



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA- CCT
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

ANDRÉ ARAUJO SOUSA

**A FÍSICA MODERNA: UMA BREVE DISCUSSÃO DOS SEUS CONCEITOS
FUNDAMENTAIS**

**CAMPINA GRANDE-PB
2018**

ANDRÉ ARAUJO SOUSA

**A FÍSICA MODERNA: UMA BREVE DISCUSSÃO DOS SEUS CONCEITOS
FUNDAMENTAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção de título de graduado em licenciatura em Física, pelo Departamento de Física do centro de ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba.

Sob a orientação do Prof. Dr. Alex da Silva.

**CAMPINA GRANDE
2018**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S725f Sousa, André Araújo.
A Física Moderna [manuscrito] : uma breve discussão dos seus conceitos fundamentais / Andre Araujo Sousa. - 2018.
42 p. : il. colorido.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.
"Orientação : Prof. Dr. Alex da Silva, Coordenação do Curso de Física - CCT."

1. Física moderna. 2. Radiação. 3. Estrutura atômica.
21. ed. CDD 530

ANDRÉ ARAUJO SOUSA

**A FÍSICA MODERNA: UMA BREVE DISCUSSÃO DOS SEUS CONCEITOS
FUNDAMENTAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção de título de licenciatura Plena em Física, pelo Departamento de Física do centro de ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba.

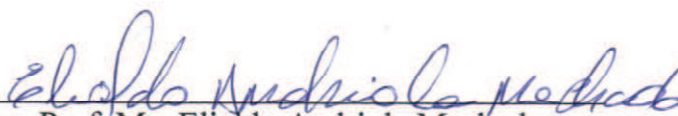
Sob a orientação do Prof. Dr. Alex da Silva.

Aprovada em: 20/06/2018.

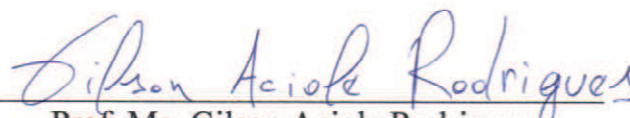
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. ALEX DA SILVA (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Elialdo Andriola Machado
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Gilson Aciole Rodrigues
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor de meu destino, meu guia, socorro presente em todas as horas.

Dedico a minha mãe, Joana Dos Santos que é o pilar de minha existência, fonte de amor inesgotável.

Agradeço ao meu pai, Francisco Martins e meus irmãos Giovanni Araujo e Eliane Araujo pelos momentos de felicidade durante toda minha caminhada.

Aos amigos de curso pelas conversas, debates e companheirismo durante toda jornada, agradeço em especial Thais Andrade e Mayra Lindsley por amizade e carinho.

Ao professor Dr. Alex da Silva pelas leituras sugeridas ao longo dessa orientação e pela dedicação.

Aos professores do Curso de Física da UEPB, que contribuíram ao longo dos anos, por meio das disciplinas e debates.

SUMÁRIO

8	
1	INTRODUÇÃO5
2	FÍSICA MODERNA: CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....6
2.1	A teoria clássica da radiação de cavidade6
2.1.1	Emissão e absorção de radiação 7
2.1.2	Radiação térmica 8
2.1.3	Leis de Wien 11
2.1.4	A teoria de Rayleigh-Jeans 14
2.1.5	A teoria de Planck..... 16
2.2	Modelo de Bohr para o Átomo19
2.2.1	Primeiros estudos sobre o átomo 19
2.2.2	Modelo de Thomson..... 21
2.2.3	O modelo nuclear de Rutherford 23
2.2.4	O modelo de Bohr..... 24
2.3	A física de Maxwell e a natureza da luz.....26
2.3.1	O trabalho de Maxwell 29
2.3.2	Dualidade da luz 30
2.3.3	Teoria clássica e quântica 31
2.4	Propriedades Ondulatórias das Partículas32
2.4.1	A hipótese de Broglie: Ondas de matéria 33
2.4.2	O princípio da incerteza de Heisenberg..... 35
2.4.3	Uma nova versão da física moderna (Erwin Schrödinger)..... 37
3	METODOLOGIA.....39
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....40
	ABSTRACT41
	REFERÊNCIAS.....42

A FÍSICA MODERNA: UMA BREVE DISCUSSÃO DOS SEUS CONCEITOS FUNDAMENTAIS

André Araújo Sousa

RESUMO

Este trabalho relata uma breve discussão de alguns conceitos fundamentais sobre a física moderna. Abordamos inicialmente a radiação térmica, onde tratamos do problema da emissão e absorção da radiação. A física de Planck, que conciliou a teoria com a experiência. Os modelos atômicos são abordados de forma detalhada para que haja uma melhor compreensão da estrutura atômica da matéria por parte do leitor. Discutimos também sobre o eletromagnetismo de Maxwell e sua importância para a teoria da natureza da luz. Por fim, não poderíamos deixar de falar sobre a física de Schrödinger, que deu início a uma nova Mecânica Quântica e as concepções da Física Moderna.

Palavras-Chave: Física Moderna. Radiação. Estrutura atômica.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da existência do mundo a Física tem proporcionado a possibilidade de solucionar problemas da humanidade. No entanto, devido a seu arranjo e sua complexidade essa ciência precisou se dividir e, uma dessas divisões foi caracterizada como Física Moderna, subdivisão que estuda o universo dos átomos e das partículas que compõem os átomos.

Contudo, observou-se em pesquisa sobre raios catódicos, que os átomos eram indivisíveis. Por conseguinte, outros modelos foram apresentados, a exemplo: além de Dalton, Thomson (conhecido como pudim de passas), o modelo atômico de Rutherford (conhecido como sistema planetário) e o modelo de Bohr.

Para maior análise temos o seguinte trecho, longo, mas necessário:

No primeiro quarto do século XX, foram apresentados novos resultados conflitantes a respeito da natureza da luz. Seria a luz onda ou partícula? Em meio a esse questionamento, físico Alemão Max Planck apresentou seu artigo sobre “a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal”, em 14 de dezembro de 1900. Essa data marca o início de uma revolução na Física, o surgimento da Física Moderna, que é a denominação dada ao conjunto de teorias surgidas no século XX, principiando a Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade e as alterações no entendimento científico de todas teorias posteriores. Niels Bohr propõe, em 1913, um novo modelo atômico, a partir de três postulados que permitiam a explicação de alguns fenômenos para o átomo de hidrogênio. Em 1925, Erwin Schrodinger lança

uma nova teoria baseada nas ideias de De Broglie: a mecânica ondulatória. O único obstáculo era a união da Física Quântica com a Astrofísica (SANTOS, 2014).

A partir disso, este trabalho visa uma breve discussão dos conceitos da Física Moderna, para tanto realizaremos uma revisão bibliográfica de livros acadêmicos, além de artigos, bem como sites na internet.

2 FÍSICA MODERNA: CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 A teoria clássica da radiação de cavidade

Foi o estudo da radiação térmica que emitida por corpos opacos que forneceu os primeiros indícios da natureza quântica da radiação. Quando uma radiação incide em um corpo opaco, parte é refletida e parte é absorvida. Os corpos de cor clara refletem a maior parte da radiação visível incidente, enquanto os corpos escuros absorvem a maior parte da radiação. A radiação absorvida pelo corpo aumenta a energia cinética dos átomos que a constituem, fazendo-os oscilarem mais vigorosamente em torno da posição de equilíbrio. Como a temperatura de um corpo é determinada pela energia cinética média dos átomos, a absorção de radiação faz a temperatura do corpo aumentar. Acontece que os átomos contêm partículas carregadas (os elétrons) que são aceleradas pelas oscilações: assim, de acordo com a teoria eletromagnética, os átomos emitem radiação, o que reduz a energia cinética dos átomos e, portanto diminui a temperatura. Quando a taxa de absorção é igual a taxa de emissão, a temperatura permanece constante e dizemos que o corpo se encontra em equilíbrio térmico com o ambiente. Assim, um material que é um bom absorvedor de radiação é também um bom emissor.

A radiação eletromagnética emitida nessas circunstâncias é chamada radiação térmica. Em temperaturas moderadas (abaixo de 600°C), a radiação térmica emitida pelos corpos não é visível; a maior parte da energia está concentrada em comprimentos de onda muito maiores que os da luz visível. Quando um corpo é aquecido, a quantidade de radiação térmica emitida aumenta e a energia irradiada se estende a comprimentos de onda cada vez menores. Entre 600 e 700°C , existe energia suficiente no espectro visível para que o corpo comece a brilhar

com luz própria vermelho-escura. Em temperaturas mais elevadas, o objeto brilha com luz vermelho-clara ou mesmo branca (TIPLER, 2001).

2.1.1 Emissão e absorção de radiação

Hoje sabemos que calor é energia e apresenta-se de varias maneiras, como por exemplo: uma pedra exposta ao sol; quando atritamos dois corpos; o fogo e etc., (GIBERT, 1962). Todo corpo que possui temperatura, qualquer que seja a sua superfície, emite radiação térmica devido ao movimento de cargas elétricas perto da superfície por meio da agitação térmica. Em uma única aceleração, ocorrendo em certo período de tempo, a maior parte da radiação emitida tem frequência aproximadamente igual ao inverso do período e, correspondentemente, um comprimento de onda c vezes o período, onde, a maior parte das emissões se faz em um amplo espectro de comprimento de onda. Logo, a taxa de emissão de energia presente em todo espectro cresce na medida em que a temperatura da superfície aumenta (maior agitação) devido à área da superfície emissora. Em 1879, Stefan apresenta uma relação empírica

$$I_T = \sigma e T^4 \quad (1)$$

Onde, (I_T) é a energia total emitida por segundo em todas as frequências por cm^2 de uma superfície à temperatura absoluta (T); (e) é aqui uma constante com valores de 0 a 1, o poder da emissão total, que depende da natureza da superfície emissora; (σ) é a constante Stefan-Boltzman, [$\sigma = 0,567 \times 10^{-4} \text{ erg-cm}^{-2}\text{-}^\circ\text{K}^{-4}\text{s}^{-1}$]. A energia como radiação térmica é suprimida pela agitação térmica (EISBERG, 1961).

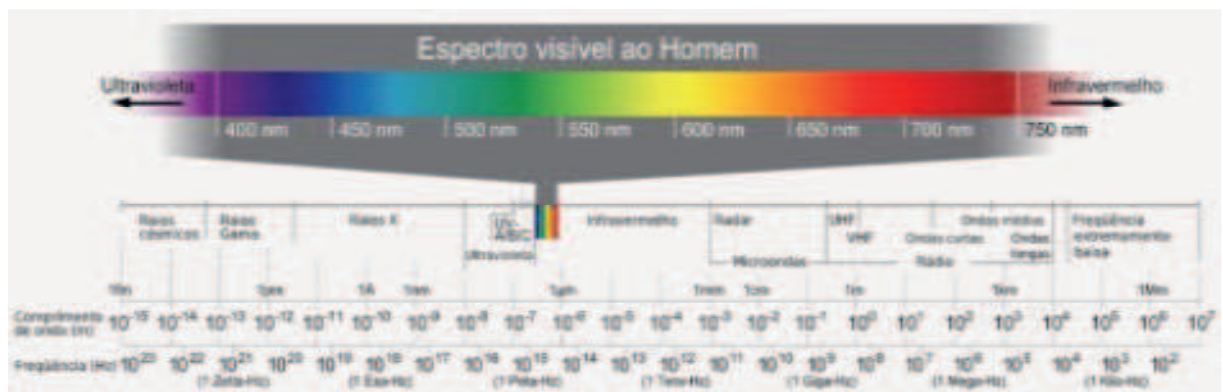
Parte da absorção da radiação em uma superfície é transformada em energia de agitação térmica. Com isso, é interessante saber a eficiência de uma superfície como emissora de radiação térmica, mediada pela grandeza (e). A eficiência é medida por uma constante a , denominada poder de absorção, definida como o quociente de energia da radiação térmica total, absorvida pela superfície, pela energia térmica total sobre ela incidente. Em 1895, Kirchhoff propõe o teorema de relação entre (e) e (a),

$$e = a \quad (2)$$

Essa relação foi verificada experimentalmente através de um argumento termodinâmico. Essa radiação consiste em ondas eletromagnéticas (ondas de infravermelho) com exatamente a mesma natureza que a luz visível, mas com maior comprimento de onda (AMORIN, 2011).

Em baixas temperaturas a maior taxa de emissão esta na faixa do infravermelho. De inicio a luz vermelha, passando, a seguir, para a amarela, a verde, a azul e, em altas temperaturas, a luz branca, chegando à região ultravioleta do espectro eletromagnético (Figura 1) (AMORIN, 2011).

Figura 1: Espectro visível ao homem



Fonte: AMORIN, 2011

2.1.2 Radiação térmica

No final do século XIX, foram divulgados vários resultados de pesquisas referentes ao aquecimento de corpos que emitiam luz.

Com a finalidade de estudar a luz emitida pelos corpos quentes, foi proposto um modelo no qual a ideia era realizar os cálculos apenas da radiação produzida pela agitação térmica do corpo. Tal corpo deveria absorver toda radiação que chegava até ele, não podendo refleti-la. Isto é, $a=1$. Dessa forma, o corpo teria que ser totalmente negro, daí o nome do modelo: radiação do corpo negro (GIBERT, 1962).

Por exemplo, o forno de uma indústria siderúrgica ou o sol produz radiação através da agitação térmica. Se observarmos o carvão em brasa, na verdade veremos a radiação de um corpo negro de um corpo a uma temperatura muito alta.

Ao olharmos para o passado, levando em conta o que conhecemos hoje, podemos afirmar que o estudo da radiação do corpo negro marca o surgimento da Mecânica Quântica (GIBERT, 1962).

Então, em equilíbrio termodinâmico (em temperatura constante), um corpo negro ideal irradia energia na mesma taxa que absorve, sendo essa uma das propriedades que o tornaram uma fonte ideal de radiação térmica. Corpos negros não existem na natureza, visto que nenhum objeto tem absorção e emissão perfeitas. A emissividade de um corpo é definida pela relação entre sua radiância e a do corpo negro.

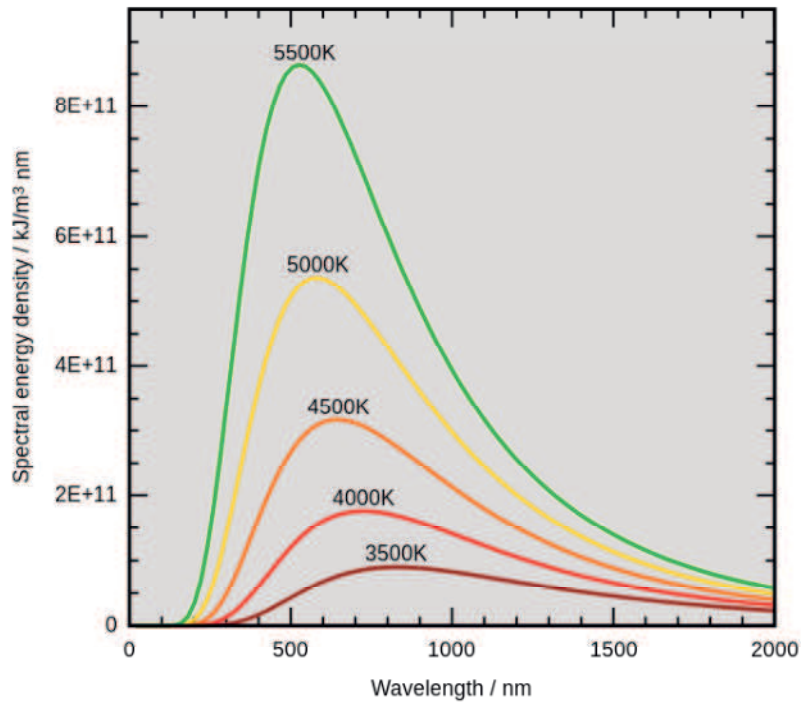
Aplicando a condição $e=1$ à equação 1 supracitada, vemos que a energia radiante emitida por cm^2 é a mesma para todos os corpos negros que estão na mesma temperatura. Isto sugere algumas propriedades térmicas, como a distribuição espectral da radiação depende apenas da temperatura e não da natureza específica (EISBERG, 1961).

A distribuição da radiação do corpo negro é especificada pela quantidade de $I_T(\lambda)$, que é assim definida pela $I_T(\lambda)d\lambda$, a qual é igual a energia emitida por segundo, em radiação de comprimento de onda no intervalo de $[\lambda \text{ a } \lambda + d\lambda]$, de 1 cm^2 de uma superfície na temperatura (T).

Os físicos Lummer e Pringsheim (1899) fizeram as primeiras medições precisas de presente quantidade. As medições foram feitas com um instrumento essencialmente similar ao utilizado em espectrômetros de prisma, de medição óptica de espectros, exceto os materiais especiais que tiveram de ser utilizados a fim de ter as lentes, prismas, etc., transparentes a radiação de onda longa térmica (EISBERG, 1961).

A dependência de $I_T(\lambda)$ em (λ) e (T) é indicado na figura 2. A seta da abcissa indica o comprimento de onda em que o olho tem sua resposta máxima-luz verde (EISBERG, 1961).

Figura 2: distribuição espectral de um corpo irradiando a altas temperaturas



FONTE: https://pt.wikipedia.org/wiki/Corpo_negro#/media/File:Wiens_law.svg

Observamos que, para qualquer (λ) fixo, $I_T(\lambda)$ aumenta com a temperatura (T). A integral de $I_T(\lambda)$ sobre todo o (λ), é igual a quantidade de I_T previamente definido. Esta integral, é igual à área sob as curvas de crescimento, faz com a quarta potencia de (T), de acordo com a equação 1. A figura 2 também mostra que as mudanças na direção do espectro de comprimentos de onda é mais curto na medida em que aumenta T . Uma inspeção quantitativa da figura irá demonstrar a validade da equação:

$$\lambda_{\text{máx}} \propto \frac{1}{T} \quad (3)$$

Onde $\lambda_{\text{máx}}$ é o λ em que $I_T(\lambda)$ tem o seu valor máximo para um determinado T . Todos estes resultados estão de acordo com a experiência cotidiana de que os corpos emitem mais calor na medida em que se aumenta a sua temperatura. E que, com a temperatura aumentando, a sua “cor” muda de vermelho escuro para azul branco. Isto é, cada vez mais a energia radiante é emitida na região de curto comprimento de onda (EISBERG, 1961).

Agora, considere um objeto que contém uma cavidade que é conectada ao meio exterior por um pequeno orifício. A radiação incidente sobre a cavidade, pelo lado de fora,

entra no orifício e é refletido para frente e para trás pelas paredes da cavidade, sendo absorvida sobre estas paredes. Se a área do orifício é muito pequena em comparação a área da superfície interna da cavidade, uma insignificante quantidade de radiação incidente será refletida de volta para o orifício. Então, toda radiação incidente sobre a cavidade é absorvida. Pelo orifício, ($a=1$) e, portanto, o orifício deve ter as propriedades da superfície de um corpo negro (EISBERG, 1961).

Suponha-se que as paredes da cavidade são uniformemente aquecidas a uma temperatura T . as paredes irão emitir radiação térmica que irá preencher a cavidade. A pequena fração da radiação incidente sobre o interior do orifício vai passar por este. Assim, o orifício vai atuar como um emissor de radiação térmica. A cavidade deverá ter as propriedades da superfície de um corpo negro, e a radiação na cavidade emitida pelo orifício deve ter o espectro de um corpo negro. Mas, como a cavidade também deve ter um espectro de um corpo negro. Na verdade, ele vai ter um espectro de corpo negro característico da temperatura T das paredes desde que esta seja a única temperatura definida para o sistema.

O espectro emitido pelo orifício na cavidade é especificado em termos de fluxo de energia $I_T(\lambda)$, mas é conveniente para especificar o espectro da radiação no interior da cavidade em termos de uma densidade energética $\rho_T(\lambda)$, que é definida de tal modo que a $\rho_T(\lambda)d\lambda$ da energia é a contida em 1 cm^3 da cavidade em um intervalo de comprimento de onda para $\lambda + d\lambda$. Ele é resultado da discussão acima que a $\rho_T(\lambda)$ é proporcional à $I_T(\lambda)$, com uma constante de proporcionalidade, que não dependem de λ ou de T (EISEBERG, 1961).

2.1.3 Leis de Wien

Em 1804, Rumford apresenta uma nova realidade para transmissão de calor, sem qualquer meio intermediário, usando um balão. Onde, no centro oeste, colocou um termômetro. Fez o vazio do balão e, mantendo-o fechado, colocou em água quente verificando então que o termômetro indicava uma rápida subida de temperatura. Com isso, Rumford consegue provar que o calor se transmite no vácuo e levanta nova discussão sobre o problema do arrefecimento. Contudo, não consegue derrubar a hipótese do calórico, que é abandonada depois com a descoberta do primeiro princípio da termodinâmica (GIBERT, 1962).

Já em 1792, Prevost dá uma contribuição de importante significado da seguinte lei experimental (aproximada): o poder emissivo é igual ao poder absorvente. Em 1859 Kirchhoff estabeleceu uma nova lei: a razão (e / a) entre o poder emissivo (e) e o poder absorvente (a) de um corpo é função do comprimento de onda e da temperatura que completou, em 1882, com outra lei: a razão (e / a) entre o poder emissivo e o poder absorvente é a mesma pra todos os corpos a mesma temperatura. Deve-se ainda a Kirchhoff, nesta mesma data o conceito de *corpo negro*, (GIBERT, 1962).

Então em 1894, W. Wien (1894-1928) descobriu duas importantes características da radiação térmica relacionadas com a dependência entre a composição espectral e a temperatura, as quais são conhecidas por leis de Wien:

1. Lei: quando a temperatura do corpo negro varia, o comprimento de onda para o qual o poder emissivo é máximo varia na razão inversa da temperatura absoluta, ou seja,

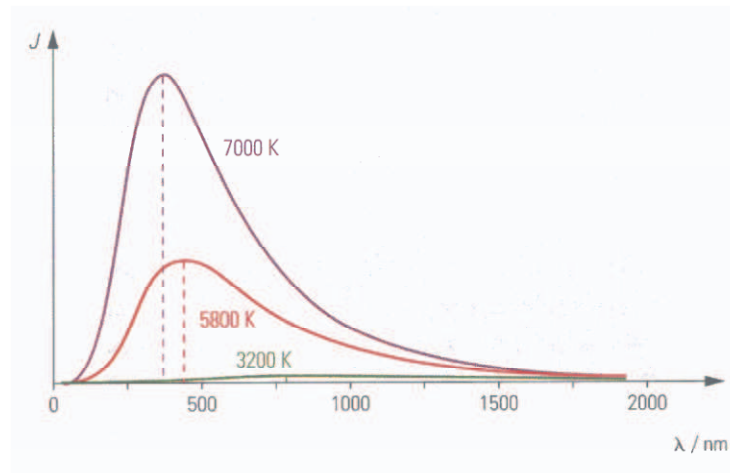
$$\lambda_m = b \cdot \frac{1}{T} \quad (4)$$

2. Lei: o poder emissivo máximo do corpo negro é proporcional a 5ª potência da temperatura absoluta, isto é

$$E_m = B \cdot T^5 \quad (5)$$

Logo, as aulas leis de Wien descrevem um interessante fenômeno designado deslocamento espectral, cujo significado qualitativo se vê imediatamente na figura 3. Onde observamos em particular, como varia, com o comprimento de onde (para cada temperatura), o poder emissivo (GIBERT, 1962).

Figura 3: Leis de Wien: o deslocamento espectral.



Fonte: http://profs.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Wien/Lei_Wien.html

A figura 3 mostra as curvas que representam o poder emissivo E em função do comprimento de onda λ , para diversas temperaturas. São curvas experimentais obtidas com espectros produzidos por um prisma de fluorina (GIBERT, 1962).

Qual o seu significado? Para saber, faz-se necessário estabelecer uma teoria que permita restituir aquelas curvas. Mas isto não é nada fácil, porque os raciocínios da Termodinâmica não nos permitem afirmar mais do que o que se exprime na seguinte relação em que $f(\lambda T)$ é uma função desconhecida:

$$E = f(\lambda T) \cdot T^2 \quad (6)$$

Wien (1893) foi capaz de derivar uma forma geral funcional para a distribuição espectral de radiação de corpo negro conhecida como Lei de Wien:

$$\rho_T(\lambda) = \frac{f(\lambda T)}{\lambda^5} \quad (7)$$

A partir de 1893, os físicos procuraram estabelecer um esquema teórico d emissão da radiação que conduzisse à equação 6, de acordo com os resultados experimentais (GIBERT, 1962). Deve-se ainda a Wien a formulação e o desenvolvimento de uma hipótese extremamente interessante, de certo modo, síntese feliz dos conhecimentos concretos da época, tais como o caráter ondulatório da radiação e a hipótese molecular, a qual consiste em admitir que a radiação de comprimento de onda λ (frequência $f = \frac{c}{\lambda}$) é proveniente de

oscilações moleculares vibrando com frequência f , sendo a intensidade da radiação de comprimento de onda λ proporcional ao número de osciladores com frequência f . Com este raciocínio Wien encontra a equação

$$F(\lambda T) = C_1 (\lambda T)^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (8)$$

Em 1900, Rayleigh (1842-1919) introduz a hipótese de que os osciladores obedecem ao princípio da equipartição da energia de Maxwell considerando que eles têm dois graus de liberdade e, portanto, a energia (kT). Estabelece, assim, a seguinte equação:

$$f(\lambda T) = C_1 (\lambda T)^{-5} \cdot \lambda T \quad (9)$$

É fácil verificar que nenhuma destas equações conduz a curvas do tipo das da figura 3. Com efeito, a equação de Wien não é verificada para os grandes valores do produto (λT) (grande comprimento de onda e/ou elevada temperatura). Por outro lado, a equação de Rayleigh não está de acordo com a experiência quando $[\lambda \rightarrow 0]$, visto que $f(\lambda T)$ tende então para (∞ - infinito) e não para zero como indica a experiência (GIBERT, 1962).

2.1.4 A teoria de Rayleigh-Jeans

Assim como já foi mencionado, o fenômeno da radiação térmica desempenhou um importante papel na história da física, pois foi na tentativa de descrevê-la teoricamente que Max Planck introduziu sua famosa constante, que tornou-se um “marco” de uma nova física capaz de solucionar problemas que a física clássica não tinha mais êxito. A teoria de Rayleigh-Jeans consiste em mostrar bases mais sólidas da origem do corpo negro sem se deter a detalhar tal origem. Rayleigh-Jeans fizeram algumas considerações e testes para enfim deduzir a distribuição espectral da radiação do corpo negro.

A princípio foi considerada uma parede com cavidades metálicas a temperatura T , onde as paredes emitiam radiação térmica. Assim no estado estacionário atingido na situação de equilíbrio entre a radiação e as paredes, a radiação eletromagnética no interior da cavidade mantém-se sob a forma de ondas estacionárias, com nodos nas paredes metálicas. Com isso, Rayleigh e Jeans calcularam o número de ondas estacionárias com nodos nas superfícies da

cavidade. Logo após admitiram que a cavidade metálica tivesse forma de um cubo e arestas de tamanho a .

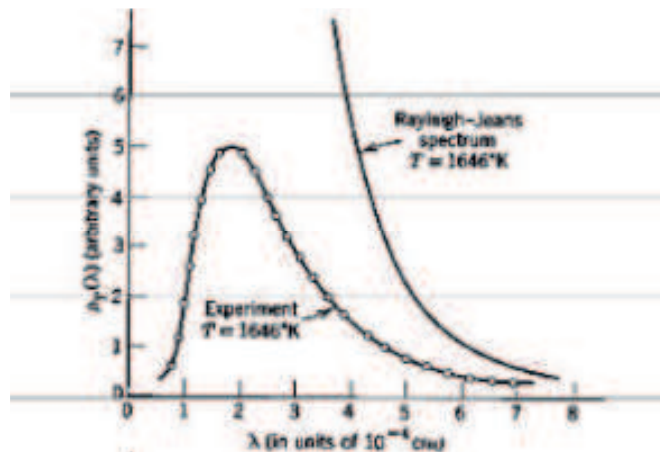
Após a discussão sobre o numero de ondas estacionarias com nodos na superfície de cavidade, agora o problema é contar o numero de frequências permitidas no lugar dos comprimentos de onda correspondente em um dado intervalo. O próximo passo para a dedução é o calculo da energia média contida em cada onda estacionaria. Em resumo, fisicamente a função $P(\varepsilon)$ especifica a probabilidade de se achar uma entidade entre um estado de energia ε e $d\varepsilon$, para um sistema contendo um grande número de entidades de mesmo tipo em equilíbrio térmico. Tal probabilidade determina a energia média das entidades, dada por:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon p(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^{\infty} p(\varepsilon) d\varepsilon} \quad (10)$$

Onde o numerador é a probabilidade de encontrar uma entidade com o correspondente valor da energia. O denominador é a probabilidade de encontrar uma entidade de energia qualquer. Manipulando a equação acima chegaremos à expressão da distribuição de probabilidade de Boltzmann. Comparando tais resultados com a experiência encontramos a distribuição espectral de Rayleigh-Jeans para a radiação do corpo negro

$$\rho_T \lambda d\lambda = \frac{8\pi k}{\lambda^5} \lambda T d\lambda \quad (11)$$

Figura 4: O espectro de Rayleigh-Jeans



contemporanea-modulo-6?part=2

Contudo, o espectro de Rayleigh-Jeans está em completo desacordo com os dados experimentais, concluindo então, o seu total fracasso. Este problema foi resolvido por Planck em 1901 que relata “a energia total de qualquer entidade cuja única “coordenada” execute oscilações harmônicas simples (isto é, seja expressa por uma função senoidal no tempo), pode assumir tão-somente valores que satisfazem a relação: $\varepsilon = nh\nu$, $n = 0,1,2,3 \dots$ onde ν é frequência de oscilação e h uma constante fundamental”. Portanto, o postulado de Planck consistiu em achar, por ensaio ou erro, uma equação empírica que concordasse com o espectro experimental. O sucesso de Planck ao conduzir a um espectro teórico, para o corpo negro está de acordo com a experiência assim chegando a seguinte expressão, da distribuição espectral do corpo negro:

$$\rho_T \lambda \, d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1} d\lambda \quad (12)$$

2.1.5 A teoria de Planck

Para tentar conciliar a teoria com experiência, Planck foi, então, levado a elaborar uma hipótese extremamente fértil que vamos tentar apresentar de um modo simples (GIBERT, 1962). Se os osciladores obedecem ao princípio da equipartição da energia, então o seu conjunto também pode ser tratado como um sistema termodinâmico, obedecendo em particular ao princípio da entropia segundo a definição de Boltzmann, ou seja,

$$S = k \cdot \log W \quad (13)$$

havendo, pois, que determinar a probabilidade do estado considerando aqui (a distribuição por n osciladores de uma energia total U). Imaginemos que cada oscilador recebe uma quantidade de energia (ΔU), que vamos supor ser uma quantidade discreta para facilitar o cálculo segundo o esquema de Boltzmann, ou seja, vamos supor que $[U = m \cdot \Delta U]$ admitindo, pois que a energia total U se distribui por m quantidades de energia (ΔU). Por outro representamos por u a energia média dos osciladores de frequência f . Assim teremos

$$n = \frac{U}{u} \quad \text{e} \quad m = \frac{U}{\Delta U} \quad (14)$$

Afinal, o que pretendemos é calcular (u) em função da temperatura T (GILBERT, 1962). De acordo com a teoria clássica, deveremos ver o que se sucede quando admitimos que (ΔU) pode ser tão pequeno quanto se queira, ou seja, deveremos procurar o valor de (u) quando se faz tender (ΔU) para o limite zero (GILBERT, 1962). Utilizando a equação (13), podemos dizer que a distribuição das m pequenas porções de energia ΔU pelos n osciladores tem uma probabilidade w , dada por

$$W = \frac{(n+m)!}{n!m!} \quad (15)$$

utilizando a equação de Stirling, podemos então escrever

$$\begin{aligned} \log w &= \log(n+m)! - \log n! - \log m! \\ &= (n+m) [\log(n+m) - 1] - n(\log n - 1) - m(\log m - 1) \\ &= (n+m) \log(n+m) - n \log n - m \log m \\ &= n \left[\left(1 + \frac{m}{n}\right) \log \left(1 + \frac{m}{n}\right) - \frac{m}{n} \log \frac{m}{n} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

A partir dos valores de (m) e (n) podemos escrever,

$$\text{Log } w = n \left[\left(1 + \frac{U}{n\Delta U}\right) \log \left(1 + \frac{U}{n\Delta U}\right) - \frac{U}{n\Delta U} \log \frac{U}{n\Delta U} \right] \quad (17)$$

Então, a energia de um sistema pode escrever-se $[dU = Tds]$ e a partir da equação (1.10), resulta em $[dU = kT d(\log w)]$ onde se obtém

$$\frac{1}{kT} = \frac{d(\log w)}{dU} \quad (18)$$

Utilizando a equação (1.13), podemos escrever $\frac{U}{n\Delta U} = A$,

$$\frac{1}{kT} = \frac{d(\log w)}{dU}$$

$$\begin{aligned}
&= n \left[(1+A) \frac{1}{1+A} + \frac{1}{n\Delta U} \log 1 + A - \frac{1}{n\Delta U} \log A - A \frac{1}{A} \right] \quad (19) \\
&= n \left[1 + \frac{1}{n\Delta U} \log (1+A) - \frac{1}{n\Delta U} \log A - 1 \right] \\
&= \frac{1}{\Delta U} [\log (1+A) - \log A]
\end{aligned}$$

Podemos deduzir que,

$$e^{\frac{\Delta U}{kT}} = (1+A) : A \quad (20)$$

Pretendemos exprimir a energia media (u) em função da temperatura (T).

$$U = U : n \text{ e } A = \frac{1}{n\Delta U}$$

Substituindo na equação (19), temos:

$$e^{\frac{\Delta U}{kT}} = \left(1 + \frac{1}{n\Delta U} \right) : \frac{1}{n\Delta U} = \frac{\Delta U}{u} + 1 \quad (21)$$

ou seja

$$u = \frac{\Delta U}{e^{\frac{\Delta U}{kT}} - 1} \quad (22)$$

Agora, como observamos pontualmente, temos de introduzir neste calculo a condição de $[\Delta U]$ pode ser tão pequeno quanto se queira, temos que calcular

$$\lim_{\Delta U \rightarrow 0} u.$$

Se substituirmos $[\Delta U = 0]$ na equação (22), obtém uma indeterminação. Pela regra de L'Hôpital, podemos substituir os dois termos da fração pelas respectivas derivadas (em relação a $[\Delta U]$), logo

$$\lim_{\Delta U=0} u = \lim_{\Delta U=0} u \frac{\frac{d(\Delta U)}{d\Delta U}}{\frac{d(e^{kT}-1)}{dT}} = \frac{1}{kT} = KT \quad (23)$$

Chegamos assim ao valor admitido por Rayleigh como mera aplicação do princípio da equipartição da energia (GIBERT, 1962).

Em 1900, Planck emitiu ousadamente a hipótese de que as quantidades de energia muito pequenas, definidas apenas para tirar partido da teoria de Boltzmann, deviam ser conservadas na equação (21) embora por razões incompreensíveis, ele reportou a uma limitação ou indeterminação de ordem probabilísticas, recusando-se a aceitar uma realidade física mais profunda (GIBERT, 1962). Então, em 1911, numa conferência, Planck afirmava: “para a probabilidade termodinâmica existem certas regiões elementares absolutamente determinadas- e é assim que eu gostaria de resumir o conteúdo próprio do que se chamaram hipótese dos quanta... cuja significação física profunda devemos procurar” (GIBERT, 1962). Contudo, verifica-se uma concordância perfeita da formula de Planck com as curvas experimentais quando o “quantum” (ΔU) tinha o valor $\Delta U=hf$, em que f é a frequência da radiação e h a constante de Planck, cujo valor é $H=6,624 \cdot 10^{-34}$ Joules x segundo, obtendo-se a equação de Planck

$$u = \frac{hf}{e^{kT}-1} \quad (24)$$

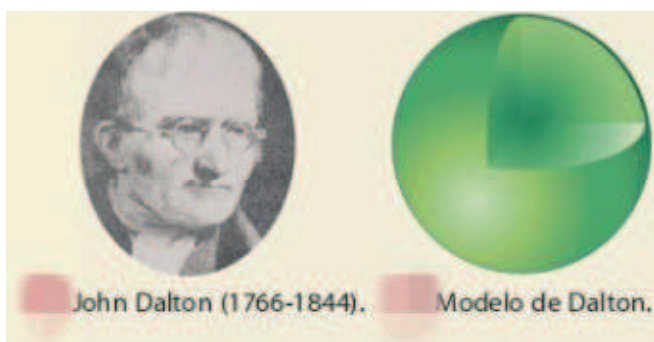
Ao contrario do que Planck queria pensar, a hipótese dos quanta trazia consigo uma espantosa boa nova, a do mundo quântico, denso de personagens extraordinários, ainda hoje tão misteriosos (GIBERT, 1962). Em 1911, no congresso de Solvay, Brillouin concluía a discussão do relatório de Einstein, sobre os calores específicos, comentando: “parece agora certo que será necessário introduzir novas concepções... uma descontinuidade.... da qual não fazíamos a mais pequena ideia há alguns anos”.

2.2 Modelo Bohr para o Átomo

2.2.1 Primeiros estudos sobre o átomo

No final do século XVIII, havia o que se poderia designar por uma presunção de conhecimento do que são átomos. Mas, na verdade, pouco se tinha adiantado relativamente à sua função especulativa nas tentativas de explicação da matéria. Por exemplo, no seu celebre “Dictionnaire Philosophique”, Voltaire escrevia nada menos que três páginas sobre átomos. E concretamente afirmava: A palavra átomo significa repartido, sem partes (GIBERT,1962). Mas, muito antes, o filósofo grego Demócrito (400 a.C.), sugeriu que a matéria era feita de minúsculas partículas indivisíveis e postulou que todas as variedades de matéria resultam da combinação de átomos de quatro elementos: terra, água, ar e fogo. A sua ideia não teve sustentação, pois se baseava em lógica e intuição. Assim, o expressivo filósofo Aristóteles derruba-o com o argumento de matéria continua (GIBERT, 1962). A ideia de Aristóteles permaneceu até o século XVII, quando experiências demonstraram que o comportamento das substâncias era inconsistente com a ideia de matéria continua (GIBERT, 1962). John Dalton, em 1803, propôs uma teoria que explicava as leis da conservação de massa e da composição definida: como Teoria Atômica de Dalton.

Figura 5: O modelo de Dalton



Fonte: http://www.notapositiva.com/old/pt/trbestbs/fisica/modelo_atom_d.htm

Essa teoria foi baseada em diversos experimentos e apontou as seguintes conclusões:

1. Toda matéria é formada de partículas fundamentais, os átomos.
2. Os átomos não podem ser criados e nem destruídos, eles são permanentes e indivisíveis.
3. Um composto químico é formado pela combinação de átomos de dois ou mais elementos em uma razão fixa.

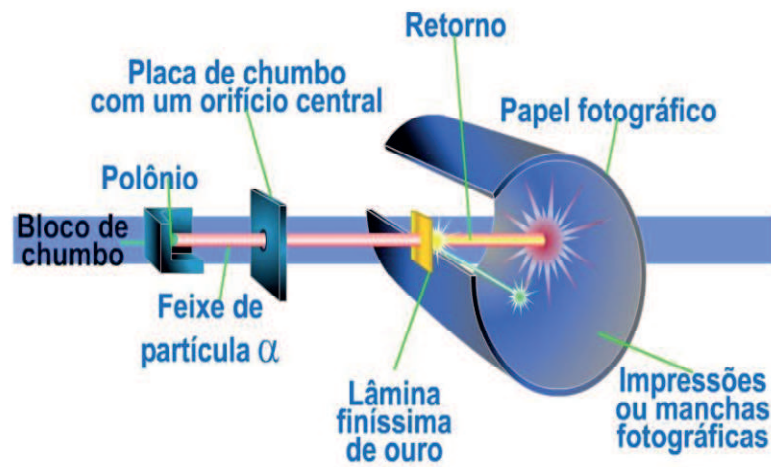
4. Os átomos de um mesmo elemento são idênticos em todos os aspectos, já os átomos de diferentes elementos possuem propriedades diferentes. Os átomos caracterizam os elementos.
5. Quando os átomos se combinam para formar um composto, quando se separam ou quando acontece um rearranjo são indícios de uma transformação química.

Dalton acreditava que o átomo era uma esfera maciça, homogênea, indestrutível, indivisível e de carga elétrica neutra. Se fizermos uma comparação, os átomos seriam semelhantes a bolinhas de gude: maciças e esféricas (EISBERG, 1961).

2.2.2 Modelo de Thomson

Em 1887, o físico inglês J.J Thomson decidiu medir a razão carga/massa dos raios catódicos para identificar se os raios catódicos eram íons ou se eram uma partícula carregada universal. Thomson, em sua famosa experiência, utilizando um tubo de raios catódicos para aplicar simultaneamente campos elétricos e magnéticos aos raios, comprovou que os raios catódicos se comportavam como partículas negativamente carregadas. Equilibrando o efeito do campo elétrico e do magnético, e com as leis da eletricidade e do magnetismo, Thomson pôde calcular a razão entre a carga e a massa de partículas no feixe. Assim, concluiu que os raios catódicos eram constituídos por partículas carregadas e que essas partículas (depois chamadas de elétrons) eram universais, ou seja, era a mesma, qualquer que fosse a substância investigada (GIBERT, 1962).

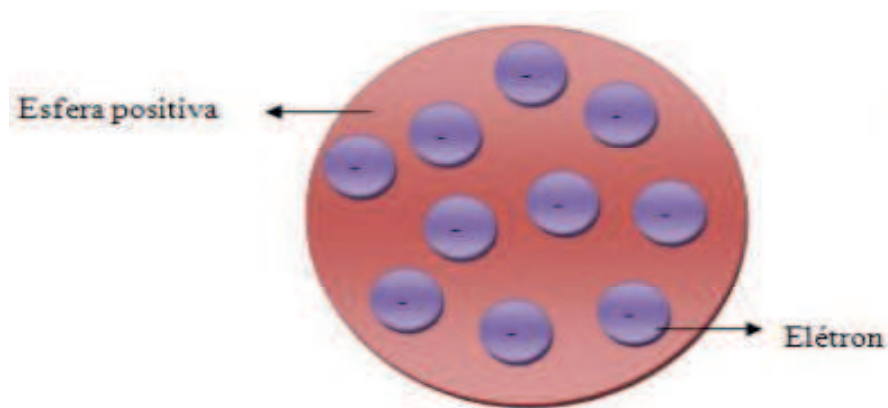
Figura 6: Experiência Thomson



Fonte: <http://espetacularquimica.blogspot.com/2013/02/modelo-atomico-de-rutherford.html>

Na ausência de informações sobre a maneira pela qual as cargas positivas e negativas eram distribuídas num átomo, Thomson propôs um modelo simples.

Figura 7: O modelo atômico de Thomson



Fonte: <https://www.colegioweb.com.br/complementos-de-atomistica/modelos-atomicos.html>

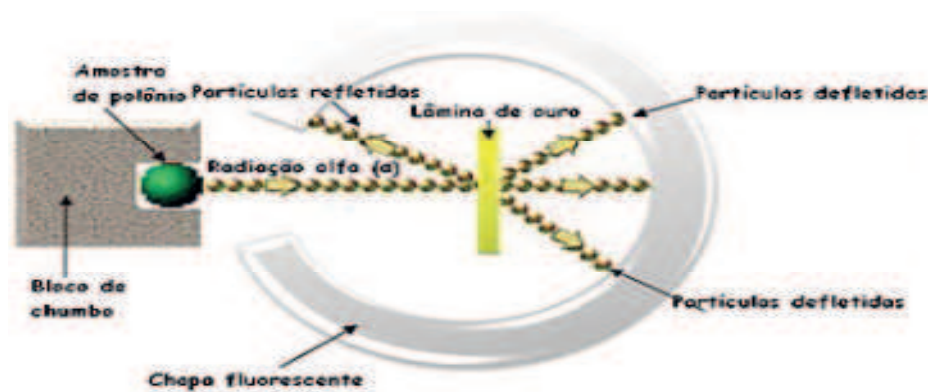
Em 1904, ele propôs um modelo atômico, mais conhecido como “pudim de passas”. Onde admitia que o átomo fosse uma esfera com carga positiva distribuída de forma uniforme, não tendo um caráter de partícula. Logo, os elétrons ficavam dentro dessa “massa positiva” e permeável (GIBERT, 1962).

2.2.3 O modelo nuclear de Rutherford

Em 1911, o modelo atômico de Thomson passa a cair em descrédito, depois de uma série de experimentos realizados por Rutherford, a partir da análise de experiência envolvendo o espalhamento de partículas alfas por átomos.

Após Röntgen ter feito sua espantosa descoberta, em 1895, Rutherford e Thomson passaram a trabalhar juntos para medir a ionização pelos raios X. Após a descoberta da radioatividade, em 1897, aplicou sua experiência na medida da ionização produzida pelo urânio e percebeu que havia dois tipos de radiações emitidas do urânio: chamou-as de alfa e beta. Rutherford, junto com Curie, Becquerel estavam estudando as propriedades das radiações emitidas por substâncias radioativas e chegaram à conclusão de que os raios beta eram iguais aos raios catódicos, isto é, elétrons (GIBERT, 1962).

Figura 8: O desvio sofrido por partículas alfa ao se chocar com o átomo imaginado por Thomson

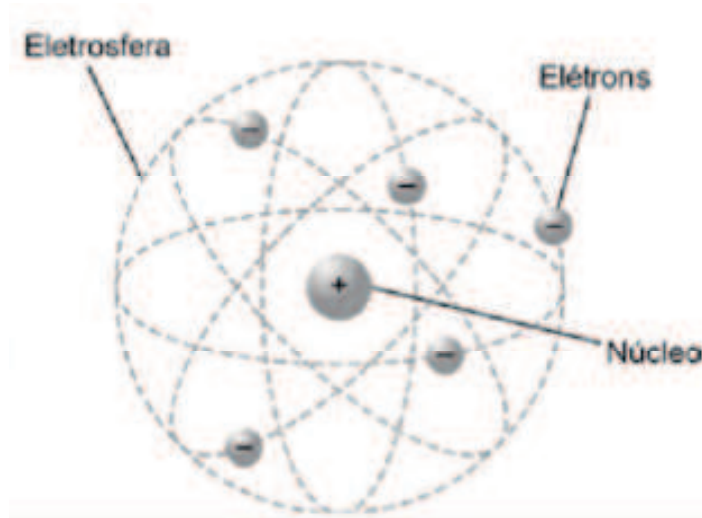


Fonte: <https://manualdaquimica.uol.com.br/quimica-geral/modelo-atomico-rutherford.htm>

A figura (8) mostra o aparelho utilizado por Rutherford para provar que as partículas alfa seriam simplesmente átomos de hélio duplamente ionizados: um tubo de vidro com paredes muito finas contendo uma substância radioativa que era colocada no interior de um compartimento de vidro. Algumas partículas alfa emitidas pela substância radioativa era capazes de penetrar no tubo de vidro. Passado algum tempo, testes revelavam que o conteúdo do compartimento externo continha uma quantidade de gás hélio comum. Essa descoberta confirmou o argumento de que partículas alfa são átomos de hélio duplamente ionizados, que podem capturar dois elétrons e se tornar átomos nêutrons de hélio durante, ou após, a passagem através de um tubo de vidro de paredes finas (EISERG, 1961). O modelo atômico

de Rutherford ficou conhecido como “sistema planetário”, pois havia semelhança com o movimento em torno do sol, os elétrons girando em torno do núcleo.

Figura 9: O modelo planetário

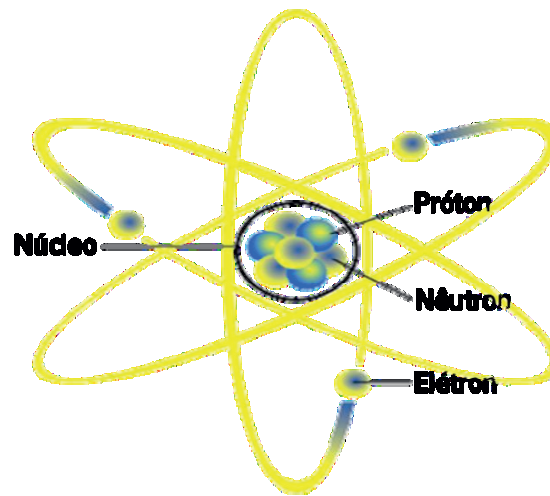


Fonte: <http://quimicafacil.freeiz.com/index.php/2017/04/22/modelo-de-rutherford/>

2.2.4 O modelo de Bohr

Com o trabalho de Rutherford, em 1913, o físico Dinamarquês Niels Bohr propôs um modelo para o átomo de hidrogênio que combinada com os trabalhos de Planck e Einstein. O modelo Rutherford atribuía uma carga e uma massa ao núcleo, mas nada dizia a respeito da carga e da massa dos elétrons. Bohr, que estivera trabalhando no laboratório de Rutherford na época dos experimentos de Geiger e Marsden, formulou a hipótese de que o elétron do átomo de hidrogênio girava em torno do núcleo, atraído pela carga positiva (EISBERG, 1961). O problema deste modelo, porém, era que a física clássica determinava que o átomo não pudesse existir com esta organização. Conforme as teorias da época, o elétron carregado em movimento no campo elétrico positivo do núcleo iria perder energia ao ponto de se chocar com o núcleo.

Figura 10: Modelo de Bohr



Fonte: <http://zeus.qui.ufmg.br/~qgeral/?P=qwyitvwhn&paged=2>

O principal objetivo de Bohr era explicar a paradoxal estabilidade do átomo de Rutherford. Para resolver a contradição entre as leis da física clássica e o problema da estabilidade dos átomos, Bohr adotou a ideia de que o elétron do átomo de hidrogênio só poderia ocupar certas orbitas ou níveis de energia nos quais ele era estável. A energia do elétron no átomo estaria então “quantizada”. Com isso, Bohr introduziu a ideia de quantum de Planck no modelo atômico de Rutherford (EISBERG, 1961). Bohr, então adotou os seguintes postulados:

1. Postulados dos níveis de energia: an um átomo, um elétron só pode ter certos valores da energia, que são chamados níveis de energia. Logo, o átomo só pode ter certos valores da energia total. Então a partir dessas considerações, a seguinte fórmula para os níveis de energia do elétron no átomo de hidrogênio.

$$E = -\frac{R_H}{n^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (\text{para o átomo de H}) \quad (25)$$

onde R_H é uma constante (unidades de energia) valendo $2,179 \times 10^{-18} \text{J}$. Os valores possíveis das energias de um elétron se obtêm inserindo-se na fórmula os diferentes valores de n , que são sempre inteiros, 1,2,3 até ∞ — infinito. O número quântico principal.

2. Transições entre os níveis de energia: um elétron num átomo só pode alterar a sua energia passando de um nível de energia para outro. Esta passagem de um para outro nível é uma transição, onde ocorre a emissão de luz pelos átomos para dar um espectro descontínuo de raias como segue: um elétron num nível elevado E_i sofre uma transição para outro nível de energia mais baixa (E_f), o elétron perde energia emitida como fóton.

Neste segundo postulado, Bohr usou os conceitos de Einstein para explicar o espectro de emissão dos átomos (EISBERG, 1961).

2.3 A física de Maxwell e a natureza da luz

Nos tempos mais remotos da cultura grega, surgiu o desejo de explicar a luz estudando alguns fenômenos ópticos. Aristóteles, filósofo grego (384-322 a.C.), foi o primeiro que se tem notícia a adotar a natureza ondulatória da luz, pois, para ele, a luz era uma espécie de fluido imaterial que chegava aos nossos olhos vindo dos objetos visíveis (EISBERG, 1961).

Para Empedocles (492-432 a.C.), a luz é a parte de um dos seus quatro elementos: o fogo. Sem, contudo, se confundir com este. Alguns filósofos antigos, adeptos do atomismo, consideravam a luz um fogo visual composto de partícula, diferentes, no entanto, das que compunham o restante dos objetos por serem menores. Esta teoria foi adaptada por Epicuro (342-270). Tinha, anteriormente, sido modificada por Anaxágoras (500-428) no sentido de substituir os corpúsculos microscópicos reproduzindo os objetos reais, por outros corpúsculos, correspondendo, cada um, a uma propriedade determinada.

Para Anaxágoras a matéria compunha-se de uma multiplicidade de elementos, as homeomerias, cuja mistura dá os diferentes corpos, mas, tudo era comandado por um princípio superior, uma inteligência original, o “noûs”, conceito que lhe é devido (GIBERT, 1962). Outro grupo, ligado a escola de Pitágoras, afirma ser o olho a origem da luz, a qual é emitida pelo órgão visual, vai ao objeto e regressa ao olho dando visão.

No fim do século XVI, surgem as primeiras lunetas e Kepler dá explicação para a natureza da luz, embora a imagem do objeto esteja efetivamente traçada, no fundo do olho, numa posição invertida, a alma deve naturalmente e sem o socorro de qualquer experiência, endireitá-la. Já no início do século XVII, Descartes apresenta a lei da Refração e também dá

uma explicação da natureza da luz, mas aí a sua visão não foi feliz: era uma teoria mista e complexa em que intervinha uma transmissão de caráter corpuscular ligado a uma emissão vibratória, retirando à luz qualquer natureza material, mas exigindo um meio elástico, o éter, para se transmitir (GIBERT, 1962).

Em 1665, dá-se um novo passo nos conhecimentos da luz com a descoberta de Grimaldi (1618-1663). O fenômeno da difração, descrito assim, levou Hooke (1635-1703) a apresentar, em 1675, à Royal Society uma memória em que afirma a dado passo: “O movimento da luz, quando é produzido num meio homogêneo, propaga-se por impulsos ou ondas simples e de forma constante, perpendiculares à linha de propagação” (GIBERT, 1962).

Outro que alcançou apreciáveis progressos no próprio entendimento da explicação ondulatória (ou vibratória) da natureza da luz foi Huygens que, em 1678, estudou o fenômeno da dupla difração, o que levou a elaborar a sua teoria ondulatória da luz. Segundo ele, para justificar as condições de propagação da luz e as suas propriedades, era necessário admitir a existência de um meio, o éter, enunciando então o seguinte princípio (princípio de Huygens): “ cada ponto do éter atingido pela excitação luminosa pode ser considerado como o centro de uma nova onda esférica”. É curioso notar que Huygens descobre aqui a polarização da luz, primeiro fenômeno a exigir a hipótese da transversalidade das vibrações (GIBERT, 1962).

Em 1672, Newton apresentou à Royal Society uma comunicação sobre dispersão da luz, baseado em experimentos que fazia com o prisma. Tais experimentos motivaram controvérsias no meio científico, pois, naquela época, a experimentação deveria ser utilizada para confirmar ou negar algum tipo de teoria. Impulsionado por essa controvérsia, pela ausência de explicação plausível para existência de sombra geométrica e também pelo fato de ser otimista, propôs um modelo corpuscular para explicar a natureza da luz (GIBERT, 1962).

Newton publica em 1704, o seu tratado de óptica do qual sai uma segunda edição em 1717, declarou: 1 que a luz branca era composta da mistura de varias cores e essas cores correspondiam a uma variedade de partículas, 2 que a reflexão e a refração, propôs um engenhoso sistema de “ ajustes de fácil reflexão e de fácil refração”. Já no fim da sua prestigiosa vida, deduzir aquela consequência fundamental da teoria ondulatória e por ele entender que não poderia admitir um éter com vibrações transversais, rejeitou a teoria ondulatória de Huygens (GIBERT, 1962). Newton não foi bem sucedido ao afirmar que a velocidade da luz aumenta quando esta passa de um meio menos denso para um meio mais denso. Com toda autoridade que tinha, estava montada o grande palco onde ocorreu a mais

célebre discussão a respeito da natureza da luz, de um lado Huygens e seu modelo ondulatório, de outro Newton e seu corpuscular (Huygens, 1986).

O modelo de Newton prevaleceu sobre o de Huygens por mais 100 anos, questionar uma teoria bem fundamentada nunca foi fácil, por isso aceitar o modelo contrário o de Newton foi um trabalho bastante árduo, que Thomas Young (1773-1829) decidiu enfrentar. Young questionou várias afirmações da teoria corpuscular de Newton, como a velocidade da luz emitida por corpos diferentes e, explicou, de forma simples, como eram formados os “anéis de Newton” supondo que cada cor correspondia a um determinado comprimento de onda próprio.

Estudando o experimento de dupla fenda, Young considerou que a luz se comportava como uma onda, que podiam anular umas as outras ou intensificarem-se. Para isso usou com fonte luminosa, não propriamente o sol, mas antes uma fenda iluminada pelo sol. Em frente a essa fenda, colocou um painel opaco, com duas fendas, simétricas em relação à primeira, e rigorosamente iguais, de modo a construir com este conjunto duas fontes luminosas iguais em todos os sentidos. Então, num alvo posto em frente fendas, Young pôde observar riscas, alternadas claras e escuras, chamadas de franjas de interferência. Young interpretou estes resultados tendo como certo o princípio de Huygens e, portanto, a teoria ondulatória (GIBERT, 1962).

A explicação matemática do fenômeno da difração coube a Augustin Fresnel (1788-1827) também calcula corretamente a trajetória hiperbólica do lugar geométrico dos lugares geométricos dos pontos de interferência construtiva. Desenvolve a teoria, detalhando os cálculos e explicando a reflexão, a difração, as cores... e envia Arago (o mesmo que se interessa pelos resultados de Young). Fresnel redige um enorme tratado desenvolvendo esses temas. O matemático Poisson, no júri, mostra que certo efeito bizarro deveria se produzir na difração de um anteparo circular com incidência oblíqua, o que “provaria” a falsidade da teoria de Fresnel. Para uma dada geometria, se encontraria um máximo na sombra geométrica do disco. Mas, realizado o experimento, o efeito realmente se produz. Fresnel ganha o prêmio em 1819 (GIBERT, 1962).

A explicação do fenômeno de polarização da luz baseada no modelo ondulatório tropeçava no seu próprio modelo, pois se acreditava que as ondas da luz eram longitudinais, no entanto, uma mudança de conceito estava por vir quando François Arago (1786-1853) juntou-se a Fresnel e, juntos observaram dois feixes polarizados não interferiam um com o

outro. Arago comunicou o fato a Young que não tardou em presumir, as ondas eram transversais (GIBERT, 1962).

A descoberta de Michael Faraday, de que a luz podia se inverter os planos de polarização quando exposto a campos magnéticos, despertou curiosidade em James Maxwell (1831-1879), que chegou a equações que expressavam o comportamento de uma corrente elétrica e de seu campo magnético associado (GIBERT, 1962).

2.3.1 O trabalho de Maxwell

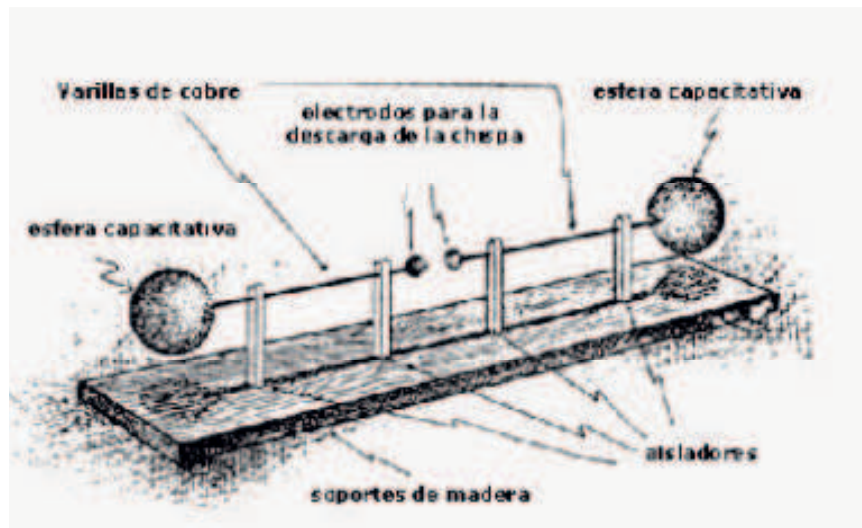
Utilizando-se dos estudos de Faraday, de que a luz podia se inverter os planos de polarização quando exposto a campos magnéticos, “tubos de forças”, James Clerk Maxwell era adepto de utilizar modelos conceituais que servissem de analogia com fenômenos estudados, independentemente de que representem ou não a realidade. Imaginou que os “tubos de forças” estavam cheios de turbilhões de moleculares com eixos paralelos aos tubos girando todos no mesmo sentido e davam origens às forças centrífugas, tendo tendência ao alargar-se equatorialmente e a contrair-se longitudinalmente (EISBERG, 1961).

A essa ideia, Maxwell aplicou as leis da Mecânica dos fluidos a este modelo e estabeleceu as suas relações matemáticas com as grandezas elétricas e magnéticas. Trocou a velocidade de rotação dos turbilhões pela intensidade do campo magnético e substituiu a força exercida pelos turbilhões sobre as partículas pela intensidade do campo magnético e substituiu a força exercida pelos turbilhões sobre as partículas pela intensidade do campo elétrico. Então em 1864, baseado nas analogias acima, Maxwell estabeleceu as chamadas equações que relacionaram os fenômenos elétricos com os magnéticos e que é a estrutura matemática das propriedades do chamado campo eletromagnético.

Na mesma data ele apresenta à Royal Society de Londres uma evolução da sua teoria inicial, considerando no lugar do modelo mecânico, uma interação entre energia elétrica (potencial) e magnética (cinética) associado ao campo magnético. Portanto o magnetismo pode produzir eletricidade e vice-versa, sendo finita a velocidade de propagação das ações, dependendo do meio. Concluiu também que as ondas eletromagnéticas são transversais em relação à direção de propagação, como acontece com as vibrações luminosas (EISBERG, 1962). A novidade do trabalho de Maxwell foi demonstrar que a luz era uma onda eletromagnética e que, portanto, com as ondas eletromagnéticas deveriam ocorrer os

fenômenos de reflexão, refração, enfim, todos os que acontecem com a luz. Embora estes conhecimentos fossem de real importância, faltava-lhes ainda o aval da comprovação experimental, realizada por Henrich Herz (1857-1894).

Figura 11: Oscilar construído por Hertz.



Fonte: <http://o-animal-politico.blogspot.com/2015/01/a-natureza-da-luz-na-historia.html>

Hertz montou um oscilador constituído de quatro esferas metálicas unidas duas a duas por uma haste ligada aos terminais de uma bobina de Ruhmkorff (Figura 11), de onde conseguiu produzir ondas eletromagnéticas e provar que estas possuíam a mesma velocidade da luz e podiam sofrer reflexão, refração, polarização, difração e interferência. Além disso, Hertz também descobriu que outros tipos de ondas poderiam ser produzidas e, com isso, descobriu as ondas de radio e as micro-ondas. Sua contribuição foi crucial para a compreensão dos trabalhos de Maxwell e inaugurou a era do eletromagnetismo, uma era de grande desenvolvimento tecnológico e socioeconômico.

2.3.2 Dualidade da luz

Em 1899, descobriu uma nova constante fundamental, após pesquisar radiações eletromagnéticas, batizadas posteriormente de constante de Planck. A partir dessa data chega-se a uma conclusão a respeito da natureza da luz que é aceita até hoje. A divergência de onda

e partícula é então explicada por Einstein, que realizou o experimento chamado de efeito fotoelétrico, concluindo que a natureza da luz tinha comportamento dual, a luz poderia se comportar simultâneo como onda e como partícula (EISBERG, 1961). A partir da constante de Planck, surge um novo ramo da física, deixando para trás as ideias da mecânica clássica e surge então a física moderna, como uma vertente da física moderna aparece a mecânica quântica.

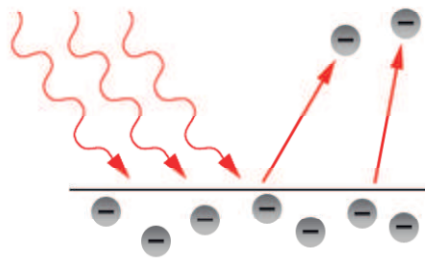
2.3.3 Teoria clássica e quântica

Em 1887, coube a Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) descobrir que sob ação de raios ultravioletas certos corpos emitiam elétrons. Em 1902, Lenard experiências, cuidadosas quais resultam que:

- i. Os elétrons emitidos têm velocidades finitas, mesmo num campo nulo, as quais não dependem da temperatura.
- ii. Esta velocidade dos elétrons não depende da intensidade total da luz excitatriz, mas depende fortemente da frequência.
- iii. O numero total de elétrons emitidos é proporcional à intensidade da luz excitatriz.

Lenard encontrou bastante dificuldade para explicar esses fatores, dentro de uma teoria ondulatória da luz. Em 1889, J.J. Thomson demonstrou que as partículas ejetadas da placa de metal eram elétrons. O problema do experimento era que a energia dos elétrons ejetados não mudava com a intensidade da luz incidente.

Figura 12: O efeito fotoelétrico

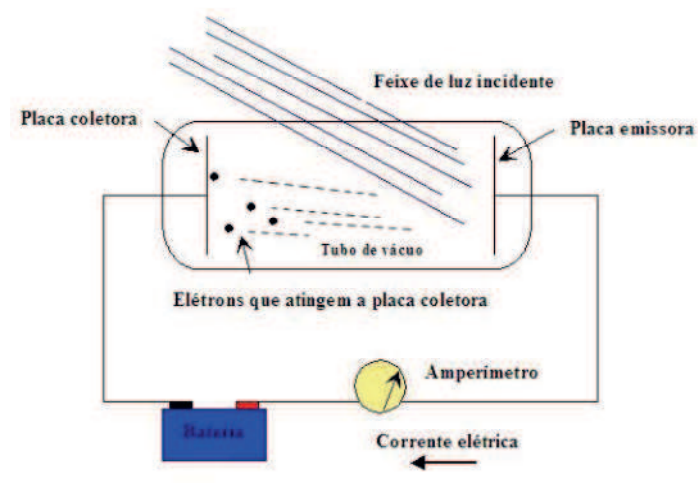


Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Photoelectric_effect.png

Foi então, que em 1905, Albert Einstein (1879-1955) publicou 5 artigos bastante revolucionários, dentre estes, um explicando a natureza da luz. Propôs uma explicação baseada na “teoria dos quanta”, a energia das ondas luminosas concentra-se em pequenos “lichtquanta”- o que agora designamos fótons- os quais tem uma energia hf , onde h é a constante de Planck e f é a frequência da radiação. Em decorrência desse trabalho ele ganhou o prêmio Nobel de 1921 e, a partir de 1926, esses quanta passaram a ser denominados de fótons (ZZNETIC; MOZENA, 2004). O trabalho de Lenard foi então explicado por Einstein, passando a ser chamado de efeito fotoelétrico, que diz:

- I. A luz de frequência f é formada por números inteiros de fótons, cada um com energia hf (h é a constante de Planck), que incidem na placa emissora.
- II. Os fótons colidem com elétrons da placa e transferem energia para estes.
- III. Os elétrons usam uma parte da energia recebida pelos fótons para escapar da placa emissora, se sobra energia, esta é transformada em energia cinética que o elétron adquire para deslocar-se da placa emissora para a placa coletora, constituindo assim, a corrente elétrica característica deste fenômeno.

Figura 13: Esquema de observação do efeito fotoelétrico



Fonte: https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/m_s01.html

2.4 Propriedades Ondulatórias das Partículas

2.4.1 A hipótese de Broglie: Ondas de matéria

Por volta de 1924, tinha-se acumulado diversos resultados experimentais que só se conseguiam explicar à custa de virtuosíssima habilidade “ad hoc”. Muitos desses problemas foram profundamente analisados num trabalho que alcançou grande renome, N. Bohr, H.A. Kramers e J. C. Slater, mas nenhum desses trabalhos satisfazia (GIBERT, 1962). Foi então que um jovem físico teórico, Louis De Broglie (1892-1987), apresenta sua tese de doutorado e outros trabalhos fundamentais, criando uma nova Mecânica Quântica ou Mecânica Ondulatória, não concorrente da Mecânica de Galileu-Newton-Laplace-Einstein mas, bem ao contrário, muito dependente delas, criando logo de início novos delicados problemas de compatibilidade (GIBERT, 1962).

De Broglie, vinha de uma família aristocrática, mas tradicionalmente liberal, e príncipe por força de um tetravô. Aos 18 anos, De Broglie concluiu a faculdade de licenciatura História, e inclinou-se para o ramo da física influenciado pelo seu irmão mais velho, Maurice, que montou um laboratório para estudar Raios X (GIBERT, 1962). De Broglie apresenta a origem da hipótese de uma natureza ondulatória dos corpúsculos, designados de elétrons. Fazendo um estudo desde a hipótese de Planck, radiação de corpo negro, até Einstein, efeito fotoelétrico. Observou-se que pouco depois da conhecida teoria da relatividade restrita, de Einstein, ela foi aplicada ao movimento dos elétrons (GIBERT, 1962).

Um elétron de massa m e velocidade v tem energia

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ e o momento } q = \frac{E}{c^2} v \quad (26)$$

De Broglie faz hipótese seguinte: “devemos nós associar com essa partícula que se propaga na direção do movimento”.

A frequência dessa onda deve ser $[f = \frac{E}{h}]$ e sua velocidade $[v = \frac{c^2}{v}]$ e usando a equação (25), temos

$$q = \frac{hf}{v} \quad (27)$$

Se em vez de um elétron se tratasse de um fóton, ter-se-ia $[V=c]$, logo

$$q = \frac{hf}{c} \quad (28)$$

Em condições convenientes, os elétrons devem apresentar os fenômenos de difração e interferência, verificados experimentalmente por C. J. Davisson (1881-1958) e o Inglês G. P. Thomson. Então De Broglie expressou sua hipótese matemática através de equações para a frequência e o comprimento de onda das ondas de matéria, hoje conhecidas como relação de De Broglie.

$$f = \frac{E}{h} \quad (29)$$

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (30)$$

onde E é a energia total, p o momento e λ o chamado comprimento de ondate De Broglie da partícula. No caso, dos fótons, essas equações podem ser obtidas a partir da equação do quantum de radiação, $[E = hf]$, e da equação $[E = pc]$:

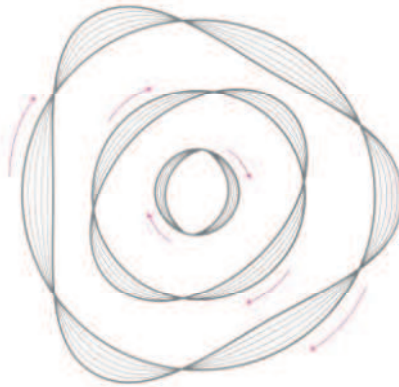
$$E = pc = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (31)$$

Baseando-se na mecânica relativística, De Broglie demonstrou que as equações (29) e (30) também se aplicam a partículas com massa de repouso diferente de zero. Chegando a concluir que essas equações levam a uma interpretação física da quantização do momento angular do elétron postulada por Bohr, a de que a quantização equivale à formação de uma onda estacionária (figura 12), temos:

$$Mvr = n\hbar = \frac{nh}{2\pi} \quad \text{para } n = \text{inteiro} \quad (32)$$

$$2\pi r = \frac{nh}{mv} = \frac{nh}{p} = n\lambda = \text{circunferência da órbita} \quad (33)$$

Figura 14: ondas estacionárias ao longo de uma circunferência



Fonte: GASPAR, 2003.

Em 1925, as ideias de De Broglie foram ampliadas e transformadas em uma teoria completa por Erwin Schrödinger, C. J. Davisson e L. H. Germer confirmaram a hipótese de De Broglie ao produzirem figuras de interferência, uma característica dos fenômenos ondulatórios, usando feixe de elétrons.

2.4.2 O princípio da incerteza de Heisenberg

Ao estudarmos a física clássica, faz-se necessário que utilizemos o determinismo, mas para estudar o mundo atômico é importante que façamos uso de uma análise probabilística, segundo Heisenberg e Bohr logo, abandonemos o determinismo clássico. Heisenberg fazendo estudo sobre a hipótese de De Broglie, ao produzirem figuras de interferência, provou que estas teorias envolvem toda uma incerteza essencial, que não pode ser levada, quanto a possibilidade de conhecer com toda precisão (mas isto só no mundo atômico) simultaneamente certas grandezas independentes como, por exemplo, a posição e a quantidade de movimento de um corpúsculo (GIBERT, 1962).

Bohr chamou a atenção para a necessidade de reconhecer a existência de uma ambiguidade, a complementaridade, no nosso conhecimento. Já De Broglie afirma “não pode haver qualquer dúvida quanto à exatidão das relações de incerteza de Heisenberg” (ao passo que a palavra complementaridade não constitui nenhuma explicação real da dualidade onda-partícula) e acrescenta “pretende-se fundar sobre a complementaridade de Bohr e sobre

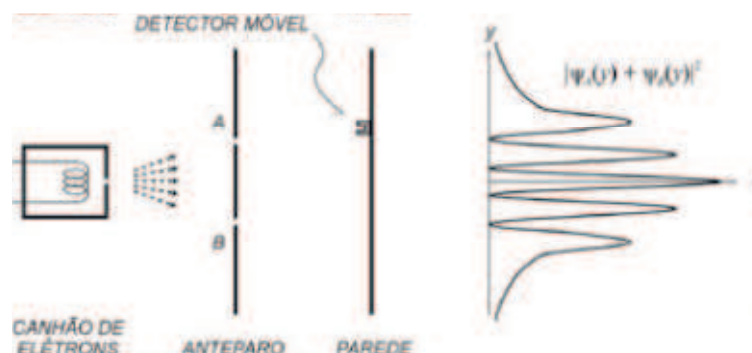
extensões arriscadas das relações de incerteza toda sorte de considerações filosóficas das quais o menos que se possa dizer é que são perigosas” (GIBERT, 1962).

Numa imagem muito feliz, Bohr, admite que a realidade não seja simples, totalmente apreensível: “nada disso! a realidade tem duas faces complementares”, é análoga a um desenho traçado, como em certos jogos para crianças, sobre duas folhas de plástico transparente, digamos metade em cada uma. Separadas ou mal ajustadas nada significam, ao passo que corretamente sobrepostas, acertadas e vistas em boas condições, dão-nos uma representação entendível. Contudo, veem-se mal certos pormenores. Se pegarmos numa forte lente poderemos ver melhor, mas observamos ao mesmo tempo em que o que ganhamos em relação às partes do desenho existentes em folhas, o perdeu em relação às outras. Segundo Bohr o mundo do nosso conhecimento é assim. De qualquer modo, os raciocínios básicos encontram sua expressão formal, matemática, nas relações de incerteza de Heisenberg que, no fundo, podem reduzir à seguinte fórmula muito simples

$$\delta p \delta q = h \quad (34)$$

em que (δp) significa um pequeno desvio da posição de um corpúsculo e (δq) a variação simultânea da sua quantidade de movimento. Note-se, o que é muito importante, que aquele referido pequeno desvio é qualquer coisa praticamente inevitável sempre que se faz uma observação, a qual é naturalmente indispensável para o nosso conhecimento.

Figura 14: Experiência de Feynman



Fonte: <https://agoraaporetica.files.wordpress.com/2014/01/imagem-1.jpg>

Fazendo uma interpretação simples, dentro de um formalismo experimental claríssimo, do estranho fenômeno traduzido pelas relações de incerteza (profunda novidade, afetando a própria noção de “casualidade”, tão enraizada em todos os nossos raciocínios) (GIBERT, 1962). Sabe-se da óptica geométrica que nas condições da figura (obvias), o poder separador, ou seja, (numa linguagem mais conveniente para o caso) a incerteza com que é conhecida a posição de um ponto (elétron) é

$$\delta x = \frac{\lambda}{2\varepsilon} \quad (35)$$

para que o elétron seja observado é preciso que pelo menos um fóton sofra uma difusão por efeito Compton e entre na objetiva. Neste caso será desviado segundo um ângulo [$\alpha < \varepsilon$]. Na teoria, aliás, muito simples, do efeito Compton mostra-se que a variação da quantidade de movimento

$$\Delta q_x = \alpha \frac{h}{\lambda} \quad (36)$$

Mas como (α) pode variar de [$-\varepsilon$ a $+\varepsilon$], existe uma ‘incerteza’, quanto a quantidade de movimento depois da difusão, que é dada por

$$\Delta q_x = 2\varepsilon \frac{h}{\lambda} \quad (37)$$

Tem-se então

$$\delta x \delta q_x = \frac{\lambda}{2\varepsilon} \frac{2\varepsilon h}{\lambda} = h \quad (38)$$

que é justamente a fórmula de Heisenberg (GIBERT, 1962).

2.4.3 Uma nova versão da física moderna (Erwin Schrödinger)

A física quântica que era recém-descoberta e até o presente momento, bem sucedida, até mais do que aparentemente deve estudar, falhava em alguns pontos, ou seja, não explicava

o problema de forma satisfatória. O primeiro aspecto indesejado era que a teoria quântica só nos diz como tratar sistemas que sejam periódicos, usando as regras de quantização, mais há muitos outros sistemas físicos interessantes que não são periódicos. E o número de sistemas periódicos para os quais pode ser encontrada uma base física para essas regras na relação de De Broglie é muito pequeno. O segundo aspecto indesejado mostrava que a teoria permitia calcular energias dos estados possíveis de certos sistemas, e a frequência dos fótons emitidos ou absorvidos quando um sistema sofre uma transição entre os estados possíveis, ela não nos diz como calcular a taxa (número médio de transições por segundo) com que essas transições ocorrem e não nos diz como calcular a intensidade das linhas espectrais. O terceiro aspecto indesejado é quando aplicamos a átomos, a teoria é na realidade bem sucedida apenas para os átomos de um elétron. Os elementos alcalinos (Li, Na, K, Rb, Cs) podem ser tratados de forma aproximada, porque em muitos aspectos eles são similares a um átomo de um elétron (EISBERG, 1979).

Percebemos então, que os aspectos indesejados mencionados acima leva de alguma forma a construção de uma teoria que parece ser incoerente, pensando nisso, vários pesquisadores da época fizeram várias tentativas de uma teoria quântica livre destas objeções. Então em 1925, Erwin Schrödinger desenvolveu sua teoria da mecânica quântica ou mecânica ondulatória e publicou em 1926. Ele se baseou nos postulados de De Broglie e apresentou sob alguns aspectos uma teoria diferente (EISBERG, 1979). Em seu trabalho, Schrödinger apresenta a equação que governa o movimento dos elétrons e outras partículas com massa de repouso diferente de zero, que análoga a equação clássica:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (39)$$

Como a equação de onda clássica, a equação de Schrödinger relaciona as derivadas da função de onda em relação ao tempo e em relação ao espaço. Para essa equação de Schrödinger não existe dedução matemática, a sua validade está fincada em resultados experimentais. Logo, essa equação é uma aproximação da equação relativística e só é aplicada a problemas não relativísticos da física atômica, molecular e da matéria condensada. Em 1928, Dirac conseguiu formular a equação relativística (TIPLER, 2001). Schrödinger, também apresentou sua equação em três dimensões para uma partícula de massa m e sendo dependente do tempo,

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x,t) \Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} \quad (40)$$

A função de onda $\Psi(x,t)$ não tem significado físico algum, pois o número complexo [$i = \sqrt{-1}$], aparece explicitamente na equação de Schrödinger não são necessariamente reais, como podemos ver no caso da função de onda de uma partícula livre

$$\Psi(x,t) = A e^{i(kx - \omega t)} \quad (41)$$

Isso significa que a função de onda $\Psi(x,t)$ que satisfaz a equação de Schrödinger não é uma função diretamente mensurável como função de onda clássica $y(x,t)$, já que nos resultados das medições são necessariamente números reais. Entretanto a probabilidade de encontrar o elétron no intervalo entre $[x + dx]$ certamente pode ser determinada (TIPLER, 2001). A probabilidade $P(x)dx$ de o elétron ser encontrado entre $[x + dx]$ foi definido como sendo igual a $|\Psi|^2 dx$. Essa interpretação probabilística de Ψ foi proposta por Max Born e reconhecida, apesar dos imediatos e respeitáveis protestos de Einstein e Schrödinger, como a forma mais apropriada de relacionar as soluções da equação de Schrödinger os resultados de medições. A probabilidade de elétron ser encontrado no intervalo (x_1) e $[x_1 + dx_1]$ ou no intervalo entre (x_2) e $[x_2 + dx_2]$ é a soma das probabilidades individuais, $[P(x_1)dx_1 + P(x_2)dx_2]$. Como o elétron tem que estar necessariamente em algum ponto do espaço, a soma das probabilidades para todos os valores possíveis de (x) deve ser igual a 1. Assim temos:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^* \Psi dx = 1 \quad (42)$$

Logo, a equação (42) é conhecida como condição de normalização. Essa equação é de suma importância, pois ela impõe uma restrição adicional às possíveis soluções da equação de Schrödinger (TIPLER, 2001).

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho ocorreu a partir da ideia de produzir um material didático que abordasse uma breve discussão histórica sobre a física moderna.

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica de alguns livros textos, assim como artigos que tratassem o assunto de forma clara e objetiva e fazendo uso da internet, no sentido de conseguirmos dados suficientes para realização de nosso trabalho.

Fizemos então, um estudo teórico sobre a radiação térmica, as leis Wien e os postulados de Planck. Realizamos também um estudo sobre os modelos de Dalton até Bohr, a natureza da luz com a contribuição de Maxwell e Einstein, e uma nova visão da física moderna.

Foram feitas muitas passagens de algumas equações, por julgarmos serem de interesse e compreensão para o leitor.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizada uma breve discussão dos conceitos fundamentais sobre a física moderna. Nosso estudo envolveu vários assuntos tratados pela física contemporânea e de difícil compreensão, porém, a forma em que foi exposta leva ao leitor a um melhor entendimento dos assuntos tratados pela física contemporânea.

Estudamos, no decorrer dessa pesquisa científica, sobre a radiação térmica, a estrutura atômica, a natureza da luz, a física de De Broglie, o trabalho de Heisenberg, e o trabalho de Schrödinger. O estudo possui grande importância, pois ele mostra a evolução dos modelos atômicos, a construção da ideia de dualidade da luz e o surgimento da física moderna. Observamos ainda que, no decorrer desta pesquisa sobre a radiação térmica, vimos que o problema da radiação do corpo negro desencadeou o surgimento da mecânica quântica, que revolucionou a física clássica.

É válido também ressaltar que a teoria atômica teve um papel importantíssimo no estudo da natureza da matéria, pois, hoje sabemos quais são as formas das orbitas, o raio do átomo e que o mesmo possui uma estrutura interna constituída de prótons, elétrons e nêutrons.

Destacamos aqui o trabalho de Maxwell sobre a natureza ondulatória da luz baseado nos trabalhos de Faraday, que resultou no surgimento da teoria eletromagnética. É sabido que foi o estudo envolvendo o eletromagnetismo, que nos proporcionou a concepção de que nosso espaço é de quatro dimensões, sendo três espaciais e uma temporal.

E, para finalizar, destacamos ainda que a relatividade de Einstein está fundamentada no eletromagnetismo. Baseado nesses fatos, não se tem nenhuma dúvida que este trabalho, mostra uma discussão sucinta dos conceitos fundamentais sobre a física moderna.

MODERN PHYSICS: A BRIEF DISCUSSION OF SOME FUNDAMENTAL CONCEPTS

ABSTRACT

This paper reports a brief discussion of some fundamental concepts about modern physics. We initially approached thermal radiation, where we deal with the problem of emission and absorption of radiation. We will show Planck's physics, which reconciled theory with experience. The atomic models are covered in detail so that there is a better understanding of the atomic structure of matter on the part of the reader. We also discussed Maxwell's electromagnetism and its importance to the theory of the nature of light. Of course, we could not fail to talk about Schrödinger's physics, which initiated a new Quantum Mechanics and the conceptions of Modern Physics.

Keywords: Modern physics. Radiation. Atomic structure.

REFERÊNCIAS

ZANETIC, J.; MOZENZA, E.R. Evolução dos conceitos da Física. **Notas de aula: Instituto de Física da Universidade de São Paulo**. São Paulo. 265p. 2004

TIPLER, P. A. **Física Moderna**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

EISBERG, R. M. **Fundament of Modern Physic**. New York: Wiley e Sons, 1961.

EISBERG, R. M.; RESNICK, R. **Física Quântica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979.

ABDALLA, E. Teoria da Gravitação: Cordas e teoria M. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.27, n.1, p.147-155, 2005.

HAVARD PROJECT PHYSICS. **Partículas Elementares**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1987.

GIBERT, A. **Origens Históricas da Física Moderna**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1962.

SANTOS, T. **Uma breve revisão histórica sobre a física Moderna**. Campina Grande, 2014.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**, Volume 4: Óptica e Física Moderna, Rio de Janeiro: LTC, 2007, 7^a ed.