “arrancar” os elétrons de tal superfície.

Este mesmo princípio é utilizado nos sistemas de iluminação pública por meio do equipamento denominado: Light Dependent Resistor (LDR) ou, em português, resistor dependente da luz. O equipamento consiste em um resistor construído à base de sulfeto de cádmio (CdS), um material que é bastante sensível à luz com frequência na faixa do espectro visível.

Valadares e Moreira (1998, p. 124), explicam que quando exposto a luz do Sol, por exemplo, o LDR apresenta uma resistência elétrica bastante baixa, pois, a ação da luz solar “arranca” elétrons, da superfície de CdS. A consequência da retirada destes elétrons é uma diminuição significativa na resistência elétrica do aparelho. Na ausência da luz solar, a resistência elétrica volta a aumentar.

Durante o dia, com a luz solar incidindo sobre o LDR, a resistência elétrica do aparelho é tênue de forma que a corrente elétrica (vinda da rede elétrica) é capaz de atravessar o resistor e chegar até uma bobina. A carga elétrica em movimento, nesta bobina, produz um campo magnético que tem a função de deslocar a chave do Relé, da posição 1 até a posição 2. Uma vez que a chave do relé encontra-se nesta posição o circuito é aberto e a corrente elétrica não chega até a lâmpada (que permanece apagada). Este processo é descrito na figura 9.1.1.

Figura 9.1.1. LDR em funcionamento (período matutino).

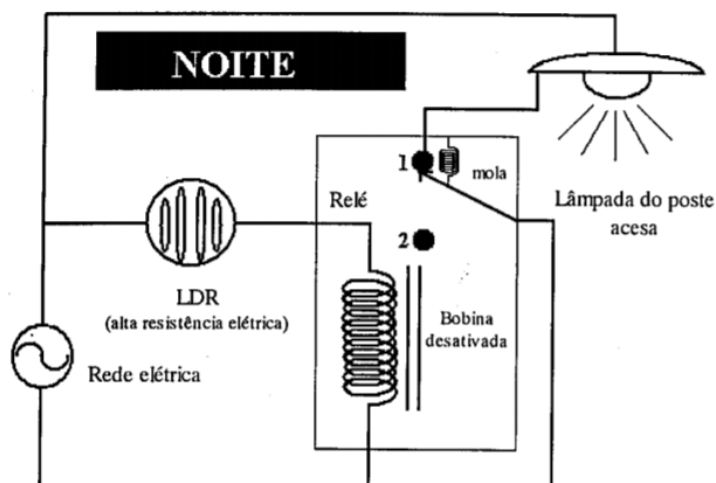


Fonte: VALADARES, 1998, p. 124¹⁵.

No período noturno, com ausência da luz solar, a resistência elétrica do equipamento aumenta, devido à ausência dos elétrons livres em sua superfície. Desta forma, a corrente elétrica não consegue atravessá-lo e, sendo assim, não há uma corrente elétrica na bobina capaz de produzir um campo magnético que desloque a chave do Relé para a posição 2. Ou seja, o circuito encontra-se fechado, e a corrente elétrica é capaz de chegar até a lâmpada. A figura 9.1.2 ilustra como o processo ocorre.

¹⁵ Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/6896/7584>. Acesso em jul. 2019.

Figura 9.1.2. LDR em funcionamento (período noturno).



Fonte: VALADARES, 1998, p. 125¹⁶.

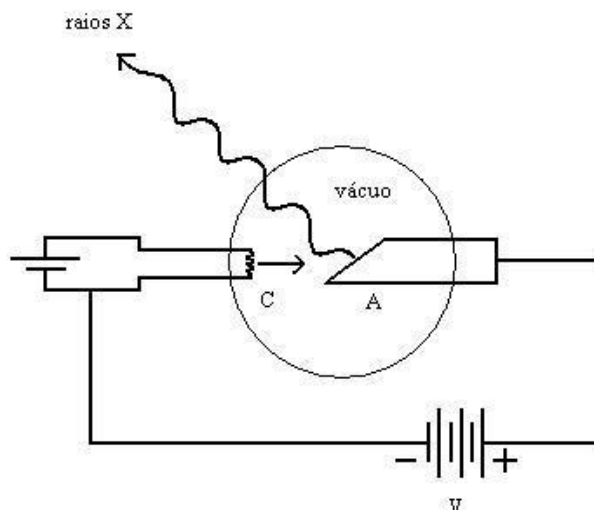
9.2. Produção de raios X e suas aplicações

Conforme citamos no item 3.2 deste trabalho, desde o momento de sua descoberta, os raios X desempenharam um papel de destaque na sociedade, principalmente na Medicina. Entretanto, Roentgen desconhecia a origem de tais radiações. Vejamos então de que forma a FQ explica a produção deste tipo de radiação.

A figura 9.2.1 esquematiza a produção de raios X em um aparato, a princípio, semelhante ao utilizado por Roentgen.

¹⁶ Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/6896/7584>. Acesso em jul. 2019.

Figura 9.2.1. Tomografia computadorizada.



Fonte: EISBERG, et al., 1979, p. 67.

Neste esquema, provoca-se um aumento de temperatura no catodo C, de forma que a energia térmica adquirida por este é capaz de direcionar elétrons, após serem acelerados devido a uma diferença de potencial V, até o anodo A. Chegando até A, Peruzzo et al. (2014, p.152), diz que: “os elétrons, passando perto dos núcleos dos alvos sofrem grande atração e deflexão na sua trajetória, sendo, portanto, acelerados” (PERUZZO, 2014, p. 152). Desta forma, os elétrons sofrem uma perda parcial ou até mesmo total, de sua energia que se manifesta como radiação X (ou fótons de raios X). Neste caso, tem-se um espectro contínuo de raios X.

Peruzzo et al. (2014, p. 153) mostra ainda que, na situação onde o elétron perde toda sua energia, os fótons de raios X produzido tem comprimento de onda mínimo, dado pela equação:

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV} \quad (9.2.1)$$

É mencionado ainda por Peruzzo et al. (2014, p. 153) que a emissão de raios X também pode acontecer de forma discreta (formando o espectro característico). Esta situação se caracteriza quando o alvo de um determinado

material (como o anodo A) é atingido por um elétron de alta energia que por sua vez, choca-se com um elétron de uma das camadas internas do alvo. O elétron na camada interna é então “arrancado” do átomo criando assim uma “lacuna” neste. Observa-se que, naturalmente, os elétrons em camadas mais externas tendem a ocupar tal lacuna, e neste processo de transição, emitem fótons de raios X.

Segundo Silva et al. (2000, p. 7) as aplicações dos raios X na medicina são estudadas por uma área denominada radiologia. Esta é subdividida em vários ramos cujos principais são a radiologia diagnóstica e a radioterapia.

Provavelmente você, leitor, em algum momento de sua vida já deve ter feito uma radiografia ou no mínimo deve conhecer alguém que já tenha feito. A radiografia nada mais é que uma imagem em uma chapa fotográfica obtida através da exposição do corpo humano a um feixe de raios X.

Silva et al. (2000, p. 9), destaca ainda que em alguns casos específicos é necessário visualizar o movimento de estruturas internas do paciente. Neste caso é preciso obter imagens do interior dos pacientes em tempo real. Atualmente isto é possível e, na verdade, muito utilizado. Um bom exemplo desta observação em tempo real ocorre em exames de cateterismo. O funcionamento de um aparelho que realiza esse procedimento médico substitui o filme fotográfico por uma tela fluorescente. Em 1972 este tipo de procedimento se tornou ainda mais eficaz com a tomografia computadorizada, técnica que consiste em mover, simultaneamente, a fonte de raios X e os detectores que captam esses raios em torno do paciente.

Figura 9.2.2. Tomografia computadorizada.



Fonte: SILVA, 2000, p. 9¹⁷.

Outras aplicações cotidianas dos raios X estão vinculadas aos procedimentos de radioterapia. Agora os raios X não somente são utilizados como ferramenta para visualizar através dos objetos, incluindo o corpo humano. A própria emissão desses é essencial para o tratamento de algumas doenças.

A radioterapia é utilizada, principalmente, no tratamento de pessoas com câncer. O princípio da radioterapia, conforme destaca Silva et al. (2000, p. 11), baseia-se na destruição de tumores por absorção de energia da radiação utilizada no tratamento.

Figura 9.2.3. Aparelho usado em tratamento de pessoas com câncer.



Fonte: SILVA, 2000, p. 11¹⁸.

9.3. A tecnologia do Laser

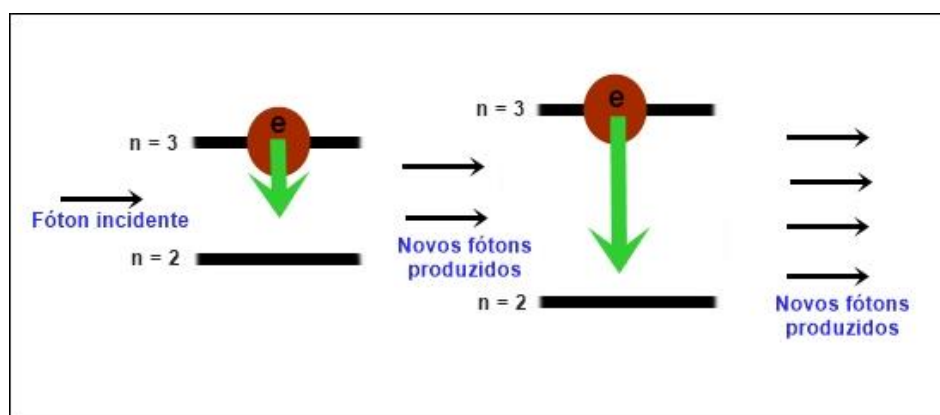
Conforme citamos na seção 7.3 o modelo proposto por Bohr para explicar o átomo de Hidrogênio (que mais tarde, como vimos, teve os resultados confirmados pela equação de Schroedinger) foi de grande importância para a sociedade. A criação do que chamamos de Laser (Light amplification by stimulated emission of radiation) está vinculada diretamente com a ideia de emissão de fótons por excitação de átomos. Esses equipamentos são hoje utilizados nas mais variadas atividades humanas, conforme veremos nos próximos parágrafos. Mas, como funciona de fato um laser? Vamos verificar.

Vamos ressaltar antes que não existe apenas um tipo de laser. Segundo Valadares e Moreira (1998, p. 125), existem lasers a gás, lasers de líquido e lasers de estados sólidos. Vamos focalizar em entender como se dá o funcionamento dos lasers à gás.

Neste dispositivo existem átomos (por exemplo, de hélio ou neônio) que podem produzir luz. Normalmente, uma corrente elétrica cede energia aos átomos que constituem o gás. Em outras palavras, a corrente elétrica excita os elétrons dos átomos desse gás. Como se pode verificar na figura 3.2.1, um fóton é emitido, somente se um elétron sai de um estado excitado para seu estado de energia original. Isso pode ser feito de maneira espontânea ou de forma estimulada. Vejamos como o processo de forma estimulada (pois é este que nos interessa) ocorre.

Neste processo, um fóton incidente, estimula o átomo excitado a emitir dois novos fótons que, por sua vez, são idênticos ao fóton incidente. Estes novos fótons produzidos, conseqüentemente, induzem os demais átomos excitados a emitirem outros fótons idênticos ao primeiro incidido. Como cita Valadares e Moreira (1998, p. 127) a emissão estimulada de fótons é um processo de “bola de neve”. A figura 9.3.1 esquematiza como esse processo ocorre.

Figura 9.3.1. Emissão estimulada de fótons.

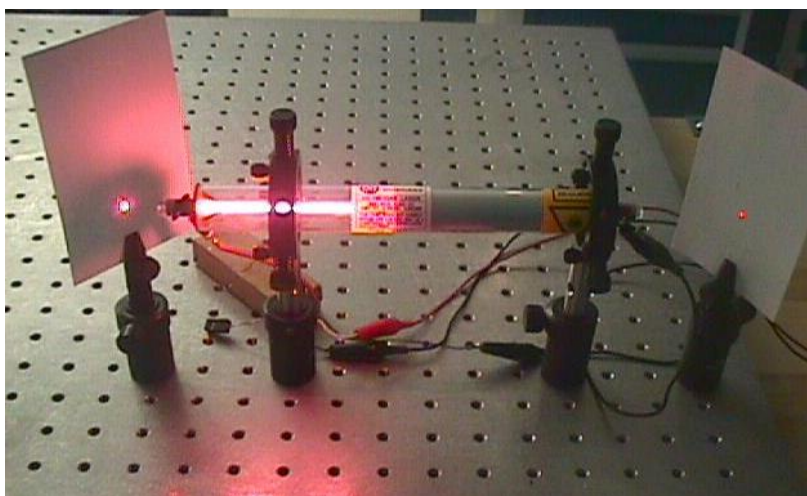


Fonte: elaborada pelo autor.

Na figura 9.3.1, a primeira seta, em preto, indica um fóton que incide sobre um elétron excitado (representado pela esfera vermelha). O fóton incidente estimula o elétron excitado, de forma que este sai de um estado $n = 3$ para $n = 2$ (representado pela seta verde), produzindo outros dois fótons idênticos ao primeiro incidido. Estes dois novos fótons, por sua vez, produzem outros novos fótons idênticos ao primeiro.

A luz produzida por um laser de gás, desta forma, é monocromática e coerente, pois, todos os fótons produzidos no processo são idênticos.

Figura 9.3.2. Laser de Hélio-Néon.



Fonte: Technology Niagarac¹⁹.

Valadares (2005, p. 44) cita, em sua obra, uma série de aplicações, dos diversos tipos de lasers existentes. De acordo com ele os lasers de CO₂²⁰, atualmente um dos mais usados em aplicações industriais, tem aplicações em:

- Soldagens, cortes e usinagem de materiais;
- Tratamento térmico de metais (os feixes do laser podem modificar a estrutura cristalina das superfícies metálicas);
- Cortes cirúrgicos e cauterização;
- Remoção de camadas da pele.

É citada por ele também aplicações de um laser denominado *excimer*, que emite pulsos na faixa do ultravioleta que são utilizados, sobretudo, em cirurgias do olho para a remoção de camadas extremamente finas dos tecidos da córnea sem afetar áreas vizinhas.

¹⁹ Disponível em: <http://technology.niagarac.on.ca/courses/phtn1300/HeNeLasers.html>. Acesso em jul. 2019.

²⁰ Os lasers de CO₂ operam na faixa do infravermelho. Este tipo de laser possui uma potência que pode atingir até 10.000 W e focalizar áreas de até 0,0025 mm². O calor produzido por estes dispositivos pode atingir até 5500 °C o que permite cortar e derreter materiais extremamente duros (Valadares, p. 44).

Conforme se pode perceber, os lasers estão cada vez mais imersos em nossas vidas, contribuindo de forma positiva e devemos isso a FQ.

Figura 9.3.3. Médicos usam laser para reduzir tamanho de próstata em hospital de Brasília.



Fonte: G1 – Globo²¹.

9.4. Os microscópios STM e a Nanotecnologia

Na seção 8.2 havíamos comentado que os resultados obtidos no caso da barreira de potencial seriam importantes, pois, implicam em aplicações tecnológicas importantes. Pois bem, iremos apresentar aplicações da barreira de potencial, vinculadas a Nanotecnologia.

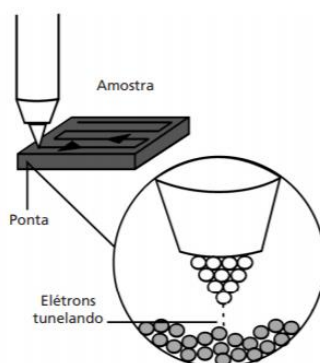
Vamos começar nossa discussão então descrevendo o que é a Nanotecnologia. Valadares (2005, p. 51) cita que a Nanotecnologia está relacionada com a manipulação da matéria em escala atômica. Segundo o mesmo, ao atingir uma escala nanométrica ($10^{-9} m$) um objeto tem suas propriedades modificadas. Para ter noção da importância da Nanotecnologia, hoje já é possível “transformar” água salina em água doce por meio de dessanilizadores à base de nanotubos.

²¹ Disponível em: <http://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2015/08/hospital-troca-cirurgia-de-prostata-por-laser-que-vaporiza-glandula-no-df.html>. Acesso em jul. 2019.

Mas, como essa poderosa ciência se relaciona aos conceitos da FQ e mais especificamente ao caso da barreira de potencial? Ocorre que os avanços nessa área só foram possíveis graças à invenção dos chamados Microscópios de Varredura por Sonda (SPM na sigla inglesa). Como destaca Valadares (2005, p. 54), todos os SPM são variações do microscópio eletrônico de tunelamento²² (STM na sigla inglesa). Em resumo, os STM são instrumentos com amplo poder de visualização e, devido a isto, facilitam a manipulação da matéria em pequenas escalas.

Donangelo e Capaz (2009, p. 21) afirmam que o funcionamento do STM é surpreendentemente simples. Analisemos o esquema da figura 9.4.1.

Figura 9.4.1. Esquema que representa o funcionamento do STM.



Fonte: Fonte: DONANGELO et al., 2009, p. 21²³.

Neste esquema, aproxima-se da superfície de uma determinada amostra que se pretende analisar, uma ponta metálica muito fina. Quando a distância entre estas é suficientemente pequena, os elétrons começam a passar da amostra para a ponta, através da barreira de potencial que se promove na região entre a amostra e a ponta. Note que o que ocorre aqui é algo muito semelhante ao caso da barreira de potencial descrito na seção 8.3. Diante disto, pode-se concluir que a construção destes dispositivos, bases da nanotecnologia, são heranças dos fenômenos estudados pela FQ.

²² O STM foi inventado em 1981 por Gerd Binnig e Heinrich Rohrer em 1981 (VALADARES, 2005, p. 54).

²³ Disponível em: <https://canalcederj.cecierj.edu.br/012016/19e97a8f4f86b688efd2ce28fd46ed39.pdf>. Acesso em jul. 2019.

CAPÍTULO 10-ANÁLISE DOS LIVROS DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO

10.1. Metodologia

Nesta seção apresentaremos de que forma as aplicações da FQ vem sendo abordadas nos livros de Física do EM. Para tanto, realizou-se uma investigação em oito (08) livros de Física, escritos por diferentes autores. A pesquisa foi realizada apenas com obras referentes ao ano de 2009 e posteriores a este.

Destacaremos no presente capítulo, os trechos que fazem alguma menção às aplicações cotidianas da Física Quântica nas obras analisadas. Ressalta-se que temos por intuito desta pesquisa, verificar se de fato os livros didáticos apresentam relação, desta incrível teoria da Física, com nosso dia a dia. As bibliografias utilizadas na pesquisa estão destacadas no item a seguir.

10.2. Bibliografia utilizada

A) Obra: Conecte Física, Volume 3, 1ª Edição. São Paulo: Editora Saraiva, 2011.

Autores: BISCUOLA, Gualter José; BÔAS, Newton Villas; DOCA, Ricardo Helou.

Nesta obra, os escritores abordam aplicações referentes ao efeito fotoelétrico e a emissão de fótons na transição de elétrons em um átomo.

No capítulo 12, página 299, lê-se:

“O efeito fotoelétrico tem aplicações, por exemplo, na contagem do número de pessoas que passam por um determinado local, na abertura e no fechamento automático de portas, na leitura de trilhas sonoras em projetores cinematográficos, em sistemas de alarmes, nos dispositivos que ligam e desligam automaticamente sistemas de iluminação e na medição da concentração de fumaça em chaminés.”

Na introdução do Capítulo 12: “Noções de Física Quântica” do presente livro analisado, é destacado também pelos autores que os estudos de alguns Físicos importantes como Einstein culminaram também no desenvolvimento de equipamentos como os lasers e os tomógrafos.

Embora cite todas essas aplicações, pode-se notar que o foco principal dos autores é detalhar o funcionamento nos dispositivos que ligam e desligam sistemas de iluminação (LDR) e apresentar uma explicação sobre o funcionamento das lâmpadas fluorescentes.

Para explicar o funcionamento dos dispositivos de LDR são introduzidos os conceitos de Célula fotoemissiva e Célula fotocondutiva. Na página 299 do mesmo capítulo, lê-se:

“(…) materiais como o sulfeto de cádmio apresentam resistência elétrica muito alta em ambientes escuros e muito baixa em ambientes bem iluminados”. Esses materiais constituem os chamados fotorresistores, também conhecidos por LDR (...).

Outra aplicação presente no livro, acerca do fenômeno fotoelétrico, encontra-se em forma de exercício, na página 312, ainda no capítulo 12:

“(…) Uma das aplicações do efeito fotoelétrico é o visor noturno, aparelho de visão sensível à radiação infravermelha (...). Nesse tipo de equipamento, a radiação infravermelha atinge suas lentes e é direcionada para uma placa de vidro revestida de material de baixa função trabalho (W). Os elétrons arrancados desse material são “transformados”, eletronicamente, em imagens”.

Por último, os escritores também apresentam aplicações referentes ao conhecimento acerca da emissão de fótons em transições eletrônicas. Os autores utilizam como aplicação deste fenômeno o funcionamento de uma lâmpada fluorescente. Na página 306, do capítulo 12, encontra-se:

“Vamos explorar mais um pouco a lâmpada fluorescente (...). Os elétrons liberados nos filamentos quentes são acelerados em virtude de uma diferença de potencial aplicada entre as extremidades da lâmpada. Esses

elétrons atingem átomos de uma mistura rarefeita de mercúrio (no estado de vapor) com um gás inerte (argônio), provocando ionização e excitações. Note que estamos diante de mais um processo de transição eletrônica: é a transição causada pela colisão de elétrons.”

Os autores, ainda na página 306 do capítulo referido, escrevem:

“Em anúncios luminosos, como os de gás neônio, por exemplo, que emitem uma luz avermelhada, as transições eletrônicas também são causadas por bombardeamento de elétrons. Isso acontece na tela do tubo de imagem de um televisor”.

B) Obra: Física: os Fundamentos da Física, Volume 3, 10ª Edição. São Paulo: Moderna, 2009.

Autores: RAMALHO Junior, Francisco; FERRARO, Nicolau Gilberto; SOARES, Paulo Antônio de Toledo.

Na referida obra, ao iniciar-se o capítulo 17: “Ondas eletromagnéticas” os autores citam a importância da Medicina Nuclear e da Radioterapia em procedimentos médicos contemporâneos. Na página 418 do mesmo capítulo é destacado pelos autores como ocorre a emissão dos raios X, utilizados nestes procedimentos.

Na página 419 é, em especial, discutida a aplicação dos raios X no equipamento denominado tomógrafo. Lê-se na página 419, do capítulo 18 deste livro:

“(…) Nos tomógrafos, o paciente é deitado sobre uma mesa de exame, que desliza lentamente no meio de um anel. Uma fonte de raios X, acoplada ao anel, gira ao redor do paciente. A radiação emitida é captada por inúmeros detectores, que avaliam a taxa de absorção do feixe em função da espessura e do tipo de diversos tecidos do órgão sem seções fatiadas da região do corpo a ser examinada”.

Outras aplicações da FQ presentes neste livro encontram-se no capítulo 19: “Física Quântica”. Na introdução deste, é destacado pelos autores que as

células fotovoltaicas constituem um exemplo de aplicações do efeito fotoelétrico. “A incidência de luz ejeta elétrons da superfície da célula, gerando uma corrente elétrica cuja energia pode ser armazenada ou alimentar um circuito elétrico”.

Adiante, o autor cita ainda mais duas aplicações envolvendo o efeito fotoelétrico. Na página 452 do capítulo 19, é introduzido o conceito de célula fotoelétrica. Lê-se:

“Uma célula fotoelétrica, vulgarmente chamada olho elétrico, é construída colocando-se uma fina camada de um metal alcalino sobre a superfície interna de um pequeno tubo, onde foi produzido vácuo. Quando há incidência de luz através da Janela J , os fotoelétrons saem da superfície do metal, sendo atraídos pelo ânodo, registrando o amperímetro A uma corrente elétrica. Um raio de luz, incidindo através da janela, age como uma chave elétrica que fecha o circuito.”

Ainda na mesma página, o autor cita que uma aplicação dessa célula ocorre nos cinemas sonoros.

Outra aplicação, também da célula fotoelétrica é apresentada na forma de exercício pelos autores do livro. Na página 453, do capítulo 19, lê-se:

“(…) O Sr. Phortunato instalou, em sua farmácia de manipulação, um dispositivo conhecido como “olho elétrico”, que, acionado quando alguém passa pela porta de entrada, que o avisa da chegada de seus clientes. (…)”

C) Obra: Física Para o Ensino Médio, Volume 3, 1ª Edição, São Paulo: Editora Saraiva, 2010.

Autores: YAMAMOTO, Kazuhito; FUKU, Luiz Felipe.

No capítulo 18: “Teoria Quântica”, página 247, do presente livro, os autores citam:

“(…) 30% do produto interno bruto americano depende dos resultados obtidos na aplicação da teoria quântica”.

Embora faça essa menção às aplicações da quântica, não são citados exemplos de aplicações pelos autores, nesta página. Mais adiante, na página 251 do mesmo capítulo, os autores discutem o funcionamento da célula fotoelétrica e, na página 252 comentam:

“As aplicações do efeito fotoelétrico no nosso cotidiano são encontradas em: dispositivos para abertura e fechamento de portas automáticas, sistemas de segurança e alarmes, interruptores automáticos para a iluminação de vias públicas, fotômetro de máquinas fotográficas, que controlam o tempo de exposição de filmes, etc.”.

D) Obra: Física Clássica, Volume 3, 1ª Edição, São Paulo: Atual, 2012.

Autores: CALÇADA, Caio Sérgio; SAMPAIO, José Luiz.

Neste livro os autores destacaram as aplicações da FQ em tópicos denominados “Leitura”. O primeiro destes tópicos apresenta aplicações do efeito fotoelétrico. Na página 431, do capítulo 21: “Mecânica Quântica”, os autores citam:

“Uma das aplicações do efeito fotoelétrico é o visor noturno (...). Uma outra aplicação é no funcionamento de alarmes e na abertura automática de portas.”

A explicação do funcionamento destes dispositivos é apresentada de forma breve pelos autores. Mais adiante no livro, os autores abordam a difração de elétrons. No tópico denominado “Leitura” os autores abordam a ideia que levou até a construção dos microscópios eletrônicos. Entretanto, não apresentam qualquer aplicação deste. É citado pelos autores, na página 453 do capítulo 21:

“(...) Acelerando elétrons por meio de uma diferença de potencial (...) o comprimento de cada elétron será: $0,025 \text{ nm}$. (Esse valor é cerca de 20.000 vezes menor que os valores dos comprimentos de onda da luz. Portanto, se em vez de um feixe de luz usarmos um feixe de elétrons, poderemos observar

objetos bem menores que os que conseguimos observar com o microscópio óptico. Essa é a ideia que levou à construção dos microscópios eletrônicos.”

E) Obra: Física: Contexto e Aplicações, Volume 3, 1ª Edição, São Paulo: Scipione, 2013.

Autores: RIBEIRO DA LUZ, Antônio Máximo; ÁLVARES, Beatriz Alvarenga.

Algumas aplicações da FQ são apresentadas, neste livro, no capítulo 8: “Indução eletromagnética – Ondas eletromagnéticas”. Na página 251, do presente capítulo, destaca-se a importância dos raios X para a Medicina. Lê-se nesta página:

“Modernamente, os raios X encontram um campo muito vasto de aplicações além das radiografias. Assim eles são usados no tratamento do câncer, na pesquisa da estrutura cristalina dos sólidos, na indústria e em quase todos os campos da ciência e da tecnologia”.

Na página 253, ainda no capítulo 8, têm-se um tópico denominado “Aplicações da Física” onde os autores citam utilizações frequentes dos lasers. Na referida página, destaca-se o seguinte texto:

“São inúmeras as aplicações dos raios laser em diversos setores da ciência, da tecnologia e de nosso cotidiano. Entre elas podemos citar: leitura do código universal de produtos, em telecomunicações, para soldar e cortar metais, para medir com precisão distâncias muito grandes, em CDs, DVDs e nos Blu-ray, na holografia e na Medicina”.

É importante perceber que, nesta obra, as aplicações dos lasers estão vinculadas ao Eletromagnetismo. Entretanto, para explicar o funcionamento desses equipamentos, os autores necessitam recorrer aos conceitos vinculados à FQ (emissão de fótons por átomos estimulados).

No capítulo 9: “Física Contemporânea” página 297, os autores fazem uma citação sobre uma aplicação do efeito fotoelétrico:

“(…) É por emissão termiônica, por exemplo, que os elétrons saem de um filamento de tungstênio aquecido para formar a imagem no tubo de imagens de uma TV”.

Por último, no tópico denominado “Aplicações da Física”, página 301 capítulo 9, os escritores alertam sobre possíveis danos à saúde, relacionados à exposição aos raios X e fazem um alerta para quem utiliza televisores antigos. Ressalta-se, na página mencionada, o seguinte texto:

“(…) nossa pele não barra a passagem dos raios X e raios gama, permitindo que essas radiações mais energéticas atinjam nossos órgãos internos e possam, eventualmente, causar danos. Os tubos de imagem das TVs mais antigas vazam um pouco de raios X; por isso, para as pessoas que passam muito tempo à sua frente, é recomendável manter uma distância de pelo menos dois metros, visto que os raios X são atenuados pelo ar”.

F) Obra: FÍSICA, Volume 3, 1ª Edição, São Paulo: Ática, 2013.

Autores: GUIMARÃES, Osvaldo; PIQUEIRA, José Roberto; CARRON, Wilson.

No capítulo 6: “Teoria Quântica” no tópico denominado “Física tem HISTÓRIA” os autores citam, na página 212:

“A Física quântica tem propiciado um desenvolvimento tecnológico sem precedentes. A aplicação dos transistores e dos lasers tem produzido profundas mudanças na eletrônica, na Medicina, na Biotecnologia e, conseqüentemente, no nosso modo de vida”.

Em seguida, em tópico denominado “Física Explica” na página 218, ainda no capítulo 6, os autores abordam a aplicação do efeito fotoelétrico, por meio das células fotoelétricas. Lê-se nessa página:

“(…) o nosso cotidiano está impregnado de dispositivos que utilizam células fotoelétricas. Basta observarmos, por exemplo, o funcionamento automático de determinadas portas em lojas, hotéis, shoppings, etc., o

acendimento automático de lâmpadas em postes de iluminação nas ruas e o controle automático de água em torneiras”.

Os autores citam vários exemplos, porém, detalham apenas o funcionamento do LDR.

G) Obra: Física: Eletromagnetismo – Física Moderna, Volume 3, 3ª Edição, São Paulo: FTD, 2016.

Autores: BONJORNINO, José Roberto; RAMOS, Clinton Marcico; PRADO, Eduardo de Pinho; BONJORNINO, Valter; BONJORNINO, Mariza Azzolini; CASEMIRO, Renato; BONJORNINO, Regina de Fátima Souza Azenha.

No capítulo 9: “Indução eletromagnética” no tópico “PENSANDO AS CIÊNCIAS: Física e Tecnologia” os autores abordam o funcionamento e utilizações dos lasers. Lê-se no capítulo 9, página 192:

“Os lasers estão presentes em uma grande variedade de produtos com diversas finalidades, como aparelhos de CD, brocas de dentistas, máquinas de corte de metal ultravelozes e sistemas de medição. Nas caixas registradoras dos supermercados, usam-se lasers para ler os códigos de barra. Eles são utilizados também na remoção de tatuagens, no implante de cabelos, nas cirurgias de visão e também no tratamento para a apneia do sono”.

No mesmo capítulo, página 195, os autores também abordam os raios X. Nesta página, é mencionado:

“Na Medicina, além de serem usados em diagnóstico, os raios X são empregados no tratamento do câncer, uma vez que as células afetadas parecem ser mais sensíveis à radiação do que as células normais. Na indústria, são utilizados para detectar pequenos defeitos em corpos metálicos”.

No capítulo 12: “Física Quântica”, página 229, em tópico denominado “PENSANDO AS CIÊNCIAS: Física e Tecnologia” os autores explicam como se dá a produção de energia elétrica utilizando as células fotovoltaicas. Têm-se escrito nesta página:

“A radiação solar é uma fonte de energia renovável que pode ser usada para produzir eletricidade e calor. (...) Para a produção de eletricidade são utilizados as células solares, também chamadas de células fotovoltaicas (...). Tais células podem ser encontradas em calculadoras, controles remotos de aparelhos eletrônicos (...) aparelhos de rádio e de telefone em regiões nas quais não se dispõe de outro tipo de energia (...) etc.”.

Os autores ainda citam algumas outras aplicações do efeito fotoelétrico na página 232 do mesmo capítulo:

“(...) as células fotoelétricas controlam a abertura e o fechamento de portas de elevadores, o funcionamento de máquinas, o visor noturno, as células solares utilizadas em satélites artificiais para transformar energia luminosa em eletricidade etc.”.

H) Obra: FÍSICA em Contextos, Volume 3, 1ª Edição, São Paulo: Editora do Brasil, 2016.

Autores: PIETROCOLA, Mauricio; POGBIN, Alexander; ANDRADE, Renata de; ROMERO, Talita Raquel.

No capítulo 8: “A natureza da luz”, página 203 os autores incluem no livro um tópico chamado “CIÊNCIA, TECNOLOGIA, SOCIEDADE E AMBIENTE”. Neste é abordado à aplicação do efeito fotoelétrico nos chamados CCD (Charge Couple Device). Lê-se nesta página:

“O conhecimento do efeito fotoelétrico permitiu que se desenvolvessem dispositivos que transformam luz em sinal elétrico. Câmeras de vídeo ou máquinas fotográficas digitais, tanto amadoras como profissionais, utilizam um CCD (...)”. A explicação acerca do funcionamento do CCD é feito de forma simples, mas com alguns detalhes.

CAPÍTULO 11 - DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do que foi exposto no presente trabalho, é possível perceber que mesmo sendo uma teoria recente e ainda “misteriosa”, a FQ já nos proporcionou (e continua proporcionando) diversos avanços tecnológicos. Trata-se, desta forma, de uma ciência extremamente importante para o desenvolvimento das mais diversas áreas do conhecimento humano.

A análise realizada nos livros de Física para o EM, destacada no capítulo 10, aponta, de forma positiva, para uma crescente preocupação dos autores em trazer as aplicações cotidianas da FQ em suas obras. Dos oito livros analisados, vê-se que ao menos um exemplo de utilização dos princípios da teoria quântica no dia a dia é destacado pelos autores. Ressaltamos, porém, mediante a referida pesquisa, três considerações acerca de como os escritores abordam as utilizações dos princípios quânticos.

A primeira está relacionado a como os autores Bonjorno et al. (item “G”) e Ribeiro da Luz et al. (item “E”) abordam, em suas obras, as aplicações dos lasers. Nota-se, nos livros dos referidos escritores, que tais aplicações são apresentadas nos capítulos dedicados ao Eletromagnetismo. Entendemos que isto pode se caracterizar como um ponto negativo, pois, para explicar o funcionamento destes equipamentos, é necessário recorrer à ideia da transição de elétrons e a emissão de fótons por átomos estimulados. Estas ideias, entretanto, são abordadas mais detalhadamente, somente nos capítulos vinculados à FQ. Sendo assim, entendemos que seria mais produtivo se as aplicações dos lasers estivessem apresentadas nos capítulos dedicados à Física quântica e não ao de eletromagnetismo.

A segunda diz respeito a como os autores Ramalho Junior et al. (item “B”), Ribeiro da Luz et al. (item “E”) e Bonjorno et al. (item “G”) apresentam as aplicações ligadas as radiações de raio X. Assim como no caso dos lasers, a crítica aqui se faz, pois, tais aplicações estão inseridas nos capítulos dedicados ao Eletromagnetismo. Ressalvamos que não há nada de errado nisto, pois, entendemos que os autores discutem neste capítulo apenas questões como frequência e comprimento de ondas eletromagnéticas, das citadas radiações. Todavia, se as aplicações dos raios X fossem apresentadas nos capítulos

destinados a FQ, poder-se-ia realizar uma discussão mais ampla acerca de como essas radiações são produzidas.

Por fim, como uma terceira consideração, destacamos o fato de haver, em todos os livros analisados, uma preferência, por parte dos autores, em explorar aplicações associadas à antiga FQ. Em especial, percebe-se um favoritismo em se apresentar aplicações relacionadas ao efeito fotoelétrico: células fotoelétricas, sistemas de LDR, sensores, etc. Vê-se que pouco se falar a respeito de aplicações envolvendo a nova FQ. De todos os livros investigados, apenas o de Calçada e Sampaio: “Física Clássica” (item “D”) faz menção, sem maiores detalhamentos ao desenvolvimento dos microscópios eletrônicos.

Já mencionamos neste trabalho que os microscópios eletrônicos consistem em equipamentos amplamente utilizados pela nanotecnologia. Essa ciência, por sua vez, já apresenta aplicações importantes para o desenvolvimento humano e social, no mundo contemporâneo.

Em última análise, penso ser de extrema necessidade que os escritores de livros de Física para o EM busquem alternativas para acrescentar, em suas obras, também as aplicações vinculadas a nova FQ. Desta forma, as obras para o Ensino Médio ficarão mais próximas de cumprir com os objetivos recomendados pela LDB, em relação à formação dos discentes da última etapa do nível básico de ensino.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATISTA, Amanda Penalva. **UMA ANÁLISE DA RELAÇÃO PROFESSOR E O LIVRO DIDÁTICO**. [Online] Universidade do Estado da Bahia, 2011. [Citado em: 08 de Julho de 2019]. Disponível em: <https://docplayer.com.br/234729-Uma-analise-da-relacao-professor-e-o-livro-didatico.html>.

BISCUOLA, Gualter José; BÔAS, Newton Villas; DOCA, Ricardo Helou. (2011). **Conect Física**. (1ª ed., Vol. 3). São Paulo: Saraiva.

BONJORNIO, José Roberto; RAMOS, Clinton Marcico; PRADO, Eduardo de Pinho; BONJORNIO, Valter; BONJORNIO, Mariza Azzolini; CASEMIRO, Renato; BONJORNIO, Regina de Fátima Souza Azenha. (2016). **Física: Eletromagnetismo - Física Moderna**. (3ª ed., Vol. 3). São Paulo: FTD.

BRASIL. **Lei de Bases e Diretrizes da Educação Nacional**. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Seção IV, Art. 35. [Citado em: 08 de Julho de 2019]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm.

CALÇADA, Caio Sérgio; SAMPAIO, José Luiz. (2012). **Física Clássica**. (1ª ed., Vol. 3). São Paulo: Atual.

DONANGELO, Raul José; CAPAZ, Rodrigo Barbosa. **Introdução à Mecânica Quântica**. (2019). Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ. [Citado em: 08 de Julho de 2019]. Disponível em: <https://canalcederj.cecierj.edu.br/012016/19e97a8f4f86b688efd2ce28fd46ed39.pdf>.

EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. (1979). **FÍSICA QUÂNTICA: ÁTOMOS, MOLÉCULAS, SÓLIDOS, NÚCLEOS E PARTÍCULAS**. (3ª ed.). Rio de Janeiro: Elsevier.

GRIFFITHS, David J. (2011). **MECÂNICA QUÂNTICA**. (2ª ed.). São Paulo: PEARSON.

GUIMARÃES, Osvaldo; PIQUEIRA, José Roberto; CARRON, Wilson (2013). **FÍSICA**. (1ª ed., Vol. 3). São Paulo: Ática.

ISOLA, Vinicius. **A História do Eletromagnetismo**. [Online] Unicamp, 2003. [Citado em: 08 de Julho de 2019]. Disponível em:

https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2003/992558ViniciusIsola-RMartins_F809_RF09_0.pdf.

Ministério da Educação. **Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio**. [Online] MEC. [Citado em: 08 de Julho de 2019]. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/programa-saude-da-escola/195-secretarias-112877938/seb-educacao-basica-2007048997/12598-publicacoes-sp-265002211>.

MORAIS, Rodrigo Fernandes. **A Natureza da eletricidade (Uma Breve História)**. [Online] Universidade Federal do Rio de Janeiro, Setembro de 2014. [Citado em: 08 de Julho de 2019]. Disponível em: https://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2014_Rodrigo_Morais/dissertacao_Rodrigo_Morais.pdf.

PERUZZO, Jucimar; POTTKER, Walmir Eno; PRADO, Thiago Gilberto do. (2014). **Física Moderna e Contemporânea: das teorias quânticas e relativísticas às fronteiras da física**. (2ª ed., Vol. 1). São Paulo: Editora Livraria da Física.

PESSOA JUNIOR, Osvaldo. (2003). **Conceitos de Física Quântica**. São Paulo: Livraria da Física.

PIERES, Adriano; DALT, Silvana Da. **Raios Catódicos**. [Online] Porto Alegre: Evangraf, 2011. [Citado em 08 de Julho de 2019]. Disponível em: http://www.ufrgs.br/sead/servicos-ead/publicacoes-1/pdf/Raios_Catodicos.pdf.

PIETROCOLA, Maurício; POGBIN, Alexander; ANDRADE, Renata de; ROMERO, Talita Raquel. (2016). **Física em contextos**. (1ª ed., Vol. 3). São Paulo: Editora do Brasil.

RAMALHO JUNIOR, Francisco; FERRARO, Nicolau Gilberto; SOARES, Paulo Antônio de Toledo. (2009). **Os Fundamentos da Física**. (10ª ed., Vol. 3). São Paulo: Moderna.

RIBEIRO DA LUZ, Antônio Máximo; ÁLVARES, Beatriz Alvarenga. (2013). **Física: Contexto e Aplicações**. (1ª ed., Vol. 3). São Paulo: scipione.

ROCHA, José Fernando M. (2002). **Origens e evolução das idéias da física**. Salvador: EDUFBA.

SEGRÈ, Emilio. (1987). **Dos raios X aos quarks**. Trad. de Wamberto H. Ferreira. Brasília:Universidade de Brasília.

SILVA, André Coelho da; ALMEIDA, Maria José Pereira Monteiro de. (2011). **Física quântica no ensino médio: o que dizem as pesquisas**. [Online] *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Vol. 28. [Citado em 08 de Julho de 2019]. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2011v28n3p624>.

SILVA, José Alves da; PINTO, Alexandre Custódio; LEITE, Cristina. (2000) **Projeto Escola e Cidadania**. [Online] São Paulo: Editora do Brasil. [Citado em 08 de Julho de 2019]. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4457536/mod_book/chapter/19475/textos/texto13_S7_EC05.pdf.

VALADARES, Eduardo de Campos. (2005). **APLICAÇÕES DA FÍSICA QUÂNTICA: DO TRANSISTOR À NANOTECNOLOGIA**. (1ª ed.). São Paulo: Livraria da Física.

VALADARES, Eduardo de Campos; MOREIRA, Alysson Magalhães. (1998). **ENSINANDO FÍSICA MODERNA NO SEGUNDO GRAU: EFEITO FOTOELÉTRICO, LASER E EMISSÃO DE CORPO NEGRO**. [Online] *Caderno Catarinense de Ensino de Física*. Vol. 15. [Citado em 08 de Julho de 2019]. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/6896/7584>.

YAMAMOTO, Kazuhito; FUKE, Luiz Felipe. (2010). **Física para o Ensino Médio**. (1ª ed., Vol. 3). São Paulo: Saraiva.