



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO  
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA  
POLO 30

**CHARLES CORDEIRO DA SILVA**

PRELÚDIO DO QUANTUM:  
AS CINCO RACHADURAS NA FÍSICA CLÁSSICA QUE LEVARAM À TEORIA  
QUÂNTICA

Rio de Janeiro

2024

**CHARLES CORDEIRO DA SILVA**

**PRELÚDIO DO QUANTUM:**

**AS CINCO RACHADURAS NA FÍSICA CLÁSSICA QUE LEVARAM À TEORIA QUÂNTICA**

Dissertação apresentada ao Polo 30 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO), como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:

Prof. Dr. Satheeshkumar Veerahanumakkanapalya Honnappa

Rio de Janeiro  
2024

## FICHA CATALOGRÁFICA

Catálogo informatizada pelo(a) autor(a)

D586 DA SILVA, CHARLES  
PRELÚDIO DO QUANTUM: AS CINCO RACHADURAS NA FÍSICA  
CLÁSSICA QUE LEVARAM À TEORIA QUÂNTICA / CHARLES DA SILVA. -  
- Rio de Janeiro, 2024.  
398f.

Orientador: Satheeshkumar Veerahanumakkanapalya  
Honnappa.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Estado  
do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ensino de  
Física, 2024.

1. Ensino de Física. 2. Mecânica Quântica. 3. Constante de  
Planck. I. Veerahanumakkanapalya Honnappa, Satheeshkumar,  
orient. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO  
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – PROFIS-UNIRIO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Charles Cordelro da Silva

Título: "Preâmbulo do Quântico: as cinco rachaduras na Física Clássica que levaram à Teoria Quântica"

Aprovado(a) pela Banca Examinadora

Rio de Janeiro, 10/05/2024

Prof. Dr. Satheesh Kumar Veerhanthmakkarapaya Honappa  
(orientador)

Prof. Dr. Luciano Bicchieri Medeiros  
(avaliador externo)

Documento assinado digitalmente  
ROBERTO SOARES DA CRUZ HASTENREITER  
Data: 23/05/2024 10:30:21 -0200  
Verifique em <https://gov.br>

Prof. Dr. Roberto Soares da Cruz Hastenreiter  
(avaliador interno)

Prof. Dr. Marco Vinício Guimarães Giusti  
(avaliador externo)

Prof. Dr. João Alberto Mesquita Pereira  
(avaliador interno)

Dedico esta dissertação ao meu pai, Delso Rodrigues da Silva; à minha mãe, Shirley Cordeiro da Silva; à minha eterna companheira, Juvênia de Almeida Azeredo, in memoriam; à minha esposa Jaciara de Castro Paiva e aos meus filhos Pâmella de Azeredo Ribeiro e Paulo Victor André da Silva.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha esposa Jaciara, pelo suporte a este trabalho e pela compreensão diante dos difíceis momentos, o que proporcionou a calma e a motivação imprescindíveis.

À minha filha Pâmella, pela paciência ante minhas inquietações e o bom humor, combustível para esta missão.

Ao meu filho Paulo Victor, que apesar de sua juventude, foi meu modelo de resiliência e serenidade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Satheeshkumar Veerahanumakkanapalya Honnappa por acreditar na proposta deste trabalho e conduzir o processo de elaboração com extrema maestria.

Ao meu grande amigo Gilvan, pelo experiente e acolhedor auxílio em algumas fases de produção deste Produto Educacional.

À equipe de Física e à Direção do Campus Niterói-RJ do Colégio Pedro II, pelo apoio e suporte.

Ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF, à Sociedade Brasileira de Física - SBF e à Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – UNIRIO, que tornaram este projeto possível.

A toda equipe de professores do MNPEF do pólo 30, pelos ensinamentos e contribuições para a presente proposta.

Ao Prof. Dr. Eduardo Lima Rodrigues pela Coordenação do MNPEF no pólo 30, abrigo deste projeto.

Aos meus colegas do Mestrado pelos excelentes momentos, que seguramente me incentivaram a continuar nesta caminhada de maneira segura.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001

"A ciência é a aproximação progressiva do homem com o mundo real" – Max Planck.

## RESUMO

Ao final do século XIX a Teoria Clássica aparentemente se mostrava acabada e suficiente para todas as demandas da ciência. Esta teoria abrangia um mundo real de dimensões visíveis, corroborada por previsões concretas motivadas por observações lógicas, incutindo um determinismo incontestável nos pensadores e produtores de ciência, com regras oferecidas pela natureza, simples e seguras. Porém, cinco problemas permaneciam sem respostas, e para suas soluções foi necessária uma forte ruptura nos paradigmas, embrenhando-se em um universo de escalas atômicas e subatômicas da estrutura da matéria, onde as certezas desaparecem e a realidade desafia o senso comum. Nesta Dissertação apresentaremos estes problemas que motivaram o surgimento da Mecânica Quântica, tão presente em nosso cotidiano: A carência de um sustentáculo teórico para a Radiação do Corpo Negro, a inexistência de uma justificativa conceitual para a ocorrência do Efeito fotoelétrico, a ausência de um arcabouço físico para as Linhas espectrais de Balmer, a falta de explicação para o comportamento da Capacidade térmica molar a volume constante dos sólidos e a inexistência de uma explicação para a emissão alfa na Radioatividade. Neste diapasão, após intensa pesquisa e aplicação com sucesso em turmas de terceira série do Ensino Médio, desenvolvemos um Produto Educacional, que pela grande importância e se mostrar com elevado grau motivacional aos alunos, foi segmentado em três partes. Na primeira parte foi concebido um e-book com apresentação da evolução conceitual da Teoria Quântica. Em um segundo momento, foi apresentada uma Sequência Didática sobre o tema, com linguajar adequado de oito aulas, acrescida de material avaliativo anterior e posterior às mesmas, que corroborou êxito nesta empreitada educacional. Em um terceiro segmento do Produto, após breve teoria de semicondutores, foi desenvolvida uma atividade prática em laboratório didático de Física, com obtenção da constante de Planck utilizando-se LEDs, com pequeno erro experimental.

**Palavras-chave:** Ensino de Física; Mecânica Quântica; Radiação do Corpo Negro; Efeito Fotoelétrico; Linhas espectrais; constante de Planck.

## ABSTRACT

At the end of the 19th century, Classical Theory apparently proved to be finished and sufficient for all the demands of science. This theory covered a real world of visible dimensions, corroborated by concrete predictions motivated by logical observations, instilling an indisputable determinism in thinkers and science producers, with simple and safe rules offered by nature. However, five problems remained unanswered, and their solutions required a strong break in paradigms, delving into a universe of atomic and subatomic scales in the structure of matter, where certainties disappear and reality defies common sense. In this Dissertation we will present these problems that motivated the emergence of Quantum Mechanics, so present in our daily lives: The lack of a theoretical basis for Black Body Radiation, the lack of a conceptual justification for the occurrence of the Photoelectric Effect, the absence of a framework physics for the Balmer spectral Lines, the lack of explanation for the behavior of the molar thermal capacity at constant volume of solids and the lack of an explanation for the alpha emission in Radioactivity. In this sense, after intense research and successful application in third-grade high school classes, we developed an Educational Product, which, due to its great importance and showing a high level of motivation to students, was segmented into three parts. In the first part, an e-book was designed presenting the theoretical evolution of Quantum Theory. In a second moment, a Didactic Sequence on the topic was presented, with appropriate language from eight classes, plus evaluation material before and after them, which corroborated success in this educational endeavor. In a third segment of the Product, after a brief semiconductor theory, a practical activity was developed in a Physics teaching laboratory, obtaining Planck's constant using LEDs, with a small experimental error.

**Keywords:** Physics Teaching; Quantum Mechanics; Black Body Radiation; Photoelectric effect; Spectral lines; Planck constant.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Membros da CIPM de 1894 e 26ª CGPM/2018 em Marselles .....	22
Figura 2 - Escritório Geral de Pesos e Medidas - BIPM .....	23
Figura 3 - Organograma da Convenção do Metro .....	24
Figura 4 - As mudanças no Sistema Internacional de Unidades .....	28
Figura 5 - Os problemas não solucionados pela Teoria Quântica .....	47
Figura 6 - Esquema experimental de Hertz .....	66
Figura 7 - Esquema experimental de Phillip Lenard .....	70
Figura 8 - A Conferência de Solvay de 1911 .....	84
Figura 9 - O calor específico para Einstein .....	86
Figura 10 - Espectro de absorção e emissão .....	89
Figura 11 - Espectro de absorção e emissão para o Hidrogênio.....	90
Figura 12 - Tabela Periódica com linhas espectrais de emissão dos elementos ...	101
Figura 13 - Penetrabilidade das radiações .....	110
Figura 14 - Mapa Conceitual das Interações Fundamentais .....	111
Figura 15 - Modelo Padrão das Partículas Elementares .....	112
Figura 16 - Compton, Heisenberg, Dirac e Hund em Chicago (1929).....	113
Figura 17 - 7ª Conferência de Solvay - Bruxelas (1933) .....	115

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação de massa das cópias do IPK .....	25
Gráfico 2 - Lei de Rayleigh-Jeans .....	53
Gráfico 3 - Lei de Wien.....	54
Gráfico 4 - Lei do deslocamento de Wien .....	60
Gráfico 5 - Gráfico ( $i \times V$ ) para dois valores de Intensidade de luz.....	72
Gráfico 6 - Dados obtidos por Millican para $V$ em função de $f$ no Efeito Fotoelétrico	76
Gráfico 7 - Dados de Weber (1872) para a Capacidade Térmica do diamante.....	78
Gráfico 8 - Capacidade Térmica adimensional dividida por 3 em função da Temperatura segundo os Gráficos de Einstein, de Debye e o de Dulong-Petit .....	81
Gráfico 9 - Espectros do átomo de Hidrogênio.....	92
Gráfico 10 - Diagrama dos níveis de Energia do átomo de Hidrogênio.....	99

Gráfico 11 - Penetração em barreiras .....	116
Gráfico 12 - Barreira de Coulomb.....	117
Gráfico 3 - Percentual de acertos antes e depois das aulas .....	149
Gráfico 14 - Gráfico da distribuição da melhoria nos percentuais de acertos .....	152

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Constantes definidoras das unidades básicas do SI.....	19
Tabela 2 - Dados originais de Dulong e Petit: Capacidade calorífica em J/K.mol .....	77
Tabela 3 - Cronograma de aplicação do Produto Educacional .....	122
Tabela 4 - Evolução nos acertos no primeiro Questionário, antes e depois das aulas .....	147
Tabela 5 - Evolução das melhorias nos percentuais de acertos .....	149
Tabela 6 - Percentual de acertos após cada aula .....	171

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E HIPÓTESE</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2 AS CONSTANTES DA NATUREZA</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2.1 AS CONSTANTES FUNDAMENTAIS DA NATUREZA</b> .....	<b>17</b>
<b>1.3 O ENSINO DE FÍSICA, A METROLOGIA E O QUANTUM</b> .....	<b>20</b>
<b>1.4 O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES</b> .....	<b>22</b>
<b>1.5 AS MUDANÇAS NO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES</b> .....	<b>24</b>
<b>1.5.1 O QUILOGRAMA</b> .....	<b>25</b>
<b>1.5.2 O AMPERE</b> .....	<b>26</b>
<b>1.5.3 O KELVIN</b> .....	<b>26</b>
<b>1.5.4 O MOL</b> .....	<b>26</b>
<b>1.5.5 O SEGUNDO</b> .....	<b>27</b>
<b>1.5.6 O METRO</b> .....	<b>27</b>
<b>1.5.7 A CANDELA</b> .....	<b>27</b>
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>28</b>
<b>2.1 ALFABETIZAÇÃO CIENTÍFICA</b> .....	<b>29</b>
<b>2.2 A HISTÓRIA E A FILOSOFIA DA CIÊNCIA E AS ATIVIDADES     EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>30</b>
<b>2.3 CORRENTES FILOSÓFICAS E TEORIAS DE APRENDIZAGEM</b> .....	<b>37</b>
<b>2.4 UNIDADES DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVAS – UEPS</b> .....	<b>42</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>46</b>
<b>3.1 RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO: A QUEBRA DA CONTINUIDADE E A     ORIGEM DA ENERGIA QUÂNTICA</b> .....	<b>47</b>
<b>3.1.1 O QUANTUM E A SOLUÇÃO DE FALHAS NA TEORIA CLÁSSICA</b> .....	<b>48</b>
<b>3.1.2 A LEI DE RAYLEIGH – JEANS</b> .....	<b>52</b>
<b>3.1.3 A LEI DE WIEN</b> .....	<b>53</b>
<b>3.1.4 A SOLUÇÃO TEÓRICA DE PLANCK PARA ADEQUAÇÃO AOS DADOS         EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>55</b>
<b>3.1.5 DE PLANCK A RAYLEIGH – JEANS</b> .....	<b>59</b>

3.1.6 LEI DO DESLOCAMENTO DE WIEN A PARTIR DE PLANCK.....	59
3.1.7 A VISITA DE RUBENS, O CHÁ DA TARDE DE DOMINGO E OS QUANTA .....	61
3.2 EFEITO FOTOELÉTRICO: A INADEQUAÇÃO AO ELETROMAGNETISMO CLÁSSICO E O NASCIMENTO DO FÓTON .....	63
3.2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	64
3.2.2 DISPERSÃO DE RAYLEIGH.....	68
3.2.3 A EXPERIÊNCIA DE LENARD .....	70
3.2.4 OS POSTULADOS DE EINSTEIN E A EQUAÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO .....	73
3.3 CAPACIDADE TÉRMICA DOS SÓLIDOS E A LEI DE DULONG – PETIT: .....	76
<i>A RACHADURA OCULTA NA TERMODINÂMICA E OS PRIMÓRDIOS DA FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA .....</i>	<i>76</i>
3.3.1 CAPACIDADE TÉRMICA .....	78
3.3.2 A SOLUÇÃO DE ENSTEIN .....	80
3.3.3 WALTHER NERNST TORNA EINSTEIN FAMOSO .....	83
3.4 ESPECTROS DE EMISSÃO E ABSORÇÃO DO HIDROGÊNIO: A FALHA DA ÓPTICA CLÁSSICA E A DETECÇÃO DE IMPRESSÕES DIGITAIS QUÂNTICAS	87
3.4.1 ESPECTROS DE EMISSÃO E ABSORÇÃO .....	88
3.4.2 AS LINHAS DE BALMER.....	89
3.4.3 A ESPECTROSCOPIA E OS MODELOS ATÔMICOS DE THOMSON, NAGAOKA, JESSUP E NICHOLSON.....	92
3.4.4 O ÁTOMO DE RUTHERFORD.....	96
3.4.5 O ÁTOMO DE BOHR E A EXPLICAÇÃO PARA AS LINHAS.....	97
3.5 RADIOATIVIDADE: A DETERIORAÇÃO DO DETERMINISMO E A DESCOBERTA DA FÍSICA NUCLEAR.....	102
3.5.1 OS RAIOS CATÓDICOS .....	102
3.5.2 OS RAIOS X .....	103
3.5.3 A ORIGEM DA RADIOATIVIDADE .....	105
3.5.4 TUNELAMENTO QUÂNTICO E O DECAIMENTO ALFA.....	112
4. METODOLOGIA .....	117
4.1 METODOLOGIA DE ENSINO .....	117
4.2 METODOLOGIA DO TRABALHO.....	120
5. RESULTADOS.....	122

<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>172</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>175</b>
<b>APÊNDICE A – Produto Educacional .....</b>	<b>184</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em regra, não percebemos que uma evolução conceitual apesar às vezes lenta, sempre é contínua. A história da ciência descreve alguns eventos revolucionários que alavancaram esta evolução. Em alguns momentos nos questionamos se de fato são importantes os altos gastos com insumos de pesquisas. Por que investir em aceleradores de partícula, pomposos telescópios, salários com pesquisadores...? Para que Planck perdeu dias estudando inocentemente um mero corpo aquecido? Por que Crookes e Roentgen ficaram aplicando altas tensões elétricas em tubos vazios? Não podemos saber a utilidade de algo, antes de sua descoberta.

A humanidade relata inúmeras e importantes descobertas ao acaso e pacientes em emergências de hospitais agradecem às pesquisas despreziosas de Roentgen, de Hertz, de Thomsom, de Planck, de Einstein, de Bohr, de Schrodinger. Questionamentos, dilemas ou acidentes produziram os raios-X, os elétrons, a radioatividade, o efeito fotoelétrico, o quantum, o fóton.

No nosso mundo real de dimensões visíveis, uma visão clássica da física foi sedimentada pelas previsões concretas motivadas por observações lógicas, incutindo um determinismo incontestável nos pensadores e produtores de ciência, diante de regras impostas pela natureza, simples e seguras. Porém se adentrarmos no universo de escalas atômicas e subatômicas da estrutura da matéria, as certezas desaparecem e a realidade desafia o senso comum, estamos no mundo da mecânica quântica, que propiciou um magnífico salto tecnológico modificando nossas vidas com o Laser, os exames de Ressonância Magnética, os dispositivos de armazenamento de dados de computadores e celulares, entre outras aplicações. Assim, este professor-pesquisador encontrou múltiplas motivações para o desenvolvimento deste trabalho. Dentre elas podemos citar a necessidade de promover uma Alfabetização Científica ou no mínimo uma aculturação do aluno, que convive com tecnologias como as descritas acima, concebidas a partir da Teoria Quântica. Segundo Nahas (2022), a Mecânica Quântica está até na base da cadeia alimentar do planeta, ou seja, na fotossíntese.

Outro motivo é apresentar ao aluno, a presença da Mecânica Quântica até nas unidades das grandezas físicas fundamentais, do cotidiano Sistema Internacional de Unidades, como a constante mais fundamental da natureza, a constante de Planck.

## 1.1 PERGUNTA DE PESQUISA E HIPÓTESE

Convivemos com aplicações da Mecânica Quântica como o smartphone, laptop, computação, ressonância magnética, células fotoelétricas, sensores de presença, laser, etc. Além disso, o estudo deste segmento da Física Moderna se mostra também relevante quando nos deparamos com o fato da fotossíntese, responsável pela base da cadeia alimentar, acontecer em face de eventos quânticos. De fato, os efeitos da Mecânica Quântica sobre as novas tecnologias, assim como a diversidade de fenômenos por ela explicados parecem justificar seu estudo já no Ensino Médio, tendo em vista a formação de sujeitos críticos, capazes de pensar ações inerentes ao seu tempo histórico.

Diante do que foi apresentado, nossa pesquisa visou investigar: **“como o estudo de temas da Mecânica Quântica, dando a devida relevância ao contexto histórico, pode contribuir para a promoção do Letramento/Alfabetização Científica do aluno?”**

Assim, propusemos a seguinte hipótese: Além das diversas aplicações tecnológicas supracitadas, a Física Moderna e Contemporânea estão presentes em documentários, filmes e séries, o que faz com que os referidos temas apresentem questões sobre os quais, adolescentes e jovens estejam previamente interessados. Apresentar uma Seqüência Didática que traga discussões e reflexões desta natureza implica em maior engajamento dos estudantes, facilitando o desenvolvimento de competências fundamentais para a promoção do Letramento/Alfabetização Científica. **Eles possuem uma motivação latente para a busca de conhecimentos ligados a Mecânica Quântica e estão à espera de uma ação docente para despertá-los.**

## 1.2 AS CONSTANTES DA NATUREZA

Na perspectiva da matemática, o termo constante define uma quantidade que não possui um valor fixo em uma equação ou em qualquer processo matemático, porém, esta quantidade não se altera em um contexto específico. Na física, o termo constante se relaciona com uma quantidade física ou numérica cujo valor independe

das condições que um sistema esteja submetido permanecendo invariável no decorrer de um processo.

Uma constante física é uma grandeza física possuidora de dimensão mensurável como a velocidade da luz no vácuo ou adimensional como a razão entre a massa do próton e do elétron, ela ainda se apresenta com característica de valor geral na natureza e constante no tempo. Podemos vislumbrar uma constante física como uma característica de um material ou uma convenção como um calor específico ou a carga de um elétron. Temos as constantes que se relacionam diretamente a algum fenômeno na natureza ou a uma teoria física como mecânica quântica, a gravitação universal ou a relatividade. Podemos aglutinar estas constantes físicas em grupos bem definidos como as constantes físicas eletromagnéticas, as constantes físicas atômicas e nucleares, as constantes físico-químicas e finalmente as constantes físicas fundamentais da natureza.

Quando estudamos a eletricidade, por exemplo, é necessário utilizar a constante de Coulomb ( $k$ ) para calcular a força elétrica ou campo elétrico, porém  $k$  depende da permissividade no vácuo ( $\epsilon$ ) também constante, a qual, por sua vez, que depende da velocidade da luz ( $c$ ). Assim podemos perceber que uma constante física pode se conectar a outras constantes e transitar por diferentes áreas do conhecimento das ciências da natureza.

### 1.2.1 AS CONSTANTES FUNDAMENTAIS DA NATUREZA

Os valores das constantes fundamentais da física são ajustados a cada quatro anos pelo Grupo de Tarefa do Committee on Data for Science and Technology (CODATA), estabelecido em 1969, com precisão cada vez maior. O Grupo de Tarefa CODATA goza de um estreito relacionamento com o *Consultative Committee for Units* (CCU), uma organização da *International Bureau of Weights and Measures* (BIPM), por existir uma profunda ligação com as unidades do Sistema Internacional (SI).

Entre as ações do CODATA está a publicação periódica dos valores de constantes fundamentais e fatores de conversão de física e química para uso internacional em todos os campos da ciência e da tecnologia. A próxima Assembléia Geral da CODATA acontecerá de 27 a 28 de outubro de 2023 em Salzburgo, na Áustria.

Cientistas usam números para tentar descrever a natureza e comparar características dessa natureza umas com outras a partir de quantidades que configuramos como padrão. Assim, estes cientistas também constroem relações matemáticas entre quantidades de natureza, como a equação  $E = mc^2$ , que relaciona a energia  $E$ , a massa  $m$  de um objeto e a velocidade da luz no vácuo  $c$ . Certos valores, como o valor de  $c$  que é sempre o mesmo, aparecem freqüentemente multiplicando quantidades diferentes nas equações da física. Esses números em geral, são chamados de constantes fundamentais e de acordo com George Matsas, do Instituto de Física Teórica (IFT) da UNESP, buscam “escrever a física padrão da forma mais econômica possível, eliminando o desnecessário para enxergar mais longe”.

Excetuando a constante de Planck ( $h$ ) e a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ), não existe um consenso para descrever quais são as constantes fundamentais, porém, majoritariamente a comunidade científica inclui a esse rol, a constante de gravitação universal ( $G$ ) presente na Lei da gravitação universal newtoniana, que hoje possui valor de  $G = 6,674184 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ . Segundo Gillies (1996), a constante de gravitação universal, medida indiretamente com utilização de uma balança de torção em 1798 por Henry Cavendish (1731-1810), foi a constante da natureza que menos sofreu correções do decorrer do tempo, mesmo com o avanço tecnológico. Milyukov (2019) afirma que entre vários estudiosos no assunto, destacou-se o físico e matemático húngaro Lorand Eotvos (1848-1919) que em 1896 aprimorou a balança de torção estática de Cavendish, concebendo uma balança dinâmica ou pêndulo de torção. Este pêndulo permitiu a obtenção direta da constante de gravitação e também foi usado para provar a equivalência das massas inercial e gravitacional.

Segundo Gupta (2020), inclui-se em face da importância nas definições das unidades das grandezas fundamentais no Sistema Internacional de Unidades (SI), a constante de Boltzmann ( $k_B$ ), a constante de Avogadro ( $N_A$ ), a carga elétrica elementar ( $e$ ), a freqüência da transição hiperfina do estado fundamental não perturbado do átomo de césio 133 ( $\Delta\nu_{Cs}$ ) e a eficácia luminosa de uma radiação monocromática de freqüência  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$  ( $K_{cd}$ ).

A velocidade da luz no vácuo vale  $299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e teve seu valor medido desde a antiguidade por muitos, mas um valor mais preciso foi obtido a partir das equações de Maxwell (1831-1879) e em 1926, com Albert Michelson (1852-1931).

Estabelecida por Planck (1858-1947) e batizada por Bohr (1885-1962) em artigo publicado em 1913, a constante de Boltzmann, de fundamental importância na

termodinâmica homenageia um dos mais importantes cérebros que passaram por este planeta, Ludwig Boltzmann (1844-1906). Seu valor é  $k_B = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . A constante de Planck, que iremos obter neste trabalho seu valor experimental utilizando LEDs, fora idealizada pelo citado físico teórico alemão e promoveu a grande mudança de paradigma na ciência, que alavancou os avanços tecnológicos cotidianos. O valor atualizado da constante  $h$  (*hilfgrose – variável auxiliar em alemão*) é  $6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

Gupta (2020) descreve em quadro abaixo, as constantes fundamentais da natureza e seus valores, que dão base às unidades das grandezas físicas fundamentais do Sistema Internacional de Unidades (SI):

Tabela 1 - Constantes definidoras das unidades básicas do SI

Defining constant	Magnitude in SI units	SI base unit
Unperturbed ground-state hyperfine frequency transition of $^{133}\text{Cs}$ atom $\Delta\nu_{\text{Cs}}$	$9192\,631\,770 \text{ s}^{-1}$	Second
Velocity of light in vacuum $c$	$299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	Metre
Planck's constant $h$	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	Kilogram
Elementary charge $e$	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ A}\cdot\text{s}$	Ampere
Boltzmann constant $k$	$1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	Kelvin
Avogadro number $N_A$	$6.022\,140\,76 \times 10^{23}$	Mole
Efficacy of monochromatic radiation of frequency $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ , $K_{\text{cd}}$	$683 \text{ lm W}^{-1}, \text{ cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^3$	Candela

Fonte: GUPTA, S.V. Units of Measurement - History, Fundamentals and Redefining the SI Base Units 2ª Ed. New Delhi: Springer, 2020.

Cabe ressaltar que todas as constantes fundamentais da natureza pertencem a Física Clássica, com exceção da constante de Planck, a única que surge com o nascimento da Mecânica Quântica.

Além de ser incapaz de explicar o brilho do sol e sua coloração e ainda, o funcionamento de aparelhos eletrônicos; a Mecânica Clássica faz uma descrição superficial e aproximada dos fenômenos da natureza. Já a Mecânica Quântica vai dar uma explicação fundamental de todos os fenômenos, explicados ou não pela MC. Ou seja, a explicação física fundamental da natureza vem da Mecânica Quântica, portanto, a constante de Planck é a mais fundamental das constantes fundamentais da natureza.

Este trabalho também teve por escopo, pesquisar sobre a constante de Planck sobre seus pressupostos teóricos e empíricos, em um ponto de vista da pedagogia voltada para o Ensino Médio, idealizando uma atividade experimental que visa sua obtenção. Ainda neste contexto da teoria quântica, concebemos um produto que discorre sobre cinco problemas do século XIX não resolvidos pela teoria clássica e propomos uma seqüência didática introdutória da Mecânica Quântica neste segmento escolar.

### 1.3 O ENSINO DE FÍSICA, A METROLOGIA E O QUANTUM

Fazemos medições a todo o momento como o tempo necessário para atravessar uma rua, nossa massa ao subir em uma balança e a velocidade para não ser multado. Segundo Ribeiro (2014), o físico e filósofo austríaco Ernst Mach (1838-1916) propunha que uma medida é fruto de uma comparação com as nossas sensações a partir de um padrão. A física é baseada em medições, mas as medidas são em última análise comparações fisiológicas. Aprender Física pressupõe fazer medidas e conviver com unidades desde a primeira aula de qualquer tópico desta quantitativa área do conhecimento.

As mudanças nas Unidades do Sistema Internacional de Unidades promoveram uma nova demanda no Ensino, com a inclusão de um *ator quântico* em algumas definições. A exemplo disto, Cacaís e Loayza (2019) citam a nova definição do quilograma, que antes era definido a partir de um protótipo internacional, um cilindro de uma liga de platina e irídio e agora é definido a partir de uma constante fundamental da natureza, a constante de Planck, invariante no tempo e universal para quaisquer civilizações do Universo.

Para o público em geral, nenhuma mudança de rotina acontecerá, pois continuaremos a medir e reclamar dos valores da energia elétrica consumida, a pesar o mesmo tomate, a consumir o mesmo combustível e se atrasar no mesmo engarrafamento.

Kelvin em 1900 ao afirmar que não existia nada mais para descobrir na física e tudo o que restava era aprimorar as medições, incorre em uma histórica contradição. Mudanças no SI não impactam somente os Institutos Nacionais de Metrologia. Seguramente podemos obstar Kelvin e inferir que a adição de mais casas decimais

no valor final das medidas, que o aumento da exatidão e a precisão das medições, ajudam a promover novas descobertas e avanços tecnológicos em benefício da humanidade. Assim, nossos alunos do Ensino Médio precisam conhecer as constantes fundamentais em face das citadas mudanças.

Diariamente somos usufrutuários da Mecânica Quântica ao lado de nosso Smartphone, do nosso Laptop e ainda convivemos com os Raios-X, Ressonância Magnética, Células fotoelétricas, Sensores, Laser, etc. Estas novas tecnologias, que dela advieram, assim como a diversidade de fenômenos por ela explicados parecem justificar o estudo da Mecânica Quântica já no Ensino Médio. De acordo com Cauti (2022) em publicação na Revista Exame de maio de 2022, 23% das empresas globais desenvolvem projetos que programam tecnologias quânticas para aplicações comerciais. E ainda segundo Landi (2019), em fevereiro de 2019 estimava-se que pelo menos 30% do PIB mundial estejam diretamente relacionados à Mecânica Quântica. Em 13 de julho de 2023, havia seis empresas no mundo com valor de mercado superior a um trilhão de dólares. Cinco delas: Apple Inc (US\$ 2,996 T), Microsoft (US\$ 2,547 T), Alphabet - Google (US\$ 1,580 T), Amazon (US\$ 1,377 T) e NVIDIA (US\$ 1,135 T) simplesmente não existiriam sem a Mecânica Quântica.

A Sociedade Brasileira de Metrologia em conjunto com a Sociedade Brasileira de Física, ao publicarem uma Cartilha em 2019 sob o título: O novo Sistema Internacional de Unidades fazem uma importante consideração. Antes das mudanças instituídas pela 26ª CGPM/2018, nossos alunos após a leitura de um texto básico de ciências, conseguiam sem nenhum esforço para a percepção, descrever o que era um quilograma, definido por um protótipo que ficava em um cofre em Paris. Agora, para ele definir a mesma unidade, serão necessários novos conhecimentos e um maior nível de abstração. Para a melhor compreensão das novas definições, todo aluno deve entender o significado geral das constantes fundamentais.

De acordo com a tabela acima, as Grandezas Físicas Fundamentais têm para o novo Sistema Internacional, unidades definidas pelas Constantes Fundamentais, invariáveis no tempo como a Constante de Planck, que agora define o quilograma.

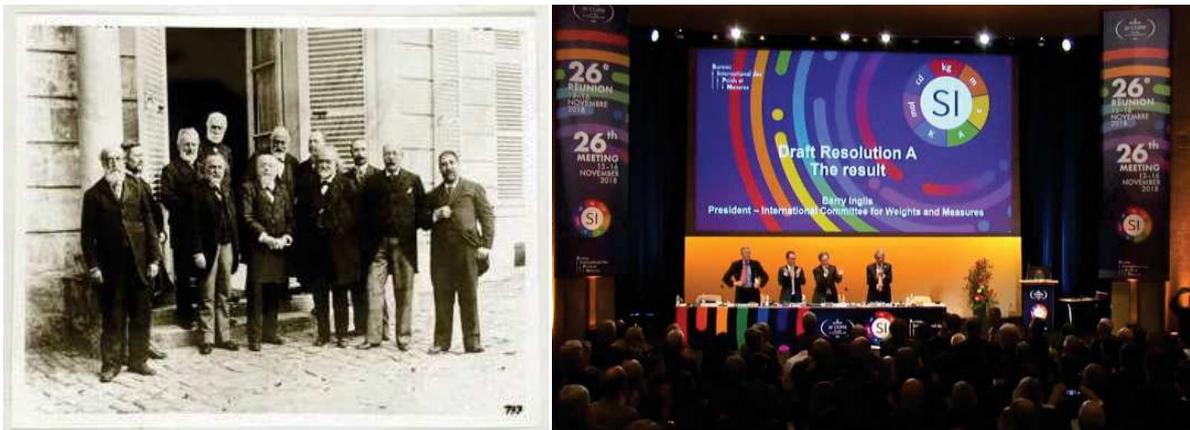
Assim temos um desafio, de inserir nossos alunos em um contexto mais atual que transcende a visão clássica da ciência.

## 1.4 O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Uma unificação internacional nas unidades de medidas sempre foi uma grande demanda, sobretudo do comércio e posteriormente também da indústria, além da eficiência dos intercâmbios científicos. Por muito tempo, cada sociedade teve seu peculiar sistema de medidas, em geral com unidades primitivas baseadas em partes do corpo humano para a definição do comprimento, por exemplo. Em face das diferenças antropométricas dos soberanos, as medidas como pés, polegadas e jardas eram usadas praticamente de maneira regional. Existem relatos de que a primeira idéia de um sistema métrico seja de John Wilkins (1614-1672), primeiro secretário e um dos fundadores da Royal Society de Londres em 1668, porém a idéia não se consolidou e a Inglaterra continuou com os diferentes sistemas de pesos e medidas. Após a Revolução Francesa houve um abandono gradual destas medidas, com uma adoção de medidas baseadas em dimensões do planeta Terra.

A Convenção do Metro (*Convention du Mètre*) em 20 de maio de 1875, em Paris, que cria o Sistema Métrico Decimal. Segundo Landim e Carvalho (2019), o Brasil estava entre os 17 Estados Membros, pois D. Pedro II era um entusiasta em ciência e tecnologia. Os governos republicanos não ratificaram a adesão do país, o que ocorreu somente em 1953. A Convenção do Metro foi corroborada em 1889, quando foram definidos os protótipos internacionais de metro e quilograma na Primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), na mesma cidade. Isto foi fomentador para a futura criação do Sistema Internacional de Unidades (SI) ocorrida na 11ª Conferência Geral de Pesos e Medidas em 1960.

Figura 1 - Membros da CIPM de 1894 e 26ª CGPM/2018 em Marselles



Fonte: <https://canalmetrologia.com.br/> e <http://www.kriss.re.kr/download/1542377872773.jpg>

Sob os termos da convenção do Metro (1875) foi instituído, segundo Landim e Carvalho (2019), o Bureau International des Poids et Mesures (Escritório Geral de Pesos e Medidas - BIPM), é uma das três organizações estabelecidas para manter o Sistema Internacional de Unidades (SI). Situado em Saint-Cloud, França, se constitui no o órgão técnico da Estrutura. Sua função precípua é desenvolver pesquisas e normas metrológicas e garantir a uniformidade, em todo o mundo, das unidades de medida, o que é feito pela ação direta ou submissão de propostas para a CGPM.

Figura 2 - Escritório Geral de Pesos e Medidas - BIPM



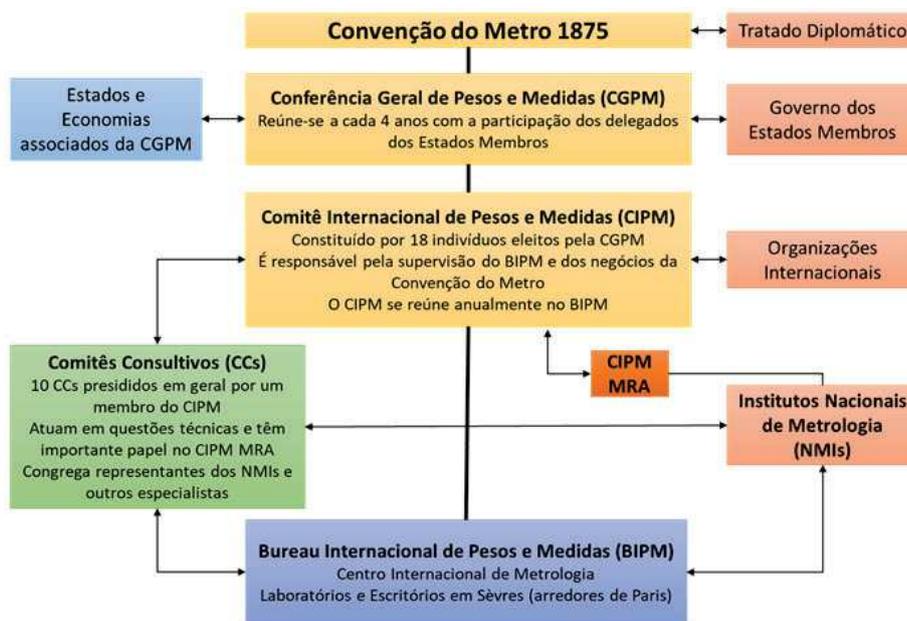
Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Escrit%C3%B3rio\\_Internacional\\_de\\_Pesos\\_e\\_Medidas](https://pt.wikipedia.org/wiki/Escrit%C3%B3rio_Internacional_de_Pesos_e_Medidas)

O segundo componente da Estrutura é a Conferência Geral dos Pesos e Medidas (*Conférence Générale des Poids et Mesures - CGPM*). Ocorre a cada quatro anos e é composta de delegados oficiais de Estados Membros da Convenção do Metro, sendo a maior autoridade internacional em metrologia, decidindo questões importantes como a adoção de novos padrões metrológicos.

O terceiro componente é o Comitê Internacional de Pesos e Medidas (*Comité International des Poids et Mesures - CIPM*). É composto de 18 membros cientistas e metrologistas, cada um de um Estado Membro diferente, e executa as decisões da CGPM. Realiza encontros anuais no BIPM, fazendo sua supervisão e emitindo relatórios referentes às situações administrativas e financeiras, direcionados aos governos dos países-membros da Convenção do Metro.

O sistema Internacional define sete unidades de grandezas físicas fundamentais, também chamadas grandezas de base, e outras unidades de várias grandezas que daí derivam. Conforme a publicação do Inmetro: Conferência Geral de Pesos e Medidas de 2023, as unidades de base do SI são o metro para a grandeza comprimento, o quilograma para a massa, o segundo para o tempo, o ampere para a intensidade de corrente elétrica, o kelvin para a temperatura termodinâmica, o mol para a quantidade de matéria e a candela para a intensidade luminosa.

Figura 3 - Organograma da Convenção do Metro



Fonte: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/metrologia-cientifica/foruns-comites-e-redes/cgpm>

Em novembro de 2018 durante a 26ª CGPM, a Metrologia deu um passo histórico, pois o Escritório Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) apresentou novas definições para o quilograma, ampère, kelvin e mol além de revisões nas definições do segundo, metro e candela. Essas mudanças se tornaram efetivas a partir de 20 de maio de 2019, o dia Mundial da Metrologia e aniversário da Convenção do Metro.

## 1.5 AS MUDANÇAS NO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

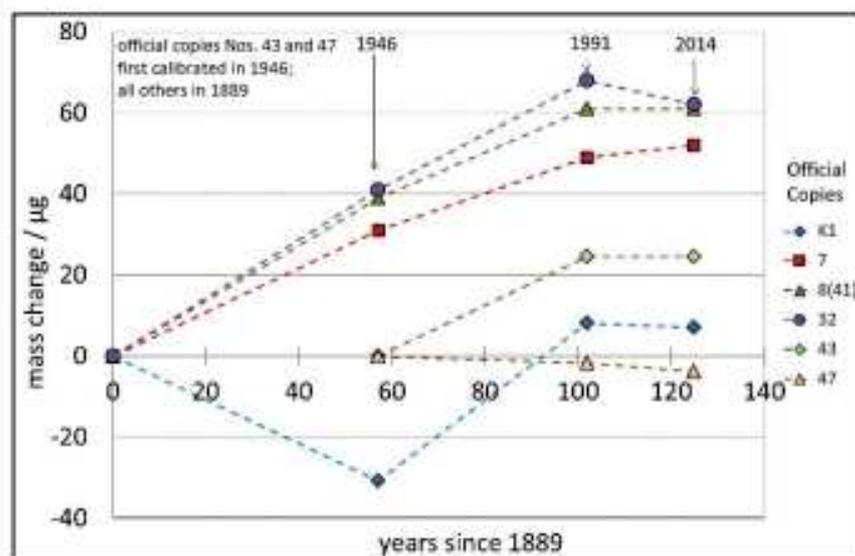
Conforme O *Novo Sistema Internacional de Unidades*, publicação da Sociedade Brasileira de Metrologia e da Sociedade Brasileira de Física, passa a vigorar na data supracitada, as mudanças nas definições de grandezas físicas fundamentais. Tais mudanças evidenciam a importância do conhecimento por parte

de alunos da educação básica, pelo menos de rudimentos de Física Moderna, como a constante de Planck, que foi um divisor de águas no pensamento científico e será abordado em capítulos subseqüentes. Landim e Carvalho (2019), publicam em Cadernos de Metrologia- Inmetro 2019, as mudanças implementadas abaixo, na 26ª CGPM.

### 1.5.1 O QUILOGRAMA

Anteriormente, a unidade de massa era definida por um protótipo, a última grandeza de base do SI definida por um artefato material, o protótipo internacional do quilograma ou IPK (International Prototype Kilogram), com seis cópias mantidas no BIPM e instituídas na 1ª CGPM, de 1889. Um cilindro de uma liga de platina e irídio com 39 milímetros de altura cuja massa deve ser igual a 1 decímetro cúbico (um litro) de água destilada a 4,44 °C. Segundo Cacaís e Loayza (2019), as seis cópias oficiais e o IPK são mantidos, cada um, em uma campânula tripla de vidro e em condições controladas do ar ambiente, juntos dentro de um cofre. Comparações efetuadas mostraram uma variação na massa do IPK de 50 µg desde o seu estabelecimento um século antes.

Gráfico 1 - Variação de massa das cópias do IPK



Visando a não dependência de um padrão que não se mostrou constante, após cento e trinta anos (2019) o valor do quilograma passou a ser estabelecido nos termos de uma constante da natureza invariável, a constante de Planck ( $h = 6,62607015 \times 10^{-34}$  J.s) a partir do “experimento da balança de Watt” que mostra um equilíbrio entre as forças gravitacional e eletromagnética, com medições utilizando fenômenos quânticos. Este instrumento foi batizado balança de Kibble em homenagem ao seu inventor, o físico britânico Bryan Kibble (1938-2016).

### **1.5.2 O AMPERE**

Adotado como unidade de intensidade de corrente elétrica na 9ª CGPM de 1948, era a corrente elétrica invariável que, mantida em dois condutores retilíneos, paralelos, de comprimento infinito e de área de seção transversal desprezível, situados no vácuo, a um metro de distância um do outro, produz entre esses condutores uma força igual a  $2,0 \times 10^{-7}$  N por metro de comprimento desses condutores. Agora é definido a partir da carga elementar ( $1,602176634 \times 10^{-19}$  C) e da constante de Planck.

### **1.5.3 O KELVIN**

Definida na 13ª CGPM em 1968 como unidade da temperatura termodinâmica, era definida como 1/273,16 da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água. O kelvin, símbolo K, continua a ser a unidade de temperatura termodinâmica, mas seu valor será estabelecido a partir da constante de Boltzmann ( $K_b = 1,380\,649 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>)

### **1.5.4 O MOL**

Adotada pela 14ª CGPM em 1971, equivalia à quantidade de substância de um sistema que contém tantas entidades elementares quantos átomos em 0,012

quilograma de carbono 12. Definimos atualmente como quantidade de átomos, de moléculas, de íons, de elétrons a partir da constante de Avogadro ( $N_A = 6,02214076 \times 10^{23}$  partículas).

### **1.5.5 O SEGUNDO**

Equivalia à duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de Césio 133 em repouso a uma temperatura de 0K. Agora a unidade de tempo do SI foi reescrita como o valor numérico da frequência de transição hiperfina do estado fundamental não perturbado do átomo de césio 133, em 9 192 631 770 Hz.

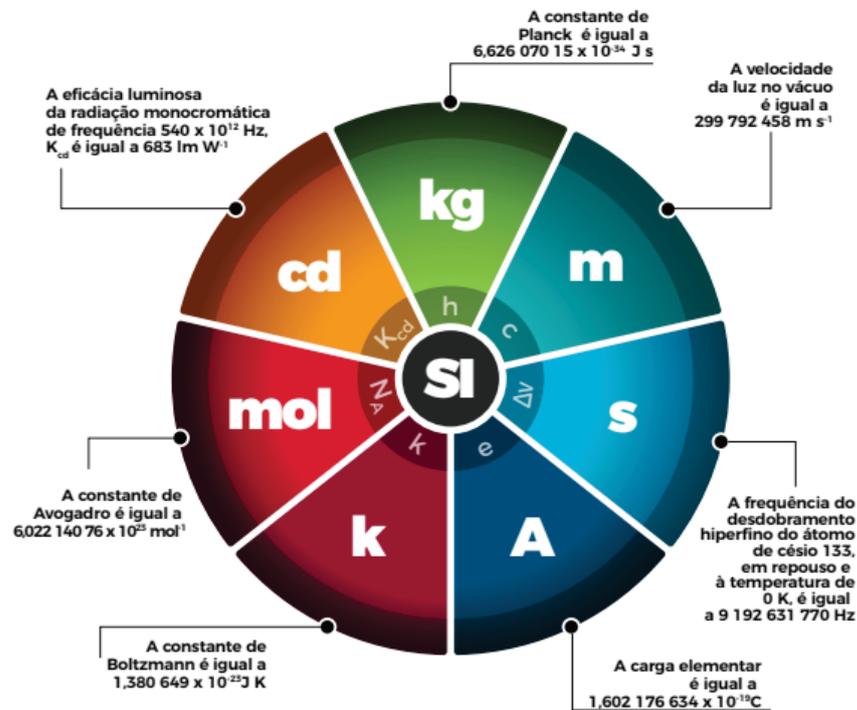
### **1.5.6 O METRO**

Até 1960 a unidade metro era definida por uma barra de platina, porém, em 1983 na 17ª CGPM, o metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de  $1/299\,792\,458$  de segundo. O metro foi a primeira unidade de base do SI, a ser concebida a partir de uma constante física fundamental, a constante  $c$ .

### **1.5.7 A CANDELA**

Estabelecida em 1979, na 16ª CGPM, candela (cd) é a unidade da grandeza de base, intensidade luminosa do SI. Equivalia à intensidade luminosa, numa dada direção, emitida por uma fonte de radiação monocromática de frequência igual a  $540 \times 10^{12}$  Hz e cuja intensidade energética radiante, na mesma direção, é de  $1/683$  watt por esferorradiano. Foi redefinida como unidade de intensidade luminosa em uma dada direção no SI, fixada pelo valor numérico da eficácia luminosa da radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  Hz, exatamente igual a 683, quando se expressa em unidades do SI,  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{CdSr}$  ou  $\text{s}^3 \text{CdSr W}^{-1}$ , onde o quilograma, o metro e o segundo são definidos em função da constante de Planck, da velocidade da luz no vácuo e da frequência do Césio 133.

Figura 4 - As mudanças no Sistema Internacional de Unidades



Fonte: [https://metrologia.org.br/wpsite/wp-content/uploads/2019/07/Cartilha\\_O\\_novo\\_SI\\_29.06.2029.pdf](https://metrologia.org.br/wpsite/wp-content/uploads/2019/07/Cartilha_O_novo_SI_29.06.2029.pdf)

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Vosgerau e Romanowski (2014), os estudos de revisão visam organizar e resumir as principais obras atinentes a um determinado tema, servindo de subsídio e referência para trabalhos correlatos. Comparam pesquisas equivalentes, mostram evoluções teóricas, além de apontar tendências das abordagens das práticas educativas. Tais referências podem se materializar como livros, sites, revistas, teses, ou qualquer aparato que possa contribuir na pesquisa. Escolhemos a partir de um rol de tipos de revisão da literatura, a Revisão Narrativa, que não utiliza critérios rígidos e sistemáticos para a busca de materiais embasadores, estabelecendo segundo Vosgerau e Romanowski (2014), relações da pesquisa com produções anteriores de maneira não exaustiva, atendendo a dois propósitos, a contextualização do problema de pesquisa e a análise de possibilidades para a composição do referencial teórico do trabalho.

Nesta seção apresentaremos os aspectos pedagógicos do tema principal deste trabalho que possui o título: Prelúdio do Quantum: As cinco rachaduras na Física Clássica que levaram à Teoria Quântica. O embasamento teórico sobre aspectos

relacionados à Física propriamente dita estará contido na seção 3 desta Dissertação, a Fundamentação Teórica.

Inicialmente nossa busca bibliográfica por uma base pedagógica para o desenvolvimento deste projeto, visava respostas para o problema de pesquisa: Como o estudo de temas da Mecânica Quântica, dando a devida relevância ao contexto histórico, pode contribuir para a promoção do Letramento/Alfabetização Científica do aluno?

Assim, adentramos na literatura sobre assuntos como teorias de aprendizagem e suas correntes filosóficas, História e Filosofia da Ciência, Alfabetização Científica, entre outros tópicos.

Na medida do desenvolvimento do trabalho, o problema de pesquisa ganhou maior robustez, tanto no segmento pedagógico quanto no conteúdo de Física. Se inicialmente o objetivo era discorrer sobre a constante de Planck e seu protagonismo na Metrologia, na Radiação do Corpo Negro e no Efeito Fotoelétrico, outros três temas foram acrescentados: Capacidade Térmica molar dos sólidos, Linhas espectrais de emissão e absorção, e Radioatividade. Assim, foi concebido um bem sedimentado Produto Educacional que consta de uma sequência didática de oito aulas, uma prática experimental com o cálculo da constante de Planck e um e-book de mesmo título do trabalho.

O tema deste trabalho aborda em um mesmo momento, cinco problemas sem solução até o surgimento da Teoria Quântica em 1900. Este pesquisador não encontrou algo similar na literatura, somente abordagens individualizadas, com maior frequência a respeito de Radiação do Corpo Negro e Efeito fotoelétrico. Assim reservamos este momento, como relatado acima, para discorrer sobre estudos prévios que abordam os aspectos pedagógicos que sustentam esta dissertação e o Produto Educacional.

## **2.1 ALFABETIZAÇÃO CIENTÍFICA**

Sasseron e Carvalho (2011) afirmam que na literatura internacional ligada ao Ensino de Ciências, encontramos para o termo Alfabetização Científica, um espectro de significados que converge para uma definição próxima de Ensino de Ciências voltado para uma capacitação cidadã dos alunos para que os mesmos vivam em sociedade. Assim as expressões *Alfabetización Científica* e *Alphabétisation*

*Scientifique* podem ser literalmente traduzidas para Alfabetização Científica, e o termo *Scientific Literacy* como Letramento Científico.

Assim, segundo Sasseron e Carvalho (2011), a literatura nacional de Ensino de Ciências aceita o termo **Alfabetização Científica** (Brandi e Gurgel, 2007; Auler e Delizoicov, 2001), aceita **Letramento Científico** (Mamede e Zimmermann, 2007; Santos e Mortimer, 2001), e ainda aceita a derivação: **Enculturação Científica** (Carvalho e Tinoco, 2006; Mortimer e Machado, 1996). Todos estes termos compartilham o mesmo valor semântico supracitado.

## 2.2 HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA E AS ATIVIDADES EXPERIMENTAIS

Neste trabalho ressaltamos cinco problemas evidenciados no século XIX e não dirimidos pela Teoria Clássica, porém explicados por uma nova e incipiente percepção da natureza que surge a duas semanas do século XX. A apresentação destes problemas seguiu uma cronologia contextualizada em cada época, onde se inserem vários fatores como econômicos, políticos e culturais, harmonizados e conduzidos pela História da Ciência. Nesta esteira de evoluções da Física, imprescindível foi a participação de célebres físicos teóricos, mas, no mínimo devemos a mesma reverência à cientistas que tinham notadamente suas carreiras construídas no trabalho experimental.

Neste diapasão, pelo fato do cálculo da constante de Planck utilizando-se LEDs em laboratório didático fazer parte deste trabalho, reservamos também este momento para mostrar o espectro de relevância das atividades experimentais em ambiente escolar, que vai do status extrema importância até o de simples participação como coadjuvante no ensino e na aprendizagem de ciências. Aproveitamos também esta oportunidade para apresentar conceitos importantes como o de Natureza da Ciência e suas relações com a História e Filosofia da Ciência, discutindo sua efetividade na aprendizagem. Podemos inferir a importância da História e Filosofia da Ciência na formação de professores, no ensino de ciências e no conseqüente processo de alfabetização científica de uma população, conforme argumenta Matthews (1994). Infelizmente não percebemos esta importância concretamente consubstanciada em currículos, se limitando ainda às iniciativas individuais de alguns professores, com abordagens que, em geral, limitam-se às curiosidades bibliográficas de atores das construções teóricas do assunto abordado.

Confesso que apesar de trabalhar toda minha vida na preparação de alunos para vestibulares extremamente conteudistas e bem seletivos, sou um entusiasta da História e Filosofia da Ciência. Mesmo não sendo um especialista nestas áreas do conhecimento, faço uso destes saberes na apresentação de alguns conteúdos do Ensino Médio, obtendo invariavelmente, boa recepção.

A minha experiência me permite afirmar que a História da Ciência, pelo menos com breves citações para alguns alunos e turmas, ou na descrição mais concatenada da evolução dos conceitos científicos no decorrer do tempo para outros; atrai até os mais indiferentes. Torna a aula mais sedutora, mais alcançável, pulverizando o medo da equação mais complexa. Tira a frieza dos modelos matemáticos e aproxima o incauto aluno das grandezas físicas do cotidiano, antes obscuras ou invisíveis. A História e a Filosofia da Ciência não têm somente o papel de ilustração ou um mero pano de fundo prévio, para o depósito truculento e bancário de um conteúdo no aluno. Concatenam idéias, justificam descobertas em face do momento político ou as demandas sociais daquele presente. Não raro, nuances e pormenores da vida de célebres cientistas fascina qualquer estudante.

Conseguimos uma atenção incomum dos nossos alunos descrevendo Galileu com sua idealização de um primitivo instrumento óptico apontando para o místico céu protegido por leis próprias. Apesar de religioso, o sábio e polêmico filho de Vincenzo Galilei, vai de encontro com a igreja católica, contestando dogmas como a “esfericidade divina” dos corpos celestes, que seres mortais não deviam investigar. Direcionando o rústico telescópio para a lua e para as “orelhas” de Saturno, desfere um golpe mortal na influência aristotélica e religiosa dos séculos XVI e XVII, unindo os mundos sub e supralunares e instituindo o conceito de universalidade.

Extraímos também dos outrora desatentos alunos, concentração incomum ao apresentá-los um Galileu introdutor, mesmo que de maneira despretensiosa, do método científico. Ele afinal prepara terreno para uma das mentes mais brilhantes que passaram por este planeta, Sir Isaac Newton, que estabelece quatro regras para o raciocínio em Filosofia Natural, a saber: a simplicidade, a causalidade, a universalidade e o reducionismo.

História e a Filosofia da Ciência têm registros muito fortes em todo desenvolvimento da Gravitação Universal, seguramente a primeira questão que a Humanidade se deparou, o primeiro momento do “fazer ciência”. Aristarco e Ptolomeu, mesmo não contemporâneos, fizeram colidir o geo com o heliocentrismo, dentro de

uma micro análise do nosso sistema solar. Com o tempo, nossa capacidade investigativa aumentou na medida da evolução dos instrumentos. Lunetas, telescópios e interferômetros sucederam nosso olho “míope” embriagados de dogmas e religiosidades. Agora temos “olhos de ver”, que não aumenta a presbiopia com o tempo.

Assim, podem-se perceber claramente as presenças de História e Filosofia da Ciência nos tópicos objetos deste trabalho, mesmo quando em alguns momentos o caráter quantitativo prevalecia. Tais presenças estão tanto no trabalho escrito com rigor conceitual destinado a professores de Física do Ensino Médio, quanto nas oito aulas da seqüência didática que integra este trabalho, destinadas para alunos do mesmo ciclo educacional. A supracitada reverência aos mentores de históricas atividades empíricas encontra vínculo com as atividades experimentais de cálculo da constante de Planck e demonstração do efeito fotoelétrico utilizando luz ultravioleta quando das atividades com discentes na aplicação do produto educacional.

Independente do tempo de formação, professores experientes e novatos relatam suas concepções a respeito dos objetivos das atividades experimentais:

- Estimular a observação acurada e o registro cuidadoso dos dados;
- Promover métodos de pensamento científico;
- Desenvolver habilidades manipulativas;
- Treinar a resolução de problemas;
- Esclarecer a teoria e promover a sua compreensão;
- Vivenciar o processo de encontrar fatos por meio da investigação chegando aos seus princípios;
- Motivar os alunos

Somando-se este rol que não é finito, podemos propor o desenvolvimento de experimentos que incluam abordagem com reflexão crítica sobre as ciências e o processo da construção do conhecimento científico. Devem também estar bem estabelecidas as diversas formas de concepção do papel do professor nas diversas atividades experimentais.

Solomon (1980) relata que o ensino de Ciências deve ocorrer no laboratório e temos quase uma unanimidade na comunidade escolar e acadêmica quanto a esta prática e dogma. Toda a empreitada para a aquisição de um laboratório e seus custos

de implementação e manutenção, é justificada e é para os docentes, um pressuposto universal que é um bom incremento para um ensino de ciências de qualidade.

Em 1956 em plena guerra fria e sob a sombra de ter sido ultrapassado tecnologicamente pela União Soviética, evidenciado pelo lançamento do satélite "Sputnik I"; os Estados Unidos lançam o Comitê de Estudos de Ciências Físicas, o PSSC (Physical Science Study Committee). Este projeto teve abrangência nacional e contou com mais de 600 professores e pesquisadores de várias Instituições de Ensino e foi materializado no MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts). Coube a esta empreitada a produção de importantes livros didáticos, filmes instrutivos e materiais para laboratório. Este acervo foi utilizado pelo mundo, inclusive no Brasil, pelo menos durante as duas décadas seguintes. Como expressa Hodson (1988):

É interessante especular por que o trabalho prático adquiriu um *status* tão elevado na mitologia da profissão do ensino de ciências. Talvez porque os experimentos sejam tão largamente utilizados que os professores fiquem condicionados a considerá-los como parte necessária e integral do ensino de ciências. (HODSON, 1988, p. 53).

Baseado nestes pressupostos, muitos currículos foram influenciados, ganhando uma importância exagerada, uma concepção confusa e de pequeno valor educacional.

Hodson (1988) não sugere uma exclusão do trabalho prático do currículo, mas uma reavaliação crítica de três ações diferentes, confundidas e indiscriminadamente usadas: os papéis do trabalho prático, do trabalho em laboratório, e dos experimentos no ensino de ciências.

Nem todo trabalho prático é exercido na bancada do laboratório e nem todo trabalho de laboratório inclui experimentos. Assim, temos a possibilidade da sala de aula e do laboratório protagonizarem atividades teóricas e práticas. Este autor, por exemplo, utilizou o laboratório para o cálculo da constante de Planck e a sala de aula para a demonstração do efeito fotoelétrico.

Um currículo de ciências deve ser conforme Hodson (1988), filosoficamente válido e pedagogicamente adequado, dirimindo as supracitadas distinções e promovendo o aprender ciência, o aprender sobre ciência e o fazer ciência.

Cabe ressaltar dois questionamentos. Qual o papel do experimento na aprendizagem de certo conteúdo e qual o papel do experimento como método de ensino?

Complementa-se ainda que enquanto os experimentos na ciência são conduzidos principalmente com o objetivo de desenvolver teorias, os experimentos no ensino de ciências, nosso objeto, têm o condão de promover uma série de funções pedagógicas como ensinar ciências, ensinar sobre ciências e ensinar como fazer ciências.

Compete ao professor escolher as melhores ferramentas para uma aprendizagem significativa do ensino de ciências. Muitas vezes o laboratório didático ou uma atividade experimental em um ambiente diverso não é a garantia do sucesso na aprendizagem de certo conteúdo. Segundo Hastenreiter *et al.* (2017):

Usualmente, os métodos ativos de ensino-aprendizagem são entendidos como se defendessem a ideia de que os estudantes aprendem melhor por experiência direta. Borges (2002) acredita que embora sendo verdadeiro em algumas situações, esse entendimento é uma simplificação grosseira, como apontam os trabalhos baseados nas ideias de Dewey, Piaget e Vigotsky, entre outros. O importante não é a manipulação de objetos e artefatos concretos, e sim o envolvimento comprometido com a busca de respostas/soluções bem articuladas para as questões colocadas. (HASTENREITER *et al.*, 2017, p. 1198).

Com relação ao conceito de Natureza da Ciência, Ledermann (1992) relata algumas concepções inapropriadas de alunos e professores a respeito do conceito de ciência como:

- Visão linear e progressiva
- Método científico universal
- Teoria vem do experimento
- Cientistas são neutros

Podemos inferir que Natureza da Ciência constitui em um conjunto de subsídios que propiciam a construção, manutenção, promoção e o desenvolvimento do conhecimento científico. Salientar ainda que, neste diapasão, esta natureza da ciência é influenciada interna e externamente. O método científico e a relação entre concepções teóricas e atividades experimentais, podem denotar questões internas. Já elementos sociais, culturais, religiosos e políticos na aceitação ou rejeição de idéias científicas; traduzem questões externas.

O entendimento pleno do conceito de Natureza da Ciência se torna imprescindível para definição de currículos e a conseqüente formação de professores e alunos dos diferentes segmentos do conhecimento humano, munindo cidadãos com criticidade e protagonismo no mundo. Assim, discussões sobre Natureza da Ciência no ensino tem sido comum no âmbito acadêmico e político.

Na atualidade, segundo Moura (2014) a literatura mostra o debate entre duas vertentes ao definirem suas visões sobre a conceituação da Natureza da Ciência. De um lado temos um fruto do *consenso* após discussões de docentes e discentes. Este fruto é um rol de princípios construtores do conhecimento científico. De outro lado temos defensores do uso do conceito de semelhança familiar (*family resemblance*) para caracterizar Natureza da Ciência.

Moura (2014) ainda afirma que pesquisadores como William F. McComas, Stephen Pumfrey e Daniel Gil-Peres, estabelecem um rol de aspectos consensuais sobre natureza da Ciência. Ele afirma que a ciência não é estática na busca de dirimir os fenômenos naturais. Ou seja, a Ciência não está inerte, está em constante transformação, onde modelos são a todo momento testados. Esses modelos podem ser ratificados, retificados ou descartados. Afirma ainda que não existem regras universais para se fazer ciência, pois um mesmo fenômeno pode ser observado sob vários ângulos e mudanças de metodologia pode promover uma evolução conceitual. Moura continua a discorrer sobre a natureza da ciência:

A teoria não é conseqüência da observação/ experimento e vice-versa” em face da epistemologia contemporânea pregar que a relação entre teoria e experimento é mais complexa do que relata o senso comum, que a teoria é fruto do experimento. Chalmers condena o indutivismo ingênuo, pois segundo ele a observação é acompanhada de expectativas e concepções prévias. Cabe ressaltar que a Ciência não se faz sem teoria e experimento e os modelos são sempre estabelecidos conforme demandas atuais. Ou seja, o método científico não segue uma receita de etapas pré-definidas. (MOURA, 2014, p. 34).

A Ciência não é neutra e sim, influenciada por um universo onde fazem parte os contextos social, cultural e político. Neste universo, segundo Moura (2014), a pesquisa e o pesquisador também estão inseridos.

E continua:

Os cientistas utilizam imaginação, crenças pessoais, influências externas, entre outros para fazer Ciência”, haja vista eles serem seres humanos comuns, com suas qualidades e defeitos, com seus erros e acertos, com

convicções políticas e religiosas. Ele não faz Ciência neutra e sem influências. (MOURA, 2014, p. 35).

Moura (2014) prossegue afirmando que autores como Eflin, Irzik e Nola, relatam que a Ciência é tão rica e dinâmica que não cabe descrevê-la com um conjunto estático de regras. Para eles a Ciência é composta por variadas áreas de estudo tão diferentes, que seria difícil definir aspectos e concepções consensuais que descrevam fidedignamente todas essas áreas.

A contribuição da História e da Filosofia da Ciência para aperfeiçoar o ensino tem sido quase um pensamento comum entre educadores, pesquisadores e historiadores. Isto tem se concretizado por um aumento significativo de trabalhos publicados sobre o tema. A título de exemplo, Moura (2014) detalha como ultimamente, a inserção da História e Filosofia da Ciência vêm aprimorado as concepções de estudantes e professores sobre a natureza do conhecimento científico, discutindo temas como:

- A História promove uma melhor compreensão dos conceitos e métodos científicos;
- Abordagens históricas relacionam o desenvolvimento do pensamento individual com desenvolvimento das idéias científicas;
- A História da Ciência é intrinsecamente valiosa. Episódios importantes na História da Ciência e da cultura – a Revolução Científica, darwinismo, a descoberta da penicilina, entre outras coisas – deveriam ser familiares a todos os estudantes;
- A História é necessária para compreender a natureza da Ciência;
- A História contrapõe o cientificismo e o dogmatismo que são comumente encontrados em textos científicos e aulas de Ciências;
- A História, pela análise da vida e da época dos cientistas, humaniza os assuntos da Ciência, fazendo-os menos abstratos e mais interessantes para os estudantes;
- A História permite que sejam feitas relações entre tópicos e disciplinas da Ciência, assim como com outras disciplinas acadêmicas;
- A História fornece a natureza integradora e independente das conquistas humanas.

Assim, Filosofia e História da Ciência estão em completa simbiose com a Natureza da Ciência, unidas por estradas bem sedimentadas, onde as primeiras promovem as compreensões e as últimas, as evoluções conceituais. A Filosofia e História da Ciência também estão presentes nas formulações de modelos científicos e na formulação do empirismo que corrobora, retifica ou descarta àqueles modelos com o passar do tempo, promovendo a evolução da Ciência.

Consolidamos o entendimento que a Natureza da Ciência reúne os elementos envolvidos na construção do conhecimento científico, desde questões internas como a relação entre teoria e observação e externas como a individualidade do cientista e o seu habitat no arcabouço social, cultural, religioso e político.

Sabemos ainda da convergência entre os educadores e pesquisadores no que se refere à importância da Natureza da Ciência e a inserção da História e da Filosofia da Ciência como meio. O desafio para estes profissionais é como fazê-lo.

Portanto, em face destas buscas na *academia e chão da fábrica*, estarem em curso no Brasil e no exterior, a construção do conhecimento científico possui boas perspectivas e a relação Natureza, História, Filosofia e Ensino de Ciências vislumbram no futuro, uma perfeita ressonância.

### **2.3 CORRENTES FILOSÓFICAS E TEORIAS DE APRENDIZAGEM**

Este trabalho tem por principal mister, a apresentação de tópicos de Física Moderna para o Ensino Médio, que se somará ao rol de estratégias que objetivam à aquisição plena de um determinado conhecimento, enriquecendo a estrutura cognitiva do nosso alvo: o aluno.

Neste diapasão, vemos a necessidade de conhecer com razoável profundidade, este terreno pedagógico como as correntes filosóficas e as teorias da aprendizagem. Assim, após pesquisa sobre este importante e necessário assunto, podemos estabelecer a corrente e a teoria que se adéquam ao tópico educacional Mecânica Quântica no Ensino Médio, objeto deste trabalho.

Moreira (2019) afirma que uma teoria é uma sistematização de uma área do conhecimento, visando facilitar seu entendimento e nesse sentido, o mesmo autor especifica que uma teoria da aprendizagem é uma tentativa de organizar os conhecimentos relativos à aprendizagem. Assim, o uso de uma coerente Teoria da

Aprendizagem ou Corrente Filosófica expõe o ponto de vista do professor sobre uma melhor abordagem, estabelece quais as variáveis relevantes a serem investigadas e quais as perguntas mais significativas desencadeadoras de um eficaz processo ensino-aprendizagem.

Com relação às várias Teorias da Aprendizagem (TA), capitaneadas por célebres autores; elas podem ser aglutinadas em três Correntes Filosóficas (CF), a saber: a Comportamentalista, a Cognitivista e a Humanista. Cabe ressaltar que nem sempre enquadrámos uma TA em apenas uma CF. Segundo Moreira (2019), existem teorias ou autores “fronteiriços” como Hull (1884-195) e Hebb (1904-1985) que transitam entre a corrente Comportamentalista (Behaviorista) e a Cognitivista e ainda o próprio Freire (1921-1997) e Ausubel (1908-2008) que orbitam entre o Cognitivismo e o Humanismo. Faremos um breve relato sobre as principais Correntes Filosóficas.

O Comportamentalismo (Behaviorismo) está calcado na observação das respostas dos alunos em face dos estímulos externos e as respectivas conseqüências, positivas ou negativas. Existe uma hierarquia entre professor e aluno e a aprendizagem se dá em sentido único. A avaliação consiste em verificar se ao final da intervenção do instrutor, o instruendo adquiriu o devido comportamento esperado. Caso positivo, ocorreu a aprendizagem. Podemos citar como exemplo dessa corrente, Pavlov (1849-1936), Watson (1878-1958) e Thorndike (1874-1949).

O Cognitivismo enfatiza o ato de conhecer. Tem seu surgimento contemporâneo e em oposição ao behaviorismo. O foco está na atividade mental do aluno. Entre o estímulo e resposta está a conduta do aluno, influenciada por variáveis intervenientes como hábitos, crença, motivação, decisão e compreensão. A aquisição do conhecimento está no ato de pensar, pois os dois, aluno e conhecimento estão no mesmo patamar, tendo o professor como facilitador desta aquisição. Como representantes desta corrente filosófica, temos mentores de teorias como Piaget (1896-1980), Bruner (1915-2016) e Vigotsky (1896-1934).

No Humanismo a ênfase do ensino é centrada no aprendiz, que no mesmo patamar do professor e junto dele, buscam o conhecimento. A auto-realização do aluno é primordial e na busca do seu crescimento pessoal e são relevantes além do intelecto, seus sentimentos, pensamentos e ações. Kelly (1905-1967) e Rogers (1902-1987) são bons exemplos desta corrente.

Assim, ressalto que antes da execução deste trabalho, foi imprescindível a análise das características das principais Teorias de Aprendizagem e das Correntes

Filosóficas. Porém os teóricos que, na visão deste professor/pesquisador, mais coadunam com assunto Mecânica Quântica no Ensino Médio, são autores que transitam em entre o Humanismo e o Cognitivism, falamos da Aprendizagem Significativa idealizada por Ausubel (1908-2008) e Novak (1932-2023).

No entanto, temos que dar vozes à multiplicidade de realidades encontradas pelos professores. Este espectro se manifesta nos indicadores coletivos e individuais dos alunos, nas regionalidades de nosso país, nas diferentes estruturas escolares e na individualidade do próprio docente em sua prática. Assim, o sustentáculo teórico da aplicação deste Produto Educacional, estruturados com a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e Novak, não supera o status de sugestão. Bem porque, Moreira (2009) estabelece didaticamente, um rol de teorias de Aprendizagem e Correntes Filosóficas, onde o professor-leitor terá liberdade de escolha de embasamentos, em face daquelas peculiaridades.

A aprendizagem pode ser categorizada por aprendizagem cognitiva, afetiva e psicomotora. A primeira se estabelece pelo armazenamento organizado de informações na memória do aprendiz, enriquecendo a citada estrutura cognitiva. Focaliza a cognição, ou o ato de conhecer. A segunda categoria valoriza experiências como prazer, dor, satisfação, ansiedade, que evidentemente influenciam a aprendizagem. A terceira está relacionada às respostas musculares nas ações físicas de treino e prática.

A aprendizagem significativa apregoada por Ausubel (1918-2008) que prepondera neste trabalho, só pode ocorrer segundo Moreira (2019), se o aprendiz possui algum conhecimento prévio e, principalmente, se houver uma predisposição do mesmo para tal. Em outras palavras, é preponderante na aprendizagem, aquilo que o aluno já sabe, cabendo ao professor aprimorar ou modificar tais concepções prévias.

Moreira (2019) faz uma distinção entre a Aprendizagem Significativa e, o ele que intitula Aprendizagem Mecânica. Na Significativa, o conteúdo apreendido ancora-se nos subsunçores que têm relação lógica com a nova informação. Na Mecânica, a aprendizagem nova tem pouca ou nenhuma interação com conceitos relevantes existentes na Estrutura Cognitiva e não se ligam a subsunçores, determinando um conhecimento sem longevidade. A Aprendizagem Significativa, de acordo com Silva e Schirlo (2014), é o processo pelo qual uma nova informação relaciona-se com um aspecto relevante existente na Estrutura Cognitiva do indivíduo, ou seja, nos

Subsunçores. A Estrutura Cognitiva é uma estrutura hierárquica de conceitos que são representações de experiências sensoriais.

Silvia e Schirlo (2014) apontam que diante das constantes mudanças no mundo globalizado, em todas as áreas do conhecimento, o cidadão deve ter um letramento científico mínimo capaz de atender suas demandas, e isto, passa pela educação. Assim, deve o profissional de educação ter a voluntariedade com disciplina consciente em aprimorar-se, segundo Alarcão (2001), para a missão de atuar na Escola do século XXI.

Silvia e Schirlo (2014) relatam que o professor deve estar atento para a pesquisa educacional e ter familiaridade com a literatura que fundamenta o processo de ensino e aprendizagem, e neste diapasão, intuem que a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel pode contribuir no ensino de Física.

Moreira e Masini (2006) descrevem que Estrutura Cognitiva é uma *região* de compreensão que possui pontos de ancoragem aos novos conhecimentos, acolhendo e organizando todas as informações. Conteúdos previamente apropriados que possuem alguma conexão com o novo ensinamento, proporcionam grande potencial para a ocorrência da Aprendizagem Significativa. Em outras palavras, Ausubel (1973) afirma que Aprendizagem Significativa é um processo pelo qual um novo conteúdo se relaciona à estrutura Cognitiva do estudante. Seus conhecimentos prévios integram-se de forma significativa com o novo conhecimento, provocando mudanças, enriquecimento da própria Estrutura Cognitiva. A estes pontos de ancoragem dos novos conhecimentos na Estrutura Cognitiva organizada e com hierarquia conceitual, local onde estão as experiências prévias do estudante; Ausubel (1973) denomina Subsunçor. Silvia e Schirlo (2014) exemplificam que o conhecimento prévio do conceito de posição pode servir como subsunçor para novos conceitos como o de velocidade e aceleração.

Descrevendo com outros termos, Ausubel, Novak e Hanesian (1980) ensinam que a Aprendizagem Significativa acontece com a aquisição de novos significados ou com o incremento aos conhecimentos prévios existentes e organizados em blocos hierarquizados na Estrutura Cognitiva. Ausubel (1973) ainda relata que este aprimoramento da Estrutura Cognitiva por aquela aquisição de novos conhecimentos pela Aprendizagem Significativa acontece em três fases.

Na primeira fase, Ausubel, Novak e Hanesian (1980) sugerem o uso de Organizadores Prévios na falta de Subsunçores por parte do aluno, para a ancoragem

de novos conhecimentos, ou quando os Subsunoçores são frágeis para tal. Os Organizadores Prévios também podem ser ativadores de Subsunoçores presentes e adormecidos na estrutura Cognitiva do educando. Moreira e Masini (2006) afirmam que Organizadores Prévios são materiais sem muita complexidade e boa abrangência, apresentados aos alunos em um primeiro momento, que podem promover uma integração do novo conhecimento à Estrutura Cognitiva e pode ser textos, filmes, esquemas, fotos, mapas conceituais.

Silva e Schirlo (2014) ratificam que um Organizador Prévio pode ativar um Subsunoçor e relata que se o aluno não possuir subsunoçores necessários para o novo conhecimento, o professor deve apresentar tais conhecimentos para posteriormente ministrar o conteúdo principal.

A segunda fase da teoria da Aprendizagem Significativa é atingida, segundo Silva e Schirlo (2014), quando o material é potencialmente significativo e que o aluno deve estar disposto a ancorar o novo conhecimento à sua Estrutura Cognitiva.

Na terceira fase, segundo Silva e Schirlo (2014), acontece o aprimoramento da Estrutura Cognitiva tornando os seus Subsunoçores mais robustos, com a incorporação dos novos conhecimentos pós Aprendizagem Significativa.

Podemos resumir que, para Ausubel, de acordo com Moreira (2019), existem condições para que ocorra a Aprendizagem Significativa. A primeira que o material a ser apreendido deve ser relacionável à Estrutura Cognitiva do aprendiz, ou seja, deve ser potencialmente significativo. A segunda que o aluno deve manifestar disposição para relacionar de maneira substantiva e não arbitrária o novo material, potencialmente significativo. E ainda, os chamados Organizadores Prévios, servem de âncoras iniciais para a nova aprendizagem e levam ao desenvolvimento de subsunoçores que facilitem a aprendizagem subsequente. São materiais introdutórios utilizados antes do material principal, fazendo o papel de ponte cognitiva, ou, segundo Silva e Schirlo (2014), ativadores de subsunoçores. Como exemplo de organizadores prévios temos: fotos, filmes, questionários, experimentos.

Uma eficiente adoção deste Produto Educacional em sala de aula do Ensino Médio, pode se sustentar em nossa sugestão de escolha fronteiriça, entre o Cognitivismo e o Humanismo. Assim, além de Ausubel, cabe registrar mais um importante habitante dessa fronteira, Paulo Freire.

Freire (1983) define Educação Bancária, onde estudar é memorizar conteúdos depositados mecanicamente, sem significados. A compreensão e a significação não

são requisitos, a memorização, sim. Se contrapondo de maneira positiva existe a Educação Dialógica, que apregoa o estudar com apropriação da significação dos conteúdos, que requer que o educando se assuma como sujeito do ato de estudar e adote uma postura crítica e sistemática.

A Educação Bancária anula ou minimiza o poder criador dos educandos, estimulando sua ingenuidade e não sua criticidade. Educar é depositar, transferir o conhecimento de quem tem para quem não tem. Cabe a este tipo de Educação, apassivar os passivos, adaptando-os ao mundo, quanto mais adaptados, mais educados. Neste diapasão, aponta Freire (1983), o papel do educador é conduzir seu aluno a uma consciência crítica e não a uma consciência ingênua, que tende a um simplismo na interpretação dos problemas, a aceitar formas massificadoras do comportamento, a ser frágil na discussão e a aceitar a realidade como imutável.

Freire (1996) relata que ensinar exige rigorosidade metódica, exige pesquisa, exige respeito aos saberes dos educandos, exige criticidade. Relata a importância do ensino pelo exemplo, exigindo a reflexão crítica pela prática. Ensinar exige comprometimento, curiosidade, liberdade e autoridade. Exige a consciência do inacabamento.

#### **2.4 UNIDADES DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVAS – UEPS**

Moreira (2011) afirma que, indo de encontro à Aprendizagem Significativa, não raro vislumbramos professores transmitindo informações a serem memorizadas, que seguramente não serão longevas. Se por acaso forem apreendidas, tais informações terão duração até a próxima avaliação, coroando a chamada Aprendizagem Mecânica. Mitigações desse quadro poderiam surgir com a adoção de algumas abordagens sugeridas pelas teorias de aprendizagem ou com o acesso aos resultados das pesquisas em ensino, porém estes dois remédios por via de regra, não são utilizados. Assim, na intenção de promover mudança deste panorama, Moreira (2011) propõe a construção de Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS).

As UEPS são sequências de ensino que se contrapõem à citada Aprendizagem Mecânica e à Aprendizagem Bancária de Freire (1983), e que será utilizada por este autor-pesquisador na apresentação de conteúdos de Mecânica Quântica para alunos de Ensino Médio.

Bayer, Nunes e Manassi (2015) afirmam que de acordo com a literatura majoritária, para se conceber um material didático potencialmente significativo é de

fundamental importância a consideração dos conhecimentos prévios dos alunos e suas experiências de vida no contexto da sala de aula e fora dela.

De acordo com Moreira (2011), uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) deve ser concebida atendendo alguns princípios, como:

- O conhecimento prévio é a variável mais determinante na Aprendizagem Significativa.
- Aprender significativamente depende de ato volitivo do aluno.
- Organizadores prévios fazem ligação entre conhecimentos prévios e novos conhecimentos.
- Almeja-se que o professor proveja situações-problema para despertar aquela intencionalidade do aluno necessária para a aprendizagem significativa. Tais situações-problema podem funcionar como organizadores prévios e devem ser propostas em nível crescente de complexidade.
- A aprendizagem deve ser significativa e crítica, se distanciando da mecânica com memorização de respostas. O ensino tem como ponto central, o aluno.

Na visão deste autor-pesquisador, o tema deste trabalho intitulado Prelúdio do Quantum: As Cinco Rachaduras na Física Clássica que levaram à Teoria Quântica; se mostrava sedutor até para os mais indiferentes alunos. Isto talvez, por se tratar de um assunto muito expressado até por não especialistas e que ainda é fundamento de tecnologias que cotidianamente somos usuários.

Assim, diante de possibilidades concretas de sucesso de aprendizagem, apresentamos o assunto contido em uma Seqüência Didática sob uma estrutura que remete a UEPS, Unidades de Ensino Potencialmente Significativas.

Moreira (2011) sugere a adoção de passos para a construção de UEPS, o que inspirou este trabalho desenvolvido em três segmentos, que constituem o Produto Educacional constante do Apêndice. Podemos aqui, resumir tais passos:

1. Antes de qualquer ação docente, o tema Mecânica Quântica foi apresentado aos alunos e uma breve discussão foi desencadeada por alguns minutos, onde todos tinham total liberdade para quaisquer interveniências.

2. Um questionário (Quiz 0) com quarenta perguntas, cinco de cada um dos oito tópicos da matéria, foi apresentado aos alunos, visando-se obter as concepções

prévias dos mesmos, coerentes ou não com os pressupostos teóricos do assunto em pauta. Neste momento foram apresentadas situações-problema como:

a) O que é Física Clássica? Quais são os cinco problemas não resolvidos pela Teoria Clássica? Que acontecimento desencadeou as respectivas soluções?

b) O que é uma constante fundamental? O que é o Sistema Internacional de Unidades? Qual a relação entre a Mecânica Quântica e as unidades das grandezas físicas fundamentais do Sistema Internacional?

c) O que é corpo negro? Qual sua relevância no contexto do surgimento da Teoria Quântica?

d) O que é Efeito fotoelétrico? Ele está presente no nosso cotidiano?

d) O que é calor específico? Conhece a Lei de Dulong – Petit?

f) Como e quando foi observada a radioatividade pela primeira vez? Qual a diferença da emissão radioativa e os raios x? Qual a relação da radioatividade e a Mecânica Quântica?

g) O que são linhas espectrais de emissão e de absorção? O que é espectroscopia? Qual sua relevância? Qual a relação da espectroscopia e a Mecânica Quântica?

h) O que é determinismo e probabilismo no contexto das teorias clássica e quântica? O que é princípio da incerteza? O que é dualidade no contexto da teoria quântica? O que é emaranhamento quântico? O que é tunelamento quântico?

3. Evidentemente que os questionamentos acima foram feitos com linguagem adequado, de maneira leve e com o propósito de despertá-los para um assunto cotidiano e midiático. Nesse momento, foi questionado: Por que a Física Quântica tem esse nome? O que significa o termo quântico? Utilizando poucos minutos o termo foi esclarecido, o que foi um excelente organizador prévio.

4. Em caráter introdutório ao tema geral, é apresentada a aula 1 sob o título: Contexto Histórico da Física Quântica - Cinco problemas solucionados pela Mecânica Quântica. Esta aula consiste de uma exposição oral com utilização de PowerPoint

com um pequeno questionário de dez perguntas (Quiz 1), cinco inéditas e cinco apresentadas no primeiro questionário (Quiz 0).

Também de forma introdutória é apresentada nos mesmos moldes a aula 2: O Sistema Internacional de Unidades e as Constantes Fundamentais da Natureza. Em seguida é respondido pelo aluno, o quiz 2 com dez perguntas, cinco inéditas e cinco repetidas.

5. Neste momento foram apresentadas as aulas 3 a 7, onde estavam presentes os tópicos principais da seqüência didática, apresentados em um grau de complexidade um pouco maior. Todas as aulas também estavam em PowerPoint e ao final da cada aula, temos os questionários de dez questões, ou seja, do Quiz 3 ao Quiz 7. Cabe ressaltar que as situações-problema supracitadas começam a encontrar respostas gradativamente. Com o intuito de promover interações e integração ao conteúdo, foi realizado um experimento em laboratório didático de Física, quando foi calculada a constante de Planck utilizando-se LEDs, descrito na terceira parte deste Produto Educacional.

6. Concluindo a apresentação deste assunto, a última aula de número oito sob o título: A Mecânica Quântica, foi ministrada. Em face de no decorrer do desenvolvimento da seqüência didática ter havido a familiarização por parte do aluno, de tópicos pré-requisitos, naturalmente viabilizou-se em um nível maior de complexidade em relação às aulas anteriores.

7. Com relação à avaliação da aprendizagem nesta UEPS, foi utilizada uma avaliação formativa e uma somativa. A primeira aconteceu ao final de cada aula, desde a aula 1 até a aula 7. A segunda, além de estar presente na prática experimental de cálculo da constante de Planck, foi aplicada ao final da aula 8, por se tratar da aula que consolida toda a seqüência didática.

8. Foi evidenciado êxito nesta UEPS, em face do excelente desempenho mostrado nas tabelas abaixo. A tabela 1 descreve a evolução no percentual de acertos dos alunos nas 40 questões antes e depois das aulas, cinco questões de cada assunto. A segunda tabela mostra o percentual de acertos por parte dos alunos, das cinco questões inéditas ao final de cada aula.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O momento histórico na segunda metade do século XIX era incomum, pois dentre alguns avanços, destacamos o ano de 1864 quando baseados nos trabalhos empíricos de Michael Faraday (1791-1867), Maxwell (1831-1879) unificou e equacionou os fenômenos elétricos e magnéticos, estabelecendo conexões elegantes entre as duas teorias. Devemos registrar também, a eclética e prodigiosa participação de Boltzmann, denotado nos seus trabalhos empíricos no eletromagnetismo, no seu protagonismo no surgimento da mecânica estatística, na organização da termodinâmica e na defesa inglória da existência de partículas menores na constituição da matéria.

Mesmo com tantos avanços, cinco problemas não resolvidos pela Teoria Clássica e colocados aqui em ordem cronológica, intrigavam a comunidade científica, a saber: o calor específico, segundo Rocha (2015), instituído em 1784 por Johan Gadolin (1760-1852) apresentava para os sólidos, discrepâncias em baixas temperaturas (Lei empírica de Dulong-Petit 1819); o conflito da teoria com os dados empíricos da radiação do corpo negro (Kirchhoff 1860); a falta de uma explicação para o espectro de emissão e absorção dos gases (Balmer 1885); a inexistência de um alicerce conceitual para o efeito fotoelétrico (1887- Hertz), e finalmente a radioatividade (1896 – Bequerel) que não encontrava sustentação teórica para a emissão de partículas alfa do núcleo atômico. A busca por essas explicações fomentou uma forte mudança de paradigmas, que culminará na substituição do mundo determinístico da física clássica pelo universo probabilístico da mecânica quântica.

Em 1900, Planck resolve a discordância teórico-experimental da radiação do corpo negro, instituindo mesmo sem convicção própria, a quantização da energia. Einstein em 1905 e 1907, corroborando e encorajando Planck na introdução conceitual do quantum, descortina soluções para o efeito fotoelétrico e para o comportamento do calor específico para sólidos, respectivamente, resolvendo duas das cinco questões.

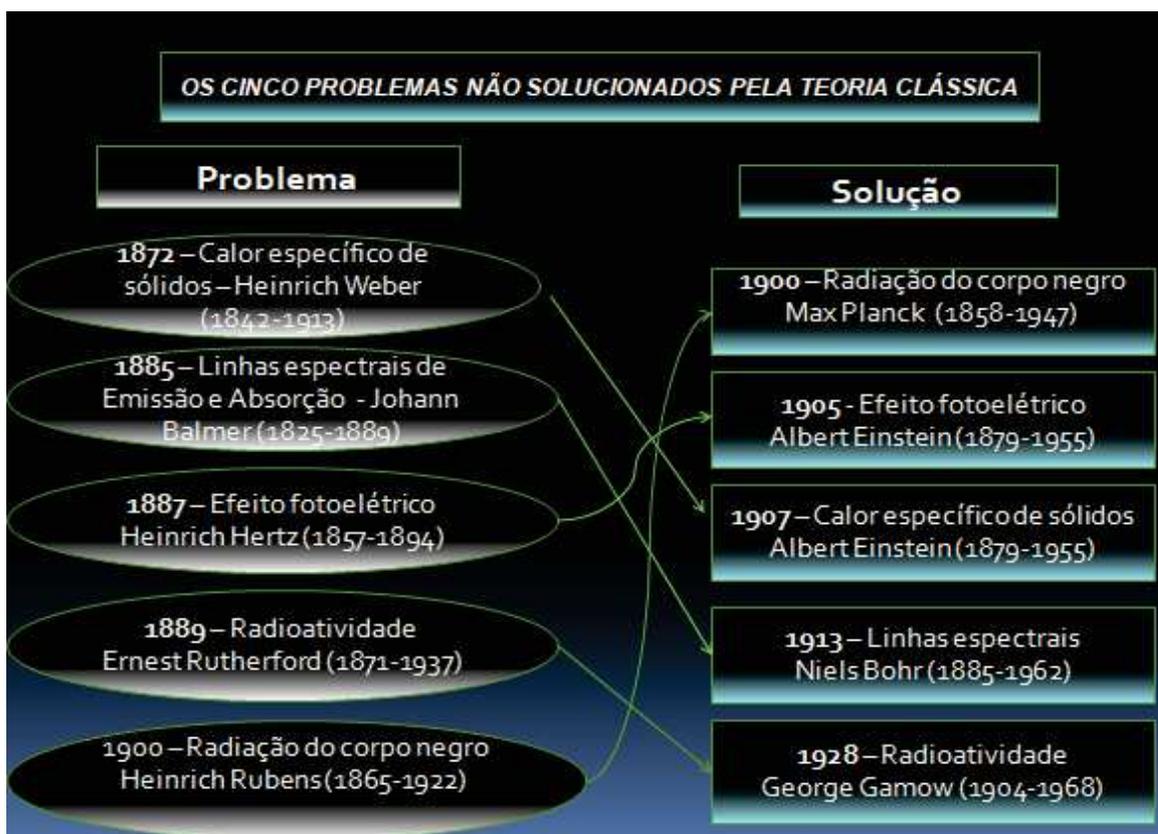
Em 1913, Niels Bohr usando a mesma quantização, explica a não catástrofe atômica que previa Maxwell para o modelo atômico vigente e institui um modelo para o átomo de hidrogênio e as linhas espectrais evidenciadas na série de Balmer, vinte e oito anos sem explicação, finalmente encontra uma estrutura teórica. Esta teoria de Bohr foi tão refutada pela comunidade científica, que os alemães Otto Stern (1888-

1969) e Max Von Laue (1879-1960) afiançaram um ao outro, conforme afirma Morris (1997), que se aquela teoria maluca viesse a ser provada, os dois abandonariam a física. Para o bem da ciência, os dois não honraram seus juramentos e foram laureados com o premio Nobel de Física, Von Laue em 1914 e Stern em 1943.

Em 1916, Robert Millikan (1868-1953) após inúmeras tentativas para refutar Einstein, ratifica sua teoria estabelecendo experimentalmente a constante de Planck e confirmando os postulados de seu antagonista para o efeito fotoelétrico.

O evidente desenvolvimento científico na Alemanha a partir da segunda metade do século XIX, sobretudo na termodinâmica, teve seu coroamento em 1887. O Estado alemão unificado investiu fortemente em um novo Instituto de Pesquisa em Berlim, o Physikalisch Technische Reichsanstalt (PTR) e em 1900 contrataram um brilhante cientista, Max Planck.

Figura 5 - Os problemas não solucionados pela Teoria Clássica



Fonte: O autor

### 3.1 RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO: A QUEBRA DA CONTINUIDADE E A ORIGEM DA ENERGIA QUÂNTICA

### 3.1.1 O QUANTUM E A SOLUÇÃO DE FALHAS NA TEORIA CLÁSSICA

De acordo com Neto (2021), Planck estabelece o nascimento da Mecânica Quântica após as publicações de três trabalhos na Sociedade de Física da Alemanha, sobre experimentos tratando a emissão de radiação por elementos aquecidos, aprimorando os trabalhos de Wilhelm Wien (1864-1928): “On the improvement of Wien’s equation for the spectrum – 1900”, “On the theory of the energy distribution law of the normal spectrum – 1900” e “On the law of distribution of energy in the normal spectrum – 1901”. Cabe aqui ressaltar que em 1900, desvendar a emissão de luz por corpos aquecidos, como um corpo negro, seria um grande marco científico ainda mais em um momento que não tínhamos o conhecimento da estrutura microscópica do átomo ou da matéria.

Neto (2021) e Gontijo (2022) estabelecem uma linha do tempo de evoluções conceituais, e começando por volta de 1800, Sir William Herschel (1738-1822) observando a decomposição da luz branca ao atravessar um prisma, conseguiu medir a temperatura correspondente a cada cor do espectro e descobriu que o efeito térmico aumentava à medida que o termômetro se aproximava do vermelho. Mais importante ainda, ele observou que o efeito continuava a aumentar mesmo depois do vermelho, na parte escura do espectro, a região do infravermelho. Esses estudos continuaram e desembocaram naquilo que na segunda metade do século XIX passou a ser conhecida como radiação de corpo negro. Qualquer corpo em determinada temperatura irradia energia que depende desta temperatura, e constatado por Herschel, cada temperatura está associada a uma frequência, isto é, a uma determinada cor.

Hans Christian Oersted (1777-1851) em 1823 inicia uma sistemática seqüência de medições da radiação térmica, mesmo com um incipiente aparato experimental. Porém em 1851 algum avanço se obteve nestas medições com a invenção por parte do físico sueco Adolf Ferdinand Svanberg (1806-1887), de um primitivo bolômetro, instrumento capaz de medir a radiação eletromagnética através do aquecimento de um material que tem sua resistência elétrica dependente da temperatura.

O físico escocês Balfour Stewart (1828-1887) enuncia em 1858 que “o poder de emissão de cada tipo de substância é igual ao seu poder de absorção, para cada comprimento de onda do calor radiante”. Stewart fora assistente de James D. Forbes (1809-1868), condecorado professor da Universidade de Edimburgo. Assim como

Forbes, Stewart foi membro da Royal Society e também condecorado com a Medalha Rumford. Dentre vários trabalhos se destacam: “Observações com um espectroscópio rígido”, “Aquecimento de um disco por movimento rápido em Vácuo”, “Equilíbrio térmico em um gabinete que contém matéria em movimento visível” e “Radiação interna em cristais uniaxiais”. Stewart também desenvolveu pesquisas na área de meteorologia e campo magnético terrestre.

Gustav R. Kirchhoff (1824-1887), que teve contribuições científicas nos circuitos elétricos e na espectroscopia, em 1859 realiza novos experimentos e deduz que a relação entre a absorção e emissão de calor era uma função do comprimento de onda da radiação absorvida ou emitida pelo corpo em uma temperatura absoluta. No ano seguinte ele introduz o conceito de corpo negro, “... é o corpo que absorve toda radiação que nele incide”.

James C. Maxwell (1831-1879), físico e matemático britânico, demonstrou em 1860 que as velocidades das moléculas de um gás, seguem a lei das distribuições dos erros de John Karl Friedrich Gauss (1777-1855), e que a energia cinética das moléculas era proporcional à temperatura absoluta do gás. Esta lei foi generalizada em 1872 pelo físico austríaco Ludwig E. Boltzmann (1844-1906), ficando estabelecida a lei de Maxwell-Boltzmann.

Vislumbro aqui a pertinência em discorrer sobre Boltzmann. Ele foi o maior responsável pelo desenvolvimento da mecânica estatística, que explica e prevê como as propriedades dos átomos (como a massa, a carga e a estrutura) determinam as propriedades macroscópicas da matéria (como a capacidade térmica, a viscosidade, condutividade térmica e difusão). Na Universidade de Viena, Joseph Stefan (1835 – 1893), foi o seu orientador de doutoramento. Publicou vários artigos mostrando que a segunda lei da termodinâmica podia ser explicada pela aplicação das leis da mecânica e das teorias da probabilidade aos movimentos dos átomos, ou seja, era uma lei estatística.

Além de trabalhar no teorema da equi-partição, que relaciona a temperatura de um sistema com sua energia média, Boltzmann foi também um dos primeiros a reconhecer a teoria eletromagnética de Maxwell e com base nela, deduziu que a intensidade da radiação (total) emitida por um corpo negro é proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta (Lei de Stefan- Boltzmann).

Sua mecânica estatística foi duramente criticada pela comunidade científica da época que, segundo Dahmen (2007) e Ribeiro (2013), não acreditava na teoria

atômica. Isto teria impactado fortemente na saúde de Boltzmann. Seus últimos anos foram marcados por perda progressiva da visão e depressão. Pouco depois de 1900 aconteceram uma série de descobertas em física atômica que tardiamente, consolidaram todo trabalho de Boltzmann.

Albert Einstein (1879-1955), conforme relata Neto (2021), antes dos seus famosos cinco artigos de 1905 no *Annus Mirabilis*, publicou na revista científica *Annalen der Physik*, artigos em 1902, 1903 e 1904 sobre fundamentos da mecânica estatística e termodinâmica. Em 1902 publicou *Kinetische Theorie des Warmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der* (Teoria cinética do equilíbrio térmico e da segunda lei da termodinâmica) que abordava sob a ótica da mecânica estatística, o teorema da equipartição e as definições de temperatura e entropia. Em 1903, Einstein publica *Eine Theorie der Grundlagen der* (Uma teoria dos fundamentos da termodinâmica) relatando a irreversibilidade da termodinâmica e em 1904, *Allgemeine molekulare Theorie der Wärme* (Sobre a Teoria Molecular Geral do Calor) descrevendo novos métodos para a obtenção da constante de Boltzmann (O MILENAR [...], 2021).

Em 1905, como afirma Coelho e Ferreira (2006), dois dos cinco artigos reforçam o modelo atômico de Boltzmann, o segundo, "*Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*" ("Sobre uma nova determinação das dimensões moleculares"), foi tese de doutoramento na Universidade de Zurique e tratava da "determinação do tamanho exato de átomos a partir da difusão e da viscosidade em soluções diluídas de substâncias neutras". O terceiro artigo, "*Über die von der molekulartheoretischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*" ("Sobre o movimento de partículas suspensas em fluidos em repouso, como postulado pela teoria molecular do calor"), trata do movimento Browniano, descrito pela primeira vez em 1828, pelo botânico Robert Brown ao observar que o pólen de diversas plantas, que serve de consolidação do modelo atômico-molecular.

Em maio de 1905 em carta destinada ao amigo Conrad Habicht (1876-1958), conforme classifica Moreira (2005), Einstein registra um dos mais importantes e intrigantes documentos da história da ciência.

Eu lhe prometi quatro trabalhos. O primeiro trata da radiação e das propriedades energéticas da luz e é muito revolucionário como você verá. O

segundo é uma determinação dos tamanhos reais dos átomos a partir da difusão e da viscosidade de soluções diluídas de substâncias neutras. O terceiro prova que, baseado na hipótese da teoria molecular do calor, corpos da ordem de 1/1.000 mm, suspensos em líquidos, devem executar um movimento aleatório observável, que é produzido pelo movimento térmico; de fato, os fisiologistas observaram movimentos de pequenos corpos em suspensão, inanimados, os quais chamam de 'movimento browniano'. O quarto artigo, neste momento apenas um rascunho grosseiro, é uma eletrodinâmica de corpos em movimento, que utiliza uma modificação da teoria do espaço e do tempo. (MOREIRA, 2005, p. 1).

Nesta época, apesar de deus doutoramento, Einstein ainda não gozava de notoriedade, era um simples examinador no Instituto Federal Suíço de Propriedade Intelectual em Berna, o escritório de patentes da Suíça. Apesar de seus artigos publicados, entre eles a teoria da Relatividade Especial, Einstein só começa a freqüentar de fato a comunidade científica com o convite por Walter Nernst para participar da primeira Conferência de Solvay de 1911, em Bruxelas. O tema, *La théorie du rayonnement et les quanta* (Teoria da radiação e dos quanta) justificava o convite ao físico mais jovem presente, com 31 anos.

Não sabemos que se Boltzmann tivesse tido contato com as publicações de Einstein, que corroboraram sua tão criticada teoria corpuscular, sua depressão teria sido mitigada. Talvez, o fatídico dia 5 de setembro de 1906 poderia ter sido diferente, e diante de possíveis reconhecimentos como partícipe da evolução da ciência do século XX, fosse o vigésimo quinto integrante da Conferência de célebres que ocorreria em 1911.

Cabe ressaltar que no final do século XIX vários cientistas, usando a teoria clássica da termodinâmica, mostraram que a emissão de energia varia com a temperatura. A energia radiante total por unidade de área na unidade de tempo, ou fluxo é dada pela equação de Stefan-Boltzmann onde  $\sigma$  traduz a constante de mesmo nome e vale  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ . Josef Stefan (1835-1893) chegou a esta conclusão de maneira experimental em 1879 e cinco anos depois Ludwig Boltzmann (1844-1906) chega independentemente a este mesmo resultado. Com este fundamento matemático, Stefan a partir de dados obtidos por Charles Soret (1854-1904) obteve a temperatura da superfície solar com boa precisão. Planck determinou experimentalmente que os corpos aquecidos têm um aumento vibracional de suas *estruturas*, e estabeleceu a hipótese que estes devolvem esta energia sob a forma de emissão de luz (radiação) por *pacotes de energia*, ou quantum (quantidade elementar) de valor proporcional a sua freqüência de oscilação. Mais tarde esta

audácia ganha robustez e promove uma revolução científica e tecnológica. Isto nos remete às reflexões do filósofo Maurice Merleau-Ponty (1908-1961) que nos revela que a criticidade da própria física propicia novas percepções de mundo e a conseqüentes desenvolvimentos. Esta ousadia produtiva de Planck é descrita por Neto (2021) e corroborado por Kruger *et al* (2018):

Sobre a produção do conhecimento e o processo de escolha, Feyerabend afirma que os passos mais inovadores só foram possíveis porque cientistas ousaram desobedecer a conjuntos de regras metodológicas que os prendiam (FEYERABEND, 1977, p. 29). Essa “rebeldia” científica pode contribuir muito mais para a sociedade do que se imagina, como observamos na concepção teórica de dois grandes cientistas: Sigmund Freud, em suas concepções e novos métodos para a psicanálise; Albert Einstein, que em sua teoria da relatividade sustenta a física moderna. Por isso, o melhor método é não ter método e deixar a ciência fluir naturalmente. (KRUGER *et al.*, 2028, p. 541 e 542)

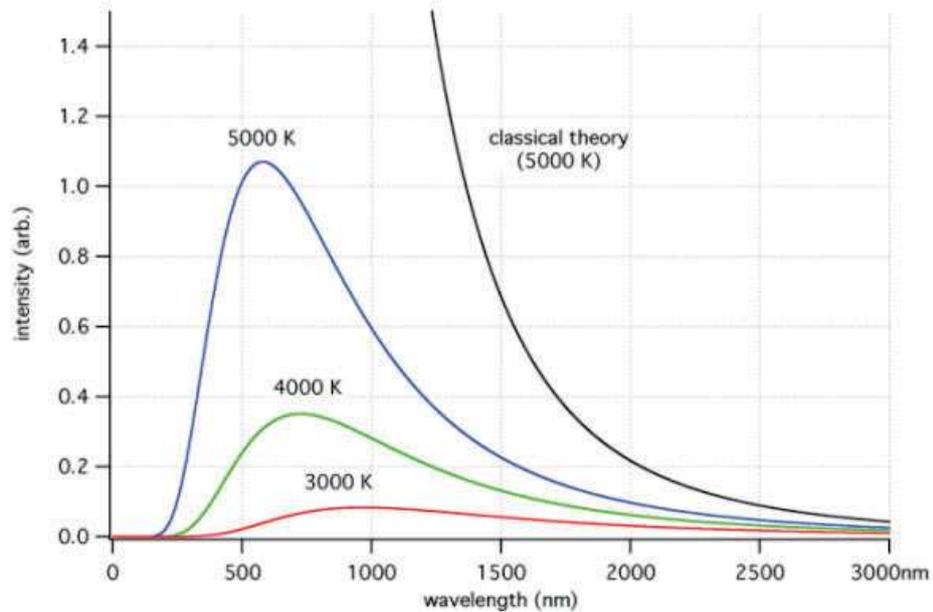
### 3.1.2 A LEI DE RAYLEIGH – JEANS

Desejando obter uma descrição matemática da energia radiante do espectro eletromagnético em função da temperatura e comprimento de onda, John William Sturt (1842-1919) ou Lord Rayleigh em 1900 consegue através de análise dimensional e teoria clássica, uma boa equação, que, porém apresentava uma falha para altas frequências. Mesmo após aprimoramento da equação, juntamente com Sir James Jeans em 1905, o desacordo com os dados experimentais persistia. Esta falha, conforme afirma Morris (1997), passou a ter a alcunha de *catástrofe do ultravioleta*, expressão atribuída ao físico austríaco Paul Ehrenfest (1880-1933), melhor amigo de Albert Einstein. Rayleigh gozava de boa reputação na comunidade científica e teve ilustres alunos como J. J. Thomson. Obteve o Nobel de Física em 1904 pelas pesquisas sobre densidade de gases e pela descoberta do Argônio. Cinco anos depois, a equação de Rayleigh sofre uma pequena modificação por James Jeans (1877-1946) sem, contudo corrigir a citada imprecisão.

$$\bar{U}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2 KT}{c^3} \quad (02)$$

$\bar{U}$  – Densidade de radiação,  $\nu$  – frequência,  $T$  – temperatura na escala absoluta,  $K$  – constante de Boltzmann

Gráfico 2 - Lei de Rayleigh-Jeans



Fonte: <http://fisicanodiaadia.blogspot.com/2012/02/lei-de-rayleigh-jeans.html>

No gráfico verificamos que os picos de radiação para diferentes temperaturas, equivalem a valores específicos de comprimento de onda ou frequência. Por exemplo, quando um corpo irradia a 5000K, esta radiação apresenta um espectro de radiação com preponderância para um comprimento de onda máximo relativo ao azul. A teoria clássica proposta por Rayleigh - Jeans concorda com os dados experimentais para baixas frequências e altos valores de comprimento de onda, mas apresenta inconsistências para altos valores de frequência, como o ultravioleta, prevendo um valor infinito de intensidade de radiação e não um valor máximo.

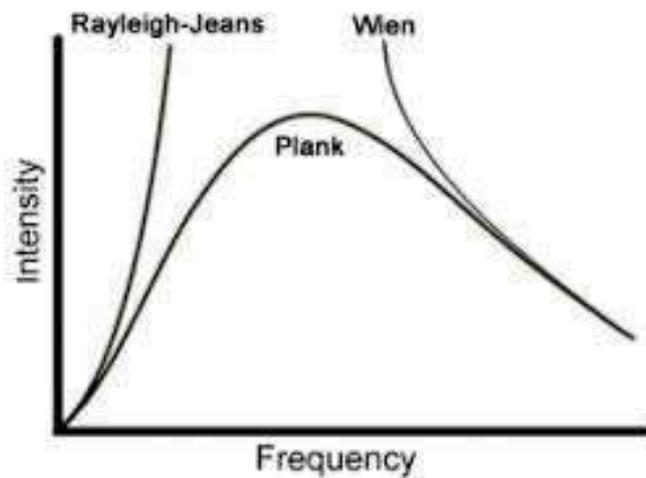
### 3.1.3 A LEI DE WIEN

A lei formulada em 1892 por Wilhelm Wien (1864-1928), Nobel de Física em 1911 por trabalhos sobre radiação, é somente compatível com os dados experimentais para valores de altas frequências, ao contrário da lei de Rayleigh – Jeans, que retratava bem a radiação em baixas frequências. Diferentemente dessas duas leis, os valores experimentais encontrarão amparo na lei de Planck a ser formulada aglutinando as duas leis anteriores através de uma idéia revolucionária.

$$\bar{U}(\nu, T) = \frac{CKT\nu^3 e^{-\frac{h\nu}{kT}}}{c^3}$$

(03)

Gráfico 3 - Lei de Wien

Fonte: <http://macbeth.if.usp.br/~gusev/AulaCorpoNegro2.pdf>

A Lei de Wien pode ser expressa por uma variação chamada lei de deslocamento de Wien, demonstrada no item 2.5, que relaciona o comprimento de onda onde se situa a máxima emissão de radiação eletromagnética de corpo negro e sua temperatura.

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{b}{T} \quad (04)$$

Onde  $\lambda_{m\acute{a}x}$  é o comprimento de onda para qual a intensidade de radiação eletromagnética é máxima, T é a temperatura do corpo em Kelvin e b é a constante de proporcionalidade chamada constante de dispersão de Wien. No SI seu valor é  $b = 2,8977685 \times 10^{-3}$  (m.K)

### 3.1.4 A SOLUÇÃO TEÓRICA DE PLANCK PARA ADEQUAÇÃO AOS DADOS EXPERIMENTAIS

Sendo o corpo negro um sistema possuidor de massa e temperatura  $T$  que emite radiação, sabemos que o fluxo dessa energia radiada é proporcional a quarta potência da temperatura e independe do corpo. Modelos que tentaram explicar o espectro da radiação em função da frequência ou comprimento de onda não foram plenamente eficazes. O modelo de Rayleigh – Jeans se adéqua para baixas frequências e o de Wien para altas.

Utilizando um modelo de osciladores, acumuladores de energia, chegamos a uma expressão que relaciona energia total do sistema e a densidade de energia na radiação:

$$U(\nu) = \frac{c^3}{8\pi\nu} \bar{u}(\nu) \quad (05)$$

Como a energia total depende da temperatura, utilizemos o modelo termodinâmico:

$$\boxed{\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU}} \quad (06)$$

A partir da **lei de Wien** (*para altas*) temos:

$$\boxed{\bar{u}(\nu, T) = c\nu^3 e^{-\frac{\alpha\nu}{T}}} \quad (07)$$

Onde  $C$  é uma constante e  $\alpha$ , será chamada de  $h$ , constante de Planck. Então:

$$U = \frac{c^3}{8\pi\nu^2} C\nu^3 e^{-\frac{\alpha\nu}{T}} = A \nu e^{-\frac{\alpha\nu}{T}} \quad (08)$$

Considerando que:  $T: \frac{1}{T} = -\frac{1}{\alpha\nu} \ln\left(\frac{u}{A\nu}\right) e \frac{1}{T} = \frac{dS}{dU}$  (09)

Então: 
$$\frac{dS}{dU} = -\frac{1}{\alpha v} \ln \left( \frac{u}{Av} \right). \quad (10)$$

Logo a derivada segunda é: 
$$\boxed{\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{1}{\alpha v U}} \quad (11)$$

Fazendo o mesmo para a **lei de Rayleigh – Jeans** (para *v* baixas):

Se 
$$\boxed{\bar{u} = \frac{8\pi v^2}{c^3} KT}, \text{ então: } U = \frac{c^3}{8\pi v^2} \frac{8\pi v^2}{c^3} KT \quad (12)$$

Sendo  $U = KT$ , 
$$\boxed{\frac{1}{T} = \frac{K}{U}} \text{ e } \frac{dS}{dU} = \frac{1}{T} = \frac{K}{U}, \quad (13)$$

Então: 
$$\boxed{\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{K}{U^2}} \quad (14)$$

Onde K é a constante de Boltzmann. Planck propõe uma expressão da derivada segunda da Entropia em função da Energia, que satisfaça regimes de altas e baixas frequências:

Obtemos então 
$$\boxed{\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{1}{\alpha v U + \frac{U^2}{K}}} \text{ aglutinando-se Wien e R-J.} \quad (15)$$

Lembrando que  $\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU}$  e se  $T \rightarrow \infty, U \rightarrow \infty$  então,  $\frac{dS}{dU} \rightarrow 0$ .

$$\frac{dS}{dU} = \int \frac{d^2 S}{dU^2} dU = \frac{1}{\alpha v} \ln \frac{\frac{U}{\alpha v K}}{1 + \frac{U}{\alpha v K}} \quad (16)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU} = \frac{1}{\alpha\nu} \ln \frac{U}{\alpha\nu K + \frac{U}{\alpha\nu K}} \quad (17)$$

Resolvendo para U e lembrando que  $\alpha = \frac{h}{K}$ ,  $U = \frac{h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1}$  contemplando os dois modelos.

$$\text{Usando } U = \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \bar{u}(\nu)$$

$$\frac{h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1} = \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \bar{u}(\nu, T), \text{ então } \bar{u}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1}. \quad (18)$$

Esta última equação é a lei de Planck, que se comunica com os dados experimentais mostrados na figura 2 (RADIAÇÃO [...], 2016).

De acordo com Feldens, Dias e Santos (2010), Planck se incomodava pelo fato de ter forjado apenas uma argumentação matemática, uma equação que retratasse os tais dados empíricos. Faltava robustez teórica para sedimentar todo o conceito físico da radiação do corpo negro.

Mas mesmo que a validade absolutamente precisa da fórmula da radiação seja assumida, na medida em que ela tenha meramente o status de uma lei revelada por uma sorte da intuição, ela não poderia esperar possuir mais do que um significado formal. Por essa razão, no próprio dia em que formulei a lei, comecei a devotar-me à tarefa de investi-la com um real sentido físico. Essa procura automaticamente levou-me a estudar a inter-relação de entropia com probabilidade — em outras palavras, a perseguir a linha de pensamento inaugurada por Boltzmann. (FELDENS, DIAS e SANTOS, 2010, p. 7)

Ele verificou que a lei de Rayleigh - Jeans não se ajustava a curva espectral em toda faixa de frequências, porque Rayleigh e Jeans, que partiram da idéia de que a energia irradiada vem da oscilação do campo eletromagnético, admitiam que os osciladores irradiassem qualquer quantidade de energia (RADIAÇÃO [...], 2016).

Em 14 de dezembro de 1900 Planck apresentou para a Sociedade Alemã de Física uma solução inusitada para corroborar os dados experimentais Ele inferiu uma limitação, ou seja, os osciladores só podiam emitir energia em determinadas quantidades. Ele postulou que a energia contida no corpo negro e que será irradiada, é um número inteiro de pacotes de energia, chamado por Planck de *elemento de*

*energia* e futuramente por De Broglie, de *átomos de luz*. Tanto na emissão como na absorção, o oscilador só pode trocar valores de energia que são múltiplos de  $E_0$  ( $E = nE_0$ ), com  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Este elemento de energia ou quantum é proporcional à frequência ( $\nu$ ),  $E_0 \propto \nu$ , ou  $E_0 = h\nu \Rightarrow \boxed{E = nh\nu}$ , onde  $h$  é uma constante que mais tarde foi batizada com seu nome e tem valor  $h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ , atualizada na 26ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (Paris Nov/2018). Essa constante é muito pequena assim como o quantum. Como a matéria que nos parece contínua mesmo sendo composta de unidades discretas, a luz também é percebida como contínua e é discretamente formada por unidades elementares de radiação chamadas de fótons.

A energia média seria:

$$\boxed{\bar{E} = \frac{\sum_n nE_0 e^{-nE_0/KT}}{\sum_n e^{-nE_0/KT}} = U} \quad (19)$$

Adotando-se que  $\beta = \frac{1}{KT}$  e derivando  $\frac{d}{d\beta} = (\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\epsilon_0\beta}) / \sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\epsilon_0\beta}$ , que é a soma de uma P.G.

$$U = \frac{E_0}{e^{E_0/KT} - 1} \rightarrow \bar{u} \quad \text{como} \quad \bar{u} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U \Rightarrow \bar{u} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{E_0}{e^{E_0/KT} - 1} \quad (20)$$

]Planck verificou que a expressão:  $\boxed{\bar{u} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{E_0}{e^{E_0/KT} - 1}}$  era equivalente a

$$\boxed{\bar{u} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1}} \quad (21)$$

$$\boxed{E_0 = h\nu} \quad (22)$$

O elemento de energia  $\boxed{E_0 = h\nu}$  é a energia a ser radiada pelo corpo negro na forma de pacotes, de maneira quantizada, que mais tarde será chamada de fótons. Richard Feynman (1918-1988), Nobel de Física de 1965, afirmava que a diferença do Modelo de Planck em relação ao modelo de Rayleigh - Jeans, era que no primeiro

modelo os átomos tinha personalidade. Esse novo paradigma não só se aplica para a radiação do corpo negro, ele será comprovado através de outros efeitos da natureza como no efeito fotoelétrico, espalhamento Compton entre outros. Será conceito geral e base para o nascimento da mecânica quântica.

### 3.1.5 DE PLANCK A RAYLEIGH – JEANS

Podemos comprovar, a partir da Lei de Planck, que a Lei de Rayleigh - Jeans não se sustenta para pequenos comprimentos de onda e altas frequências, prevendo Radiância espectral infinita para estes valores (DE PLANCK [...], 2022).

$$\text{Segundo Planck: } \boxed{B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/KT} - 1}} \text{ ou } \boxed{B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda KT} - 1}} \quad (23)$$

$$\text{Então: } x = \frac{hc}{\lambda KT} \rightarrow \lambda KT \gg hc \Rightarrow x \rightarrow 0$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^x - 1} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{(1+x) - 1} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{x}$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{\lambda KT}{hc} \Rightarrow B_\lambda(T) = \frac{2cKT}{\lambda^4} \quad (24)$$

Ou seja, para  $\lambda$  pequenos,  $B_\lambda(T) \rightarrow \infty$  (catástrofe do ultravioleta).

### 3.1.6 LEI DO DESLOCAMENTO DE WIEN A PARTIR DE PLANCK

Conforme a equação (21), a Radiância Espectral em função de  $\lambda$  e  $T$  para

$$\text{Planck é: } \boxed{B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda KT} - 1}}$$

$$\text{Para } x = \frac{hc\lambda^{-1}}{KT} \text{ temos que } B_\lambda(T) = 2hc^2 \lambda^{-5} (e^x - 1) \quad (25)$$

Para obtermos o valor de máxima Radiância temos:

$$\frac{dB(\lambda)}{d\lambda} = 2hc^2 \left[ -5\lambda^{-6} (e^x - 1)^{-1} + \lambda^{-5} - (e^x - 1)^{-2} e^x \frac{-hc\lambda^{-2}}{KT} \right] = 0$$

$$\frac{-5}{\lambda^6} \frac{1}{e^x - 1} = -\frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{(e^x - 1)^2} e^x \frac{hc}{\lambda^2 KT} \Rightarrow 5 = \frac{e^x}{e^x - 1} \Rightarrow$$

$$x = \frac{5(e^x - 1)}{e^x} \Rightarrow x = 5(1 - e^{-x}) \Rightarrow x \cong 4,965$$

Então se  $x = \frac{hc}{\lambda KT}$  e se  $x = cte$

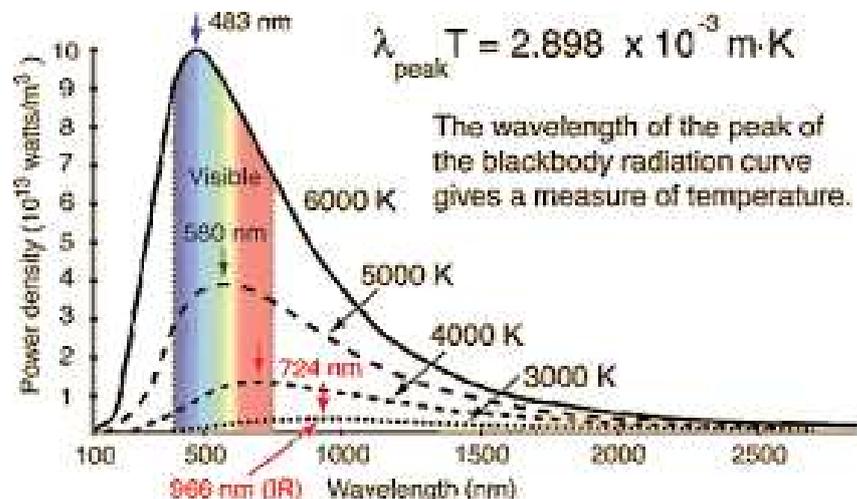
$$\lambda T = \frac{hc}{Kx} = cte \quad (26)$$

Substituindo os valores de  $h$ ,  $c$ ,  $K$  e  $x$ , temos:  $\lambda T = 2,898 \times 10^{-2} = b$

$$\lambda T = b \Rightarrow \lambda_{m\acute{a}x} = \frac{b}{T} \quad (27)$$

Temos então a **Lei do deslocamento de Wien** que relaciona, conforme já foi falado, o comprimento de onda onde se situa a máxima emissão de radiação eletromagnética de corpo negro e sua temperatura (DE PLANCK [...], 2022).

Gráfico 4 - Lei do deslocamento de Wien



Fonte: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com>

### 3.1.7 A VISITA DE RUBENS, O CHÁ DA TARDE DE DOMINGO E OS QUANTA

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), considerado o pai da teoria quântica entrou na Universidade de Munique em 1875 aos 17 anos, para estudar física. Em 1878 entra na Universidade de Berlim e como aluno de Gustav Kirchhoff (1824-1887), e Hermann von Helmholtz (1821-1894), conclui seu doutoramento em 1879. Sua bela carreira acadêmica estava só começando, e em 1885 assume o cargo de professor na Universidade de Kiel, sua terra natal. Conforme relata Mukunda (2008), Planck sucede o professor Kirchhoff, o avô da teoria quântica, como professor da Universidade de Berlim, substituto em 1889 e permanente em 1892. Em 1912 tornou-se secretário permanente da Academia Prussiana de Ciências e em 1918 recebeu o Prêmio Nobel de Física, pela citada paternidade, que anunciou a transição de um passado clássico da ciência para uma era moderna.

Em 1929 juntamente com Einstein, recebe a primeira medalha da Sociedade Alemã de Física, mais tarde chamada Medalha Max Planck e em 1930 torna-se presidente da Sociedade Kaiser Wilhelm para Avanço da Ciência, mais tarde Sociedade Max Planck, posição acadêmica mais alta da Alemanha.

Mukunda (2008) relata curiosidades que antecederam o magnífico trabalho de Planck de 1900 e suas conseqüências. Planck dedicou-se ao estudo da termodinâmica, e como outros, buscava a função universal de Kirchhoff para a radiação do corpo negro. Por algum tempo acreditava-se que a equação instituída por Wilhelm Wien (1864-1928) em 1896 era exata, até a visita de Heinrich Rubens (1865-1922) e sua esposa à casa de Planck em uma bela tarde de outono no domingo.

Cabe ressaltar que, segundo Gontijo e Rodrigues (2022), em 1897 o físico e matemático Joseph Larmor (1857-1942) realizou um importante trabalho teórico para um melhor entendimento do espectro de radiação do corpo negro. Ele utilizou conceitos clássicos atestando que ondas eletromagnéticas são emitidas pelo corpo negro, quando do movimento aleatório de cargas elétricas superficiais aceleradas. Em 1899 Otto Lumer (1860-1925) e Ernest Pringsheim (1859-1917) realizaram as primeiras medidas precisas da intensidade do espectro de radiação do corpo negro

em função do comprimento de onda. É possível verificar o deslocamento para a esquerda do ponto máximo de cada curva para cada uma das temperaturas indicadas, o deslocamento de Wien de 1893.

Rubens, um competente físico experimental, no chá da tarde de 7 de outubro de 1900, relata ao amigo Planck que desenvolvera um trabalho em laboratório juntamente com Ferdinand Kurlbaum (1857-1927) que atestou o fracasso da fórmula de Wilhelm Wien e Louis Paschen (1865-1940) de 1896 para comprimentos de onda longos. Afirmou ainda que outra fórmula clássica de John William Strutt ou Lorde Rayleigh (1842-1919) de junho de 1900, teria funcionado melhor para os dados experimentais. Após a saída de Rubens, Planck começou a trabalhar para encontrar uma fórmula interpolando as expressões de Wien-Paschen e Rayleigh-Jeans, e então chegou a sua famosa lei da radiação.

De acordo com Mukunda (2008), assim nasceu a teoria quântica no espaço de algumas horas de uma noite de domingo. Na mesma noite, Planck teria enviado um cartão postal para Rubens relatando seus resultados teóricos, o qual recebera na manhã seguinte. Planck, dois dias depois em 9 de outubro de 1900, apresenta sua teoria em uma reunião na Sociedade Alemã de Física e relata mais tarde que mesmo dia em que formulou a lei da radiação, começou uma busca por um significado físico. Dois meses depois, em uma sexta-feira no dia 14 de dezembro de 1900, Planck apresenta em outra reunião na mesma Sociedade, uma modificação incorporando à sua teoria, a idéia revolucionária de quantização de energia.

O próprio Planck e praticamente toda comunidade acadêmica durante anos, não deram a devida reverência a teoria quântica apresentada por ele em 1900 e corroborada por Einstein em 1905 e em 1907. Planck em 1907 entusiasmava-se com a teoria relativística, mas ainda não se convencera do modelo quântico da luz de Einstein, que era uma continuidade da sua teoria revolucionária de 1900.

Mesmo após o protagonismo de Einstein na Conferência de Solvay de 1911 com a apresentação para a comunidade científica da teoria dos quanta, Einstein ainda se desvencilhava do ostracismo acadêmico e da própria insegurança *do pai da Mecânica Quântica*. Somente em 1913, Planck, Walther Nernst (1864-1941), Heinrich Rubens (1865-1922) e Emil Walburg (1846-1931) recomendaram Einstein para a Academia Prussiana de Ciências.

A vida pessoal de Planck não denotou o mesmo sucesso de sua vida acadêmica. Perde seu filho mais velho Karl na Grande Guerra e seu filho mais novo

Erwin, executado pelos nazistas. Suas filhas gêmeas, Emma e Grete falecem no trabalho de parto, mas Max Planck se manteve sóbrio até o final de sua vida.

### **3.2 EFEITO FOTOELÉTRICO: A INADEQUAÇÃO AO ELETROMAGNETISMO CLÁSSICO E O NASCIMENTO DO FÓTON**

O efeito fotoelétrico refere-se à emissão de elétrons por um material quando exposto à radiação eletromagnética, como a luz. Embora hoje seja totalmente compreendida dentro do ambiente da mecânica quântica, sua história registra questões não resolvidas no final do século XIX e início do século XX, período em que ocorreram grandes avanços na compreensão da luz e da matéria.

A primeira vez que se tem notícia do uso do termo em latim *annus mirabilis* foi a alusão ao polímata Isaac Newton (1642-1727), termo cunhado pelo poeta também inglês John Dryden quando escreveu “*Annus mirabilis: the year of wonders, 1666*”. Apesar do místico e apocalíptico número 666 coadunar com o Grande Incêndio de Londres, que se iniciou na casa do padeiro real Thomas Faryner e devastou em quatro dias mais de treze mil casas, este mesmo ano foi muito frutífero para Newton. Assim, o termo *annus mirabilis*, refere-se ao fecundo ano de Newton e ao miraculoso ano para Dryden e seu poema, que relata a vitória da Inglaterra em três batalhas e o salvamento de muitas vidas com o controle das chamas sobre Londres, reconstruída pelo rei Charles III. Em 1666, o filósofo natural Isaac Newton desenvolveu importantes avanços como trabalhos experimentais em Óptica Geométrica, teorias que culminaram na Lei da Gravitação Universal, conceitos sobre o movimento e o Método das Fluxões, que no futuro foi chamado de Cálculo Diferencial.

O termo *annus mirabilis* também está relacionado a outro momento histórico, ao ano de 1905 e a um futuro ícone da ciência, Albert Einstein (1879-1955). Segundo Coelho e Ferreira (2006), com apenas 26 anos e cinco anos depois de ter se graduado na Escola Politécnica Federal de Zurique, escola em que foi reprovado em seu primeiro vestibular; o jovem e desconhecido Einstein teve também em 1905 o seu ano miraculoso.

Na revista alemã *Annalen der Physik* (anais de Física) que existe até hoje desde 1790, Einstein publica em 1905, mesmo ano que obtém seu doutoramento pela Universidade de Zurique, cinco importantes artigos. Três deles surpreenderam o

mundo científico e alavancaram a Física Moderna instituindo a Teoria da Relatividade Especial, a Teoria do Movimento Browniano e a Teoria do Efeito Fotoelétrico.

O primeiro artigo "*Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt*" ("Sobre um ponto de vista heurístico concernente à geração e transformação da luz"), considerado revolucionário pelo próprio Einstein, este artigo formula a lei do efeito fotoelétrico, utilizando conceitos de unidades discretas de energia ou quanta, presentes no artigo escrito em 1900 pelo professor da Universidade de Berlim, Max Planck.

O segundo artigo, "*Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*" ("Sobre uma nova determinação das dimensões moleculares"), foi aceito, no mesmo ano, como tese de doutoramento na Universidade de Zurique. De acordo com Einstein, o artigo tratava da "determinação do tamanho exato de átomos a partir da difusão e da viscosidade em soluções diluídas de substâncias neutras".

O terceiro artigo, "*Über die von der molekulartheoretischen Theorie der Wärmegeforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*" ("Sobre o movimento de partículas suspensas em fluidos em repouso, como postulado pela teoria molecular do calor"), aborda o movimento Browniano, descrito pela primeira vez em 1828, pelo botânico Robert Brown ao observar que o pólen de diversas plantas moviam-se de maneira estocástica mesmo se o líquido em questão estiver calmo.

O quarto artigo, "*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*" ("Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento") era, segundo Einstein (Stachel, p. 5), "apenas um esboço grosseiro" sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento, usando uma modificação da teoria do espaço e tempo. Este "esboço" contém o primeiro trabalho sobre a Teoria da Relatividade Restrita.

No quinto artigo, "*Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*" ("A inércia de um corpo depende da sua energia?") Einstein propõe sua famosa equação  $E = mc^2$ .

### 3.2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

James Clark Maxwell (1831-1879) em 1864 estabeleceu a relação entre o eletromagnetismo e a luz nas equações que levam o seu nome. Maxwell pode demonstrar que os campos elétricos e magnéticos se propagavam à velocidade da

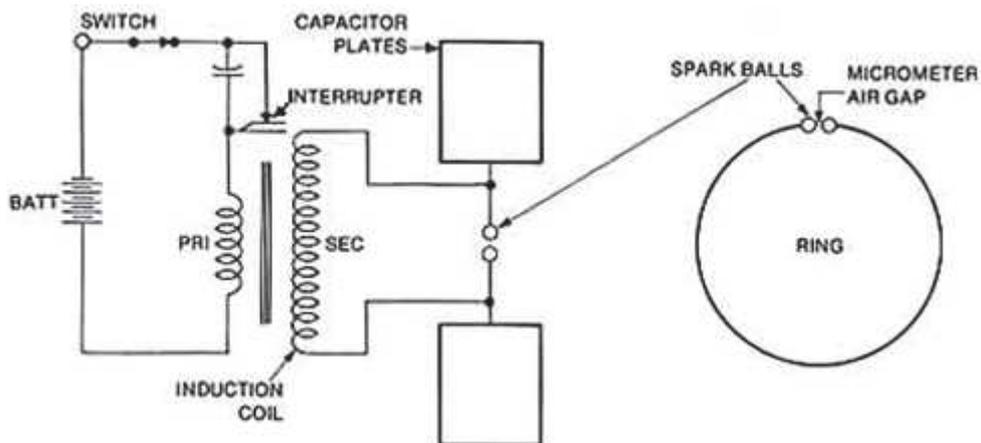
luz, estabelecendo formalmente o conceito de ondas eletromagnéticas. De acordo com Gutmann e Oliveira (2002), isto significou a unificação do Eletromagnetismo com a Ótica, duas áreas da Física consideradas, até aí, independentes.

Em 1887 Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), ex-aluno de Gustav Kirchhoff (1824-1887) e de Hermann Von Helmholtz (1821-1894), executou uma série de experimentos visando checar Maxwell, produzindo e detectando em seu laboratório, as ondas eletromagnéticas (também chamadas mais tarde ondas hertzianas). Ele permitiu o nascimento de uma nova era tecnológica: a da transmissão de informação através de ondas eletromagnéticas.

Guglielmo Marconi (1874-1937) em 1894, ano da morte de Hertz, empreendeu a primeira aplicação destas ondas, o primeiro telégrafo sem fio. Conforme afirma Gutmann e Oliveira (2002), Maxwell e Hertz, mortos prematuramente aos 48 e 37 anos, respectivamente, não viram o desenvolvimento tecnológico promovido por suas descobertas.

Hertz realizou seus experimentos aplicando uma diferença de potencial oscilante em um circuito, com uma pequena abertura, ligado à terra, e produziu centelhas a iguais intervalos de tempo. No momento do segundo centelhamento, o campo elétrico na região da pequena abertura caía rapidamente a zero, crescendo até a próxima centelha. O dispositivo de Hertz caracteriza o que hoje é chamado de dipolo oscilante. Como antena receptora, ele usou um anel de metal aberto, uma das extremidades contendo uma fina ponta de cobre e a outra uma esfera de latão. Uma pequena centelha na abertura do anel indicava a detecção de uma onda eletromagnética incidente. Hertz fez experimentos de onda estacionária, refletindo os seus pulsos primários em uma placa metálica e daí determinou o comprimento de ondas da radiação eletromagnética utilizada e a velocidade da luz. O experimento foi realizado com ondas de comprimento 1 m, na faixa que caracteriza o que é chamado hoje de radiofrequência.

Figura 6 - Esquema experimental de Hertz



Fonte: [https://i2.wp.com/alpoma.net/tecob/wp-content/uploads/2013/04/montaje\\_hertz.jpg?fit=620%2C250&ssl=1](https://i2.wp.com/alpoma.net/tecob/wp-content/uploads/2013/04/montaje_hertz.jpg?fit=620%2C250&ssl=1)

Ao realizar esses experimentos, Hertz verificou outro efeito. A centelha secundária (na abertura do anel) era mais intensa quando a abertura do anel era iluminada pela centelha primária. Esse resultado foi publicado em 1887 em um artigo intitulado *On the Effect of Ultraviolet Light upon the Electric Discharge* (Sobre um efeito de Luz Ultravioleta na descarga elétrica). A produção e a detecção de ondas hertzianas significou, à época, a comprovação experimental dos trabalhos teóricos de Maxwell. Já o efeito da luz ultravioleta na descarga elétrica era algo novo para o qual não havia explicação.

Em 1889, Wilhelm Hallwachs mostrou que partículas de carga negativa eram ejetadas da superfície de metais como o zinco, sódio e potássio quando as superfícies eram iluminadas com radiação ultravioleta. Conforme relata Filho (2015), alguns historiadores da ciência afirmam que este efeito potencializado pela luz ultravioleta, também chamado de efeito Hallwachs, fora observado em 1872 por Aleksandr Grigorievich Stoletov (1839-1896) quando trabalhava como professor na Universidade de Moscou. O termo efeito fotoelétrico seria cunhado posteriormente antes mesmo do surgimento do vocábulo *fóton*, proposto em 1926 pelo químico Gilbert Newton Lewis (1875-1946), professor da Universidade da Califórnia.

Em 1902, oito anos após a morte prematura de Hertz, um ex-assistente seu, Philipp Lenard (1862-1947), mediu a relação carga/massa dessas partículas e pôde confirmar que o aumento do centelhamento observado por Hertz era o resultado da emissão de elétrons, que ele, Lenard, chamou de fotoelétrons. A inadequação de tal efeito com o eletromagnetismo de Maxwell despertou a atenção e curiosidade de

muitos pesquisadores, pois a natureza contínua da luz proposta Maxwell, propagando-se em um espaço contínuo e interagindo com uma matéria contínua deveria apresentar dificuldades de interação com uma matéria descontínua, de acordo com a física clássica do final do século XIX.

O transporte de energia em uma onda eletromagnética, por exemplo a luz, é descrito, por Maxwell, pelo vetor de Poynting, produto vetorial dos campos elétrico e magnético, e é distribuída em todo o espaço no qual a onda existe. O vetor de Poynting funciona perfeitamente para ondas se propagando no vácuo e pode ser usado para determinar a quantidade de radiação solar que atinge a Terra. No entanto, fracassa ao descrever a interação da radiação com a matéria como no efeito fotoelétrico.

O problema do efeito fotoelétrico estava relacionado à compreensão da relação entre a frequência da luz incidente e a energia cinética dos elétrons ejetados de um material. A teoria clássica da física não conseguiu explicar alguns aspectos fundamentais evidenciados empiricamente.

De acordo com o eletromagnetismo clássico, a energia deveria ser absorvida de forma contínua e acumulada pelos elétrons em um material no decorrer do tempo e deveria ser ampliada à medida que a intensidade da luz aumentava. Assim, qualquer frequência de radiação arrancaria elétrons. No entanto, as observações experimentais revelaram um padrão diferente: a energia cinética dos elétrons ejetados não aumentava gradualmente com o aumento da intensidade da luz, mas sim com o aumento da frequência da luz incidente. Além disso, somente certas frequências a partir de um valor mínimo, eram capazes ejetar elétrons.

Em seu primeiro artigo do ano de 1905, Einstein apresenta um trabalho esclarecedor para o fenômeno do efeito fotoelétrico, no qual utiliza a hipótese de discretização da energia que fora adotada por Max Planck há cinco anos, para encontrar uma base teórica que solucionou a discrepância empírica da radiação do corpo negro. Dessa forma, o efeito fotoelétrico torna-se uma maneira experimental e independente das experiências de radiação de corpo negro para determinação da constante  $h$ , evidenciando que a constante  $h$  não era apenas um artifício matemático para obtenção da fórmula de Planck.

Ele propôs que a luz não era uma onda contínua, como a teoria clássica sugeria, mas sim composta por partículas discretas de energia (quanta). Cada quantum de luz (mais tarde será chamado de fóton) carrega uma quantidade específica de energia proporcional à frequência da luz. Esta energia individual atua

exclusivamente para atuar em cada elétron. Essa idéia permitiu a Einstein explicar por que a energia cinética dos elétrons ejetados dependia da frequência da luz incidente e não da intensidade. Aumentar a intensidade de luz significa aumentar a quantidade de fótons e não a energia individual de cada fóton. Assim, grande intensidade de luz com baixa frequência, significa a existência de muitos fótons com baixa energia, que poderão não arrancar nenhum elétron.

A resolução de Einstein para o problema do efeito fotoelétrico não apenas esclareceu um paradoxo, mas também sedimentou o início de uma teoria quântica evidenciada cinco anos antes por Planck, porém sem apoio da comunidade científica. Desperta também a compreensão da dualidade onda-partícula da luz a ser comprovada experimentalmente e descrita a partir de 1925 com a consolidação da Mecânica Quântica.

. Conforme afirma Gutmann e Oliveira (2002), a comunidade científica levou mais de 10 anos para reconhecer a validade do trabalho de Einstein e para aceitar as rupturas nas teorias clássicas. Em 1916, Robert Andrews Millikan (1868- 1953), conhecido pelo experimento que determinou a carga elementar, publicou um trabalho acurado sobre a solução apresentada por Einstein para o efeito fotoelétrico, reconhecendo: “Eu trabalhei 10 anos de minha vida testando a equação de Einstein de 1905 e contrário a todas as minhas expectativas, eu fui compelido em 1915 a assegurar sua verificação experimental, a despeito de sua não razoabilidade desde que ela parece violar tudo que eu sabia acerca da interferência da luz.” Em 1921, Einstein recebeu o prêmio Nobel de Física pelas suas contribuições à Física Teórica, em particular por seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico.

### **3.2.2 DISPERSÃO DE RAYLEIGH**

Como no efeito fotoelétrico, a dispersão também é uma interação da radiação com a matéria. Trata-se da dispersão da luz ou qualquer radiação eletromagnética por partículas bem menores que o comprimento de onda dos fótons dispersados. Ocorre quando a luz se propaga em sólidos e líquidos transparentes e com maior frequência nos gases. A dispersão de Rayleigh da luz solar na atmosfera é a principal razão para a coloração azul do céu. Este termo faz referência à John William Strutt (1842-1919) matemático e físico inglês, possuidor do título de Barão de Rayleigh e prêmio Nobel

de Física de 1904. Rayleigh foi orientador de J.J. Thomsom e G. P. Thomsom, pai e filho agraciados com Nobéis de 1906 e 1937, respectivamente.

Quando o tamanho das partículas é maior que o comprimento de onda, a luz não se decompõe em suas componentes cromáticas e todos os comprimentos de onda são igualmente dispersados, motivo da cor branca para uma nuvem, sal e açúcar. Para ocorrer dispersão da luz, o tamanho das partículas deve ser similar ou menor que o comprimento de onda. O grau de dispersão de Rayleigh que sofre um raio de luz depende do tamanho das partículas e do comprimento de onda da luz, conforme o coeficiente de dispersão: onde  $n$  é o índice de refração,  $d$  é o diâmetro da partícula e  $\lambda$ , o comprimento de onda da luz.

$$\sigma = \frac{2\pi^5 d^6}{3\lambda^4} \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \quad (28)$$

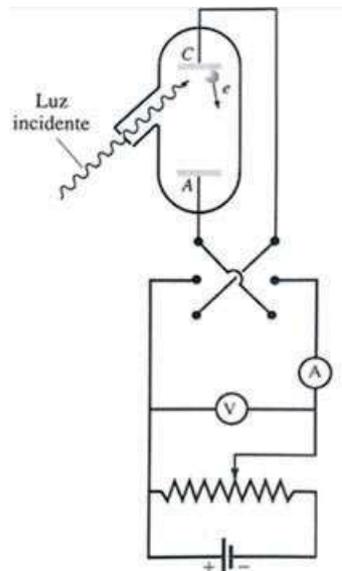
O conceito de dispersão, de acordo com Kerr (2006), pode explicar a coloração azul do céu. Como as cores que enxergamos fazem parte de uma pequena parcela do espectro eletromagnético, a qual compreende os tamanhos de, aproximadamente, 380 a 720 nm de comprimento de onda (violeta a vermelho, respectivamente), em face da equação acima podemos concluir que existem algumas que são mais espalhadas do que outras, ou seja, para comprimentos de onda pequenos, como é o caso do violeta (~400 nm) e azul (~450 nm). Então por que enxergamos o céu com coloração azul se há, de fato, um maior espalhamento de ondas de cor violeta? O motivo é a fisiologia do olho humano e a nossa percepção às cores. O conjunto olho humano-cérebro é o responsável por enxergarmos a coloração azulada, pois no olho existem células chamadas "cones", que nos dão a possibilidade de percepção das diferentes cores, e são muito mais sensíveis ao vermelho, verde e, principalmente, ao azul. Assim enxergamos o céu com a coloração azulada, ao invés da roxa. Astronautas vêem a Terra azul em face da maior absorção de longos comprimentos de onda pelos oceanos terrestres, fazendo com que os as ondas de menores comprimentos, principalmente aquelas que correspondem ao azul, sejam refletidas até os olhos de observadores externos ao nosso planeta.

### 3.2.3 A EXPERIÊNCIA DE LENARD

Devemos aqui ressaltar que o efeito fotoelétrico em si, não contraria os ditames da Física clássica e um estudo bem detalhado deste efeito foi efetuado por Phillip Lenard no início do século XX.

Lenard usou um dispositivo composto de um tubo de gás rarefeito com anodo e catodo, um em cada extremidade. O catodo foi iluminado a partir de uma janela, com o objetivo de promover a ejeção de elétrons do catodo em direção ao anodo. Este movimento de elétrons desencadeia uma corrente elétrica que pode ser medida com a colocação de um amperímetro no circuito elétrico, constituído com a presença de um gerador que produz uma ddp variável, de tal sorte que os seus terminais podem ser invertidos, mudando o sinal desta ddp. Lenard teve o intuito de estudar o comportamento da corrente elétrica no amperímetro em função das características da luz que incidia no catodo, ou seja, sua frequência e sua intensidade.

Figura 7 - Esquema experimental de Phillip Lenard



Fonte: Fonte: TIPLER, P. A. **Física**: para cientistas e engenheiros, vol 4, 3ª Ed. p. 182, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1995.

Foi verificado que sem luz no catodo, a corrente elétrica registrada no amperímetro era zero, como esperado. Com incidência de luz, percebeu-se que o

valor da corrente aumentava com o aumento da intensidade luminosa, o que também era esperado pela teoria clássica. Outro fato observado foi que a aparição da corrente acontecia no instante da incidência da luz no catodo, independentemente da intensidade luminosa. Este surgimento instantâneo de corrente não pode ser explicado pela teoria clássica, pois uma intensidade luminosa baixa deveria demandar um tempo para um devido acúmulo de energia, necessária para ejetar elétrons. Um terceiro fato observado foi que somente surgia corrente elétrica, a partir de certo valor mínimo de frequência da luz (frequência de corte) incidida no catodo do experimento e cada catodo feito de um metal diferente tinha uma frequência de corte diferente. Isto também contrariava a física clássica.

Com a aplicação de uma tensão elétrica no tubo a partir de 0V, o valor da corrente aumentava e a partir de determinado valor de ddp, o valor da corrente elétrica se estabilizava e continuava constante mesmo aumentando-se a tensão. Isto pode ser explicado pelo fato de a ddp somente direciona os elétrons ejetados ao anodo e aumentando esta ddp, não são arrancados mais elétrons.

Quando a polaridade é invertida, os elétrons ejetados são compelidos a voltar em face desta tensão elétrica retardadora. O valor da corrente elétrica diminui até chegar a zero para uma tensão, chamada potencial de corte ( $V_0$ ).

Para retirar fotoelétrons do catodo é necessária uma quantidade de energia, porém se estes fotoelétrons estão na superfície deste metal, esta demanda de energia será mínima, que será chamada por Einstein de função trabalho ( $\phi$ ). Então se a energia incidente no catodo for maior que a função trabalho, haverá ejeção de elétrons próximos à superfície do metal. Elétrons ejetados, a partir da borda ou não, vão possuir uma energia cinética ( $E_c$ ) equivalente à diferença entre a energia recebida da radiação ( $E_f$ ) e a energia gasta ( $E_g$ ) para ser arrancado do catodo.

$$E_c = E_f - E_g \quad (29)$$

Para elétrons da borda, esta energia cinética será máxima ( $E_{c\text{máx}}$ ) e a energia para arrancá-los será a Função trabalho ( $\phi$ ).

$$E_{c\text{máx}} = E_f - \phi \quad (30)$$

Para que estes elétrons com energia cinética máxima possam ser freados, devem estar submetidos ao potencial de corte ( $V_0$ ). Então:

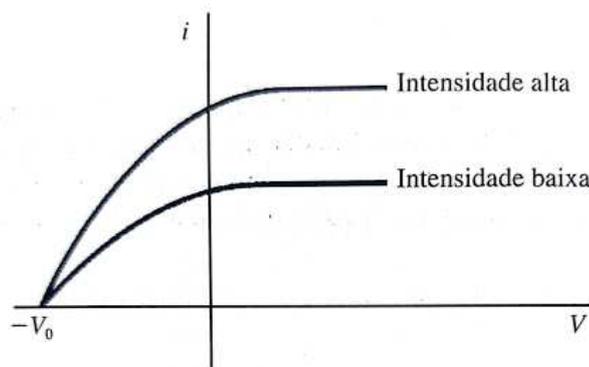
$$E_{c\text{máx}} = eV_0$$

$$V_0 = \frac{E_{c\text{máx}}}{e} \quad (31)$$

Se o experimento é repetido para uma intensidade de luz maior e aumentando-se o potencial a partir de zero, a corrente aumenta até novamente se estabilizar e manter-se constante mesmo com o aumento deste potencial. Esta corrente constante é maior que a corrente constante quando a intensidade de luz era menor no primeiro experimento. Isto não contraria a teoria clássica.

O que não pode ser explicado é o fato de, mesmo para correntes maiores, o potencial de corte é o mesmo. O potencial de corte deveria ser a razão entre a energia cinética máxima e a carga do elétron. E ainda, a energia cinética máxima depende da diferença da energia incidente e a função trabalho (constante). Pela teoria clássica, maior intensidade de luz traduz em maior energia incidente, e, portanto, maior energia cinética e maior função trabalho. Assim, o potencial de corte deveria ser maior para correntes maiores, no entanto, é o mesmo (FUNÇÃO [...], 2011).

Gráfico 5 - ( $i \times V$ ) para dois valores de Intensidade de luz



### 3.2.4 OS POSTULADOS DE EINSTEIN E A EQUAÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO

O problema do efeito fotoelétrico resolvido por Einstein estava relacionado à interpretação da natureza da luz e à compreensão de como ela interage com a matéria. A teoria clássica da luz, baseada na teoria eletromagnética de Maxwell, previu que a intensidade da luz incidente sobre um material deveria resultar em uma quantidade proporcional de energia despendida para os elétrons do material, independentemente da frequência da luz. No entanto, as observações experimentais do efeito fotoelétrico contradiziam essa previsão.

Duas questões foram resolvidas. A primeira foi como explicar a independência da frequência da luz incidente na intensidade da corrente elétrica. Segundo a teoria clássica, aumentar a intensidade da luz (ou seja, o número de fótons incidentes) deveria resultar em uma maior quantidade de energia consumida para os elétrons, levando a uma maior energia cinética e, portanto, uma maior velocidade dos elétrons e, conseqüentemente, uma corrente elétrica mais intensa. No entanto, os experimentos demonstraram que mesmo quando a intensidade da luz era aumentada, a velocidade dos elétrons não aumentava proporcionalmente.

A segunda foi como entender a dependência da frequência na energia dos elétrons ejetados. Outra observação experimental crucial era que a energia cinética dos elétrons ejetados era diretamente proporcional à frequência da luz incidente, não à sua intensidade. Isso estava em conflito direto com a teoria clássica, que não oferecia uma explicação adequada para essa relação.

Einstein resolve esses problemas ao propor uma abordagem quântica radical. Ele sugeriu que a luz não era uma onda contínua, como previsto pela teoria eletromagnética clássica, mas sim corroborou Planck adotando a quantização da luz. Cada fóton carregava uma quantidade específica de energia proporcional à frequência da luz. O valor da constante de Planck de acordo com a 26ª Conferência Geral de Pesos e Medidas é  $h = 6,62607015 \text{ J}\cdot\text{s}$

$$\boxed{E = h\nu} \quad (32)$$

Onde  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência da radiação incidente

Conforme relata Rocha *et al* (2015), Einstein corrobora a quantização de Planck e ressalta a importância da frequência da luz, pois não havia ejeção de elétrons abaixo de certas frequências críticas, qualquer que fosse a intensidade da radiação.

“Ele explicou tais aspectos experimentais usando a hipótese quântica. Ele afirmaria que a luz comportava-se como um feixe de partículas e que somente os elétrons atingidos por um dos projéteis (de luz) é que seriam afetados. O fato de uma das partículas ser ejetada, ou não, dependia da energia contida no projétil. Utilizando a equação de Planck, ele pressentiu o que a quantidade de energia dependia diretamente da frequência e que a baixo de uma frequência crítica, o efeito era demasiado fraco para deslocar o elétron. A partir de tais premissas, ficou claro para ele que a luz era constituída de partículas. Em síntese, Einstein explicou o efeito fotoelétrico, partindo da hipótese de Planck, e afirmando que, ao invés de imaginar a luz como uma onda de energia discreta, era mais conveniente imaginá-la como formada por partículas. Com isso, surgiu o conceito de quantum de luz, ou fóton. (ROCHA *et al.*, 2015, p. 311).

Em 1905 em um dos artigos do *Annus Mirabilis*, Einstein propõe três postulados a respeito da natureza da luz e de qualquer radiação eletromagnética. O primeiro corrobora Planck e vai além, afirmando não só as trocas de energia entre matéria e energia sejam quantizadas, mas a própria energia luminosa seja quantizada, onde cada quantum de luz tem energia proporcional a sua frequência.

$$E = h\nu$$

O segundo postulado afirma que um fóton entrega toda sua energia para um elétron, e não parcialmente. O terceiro postulado institui que a interação entre fóton e elétron é por par, ou seja, um fóton só entrega energia para um elétron, ou seja, ele não divide sua energia entre dois elétrons ou mais. Assim tudo que não fora explicado pela teoria clássica, será sanado por estes postulados.

O primeiro problema que a teoria clássica não explicava era o fato do intervalo de tempo ser zero entre a incidência de luz e a aparição de corrente. Agora com a teoria quântica pode ser explicado pelo fato de que basta um fóton com energia mínima atingir um elétron que ele será ejetado, produzindo uma corrente elétrica instantânea.

O segundo problema consistia na existência de uma frequência de corte, o que pode ser explicado pelo fato de que se um fóton possui energia mínima maior que a Função Trabalho, um elétron da superfície do catodo será ejetado. Esta energia depende de uma frequência mínima, a frequência de corte, que depende de uma constante da natureza ( $h$ ) e das características do metal ( $\phi$ ).

$$\begin{aligned}
 h\nu_0 &= \phi \\
 \boxed{\nu_0 &= \phi/h}
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

O terceiro problema era a existência de um único potencial de corte independente da intensidade luminosa promotora de corrente. Sabe-se que o potencial de corte é dado por:

$$V_0 = \frac{E_{c_{\text{máx}}}}{e}$$

Adotando os postulados de Einstein

$$E_{c_{\text{máx}}} = E_f - \phi$$

$$E_{c_{\text{máx}}} = h\nu - \phi$$

$$\text{Então: } \boxed{V_0 = \frac{h\nu - \phi}{e}}$$

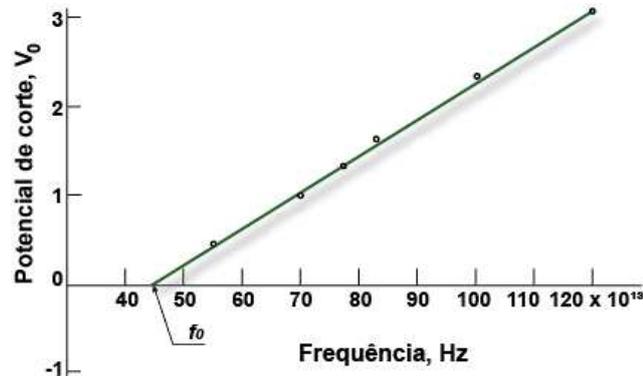
$$\text{Ainda temos que: } \quad V_0 = \frac{h\nu - h\nu_0}{e} \tag{34}$$

$$\text{Que nos leva a: } \boxed{V_0 = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0)}. \tag{35}$$

Podemos então constatar que este potencial de corte não depende da intensidade luminosa.

Em 1916 Robert Andrews Millikan (1868-1953) realiza um experimento não realizado por Lenard e corrobora os postulados de Einstein. Millikan determinou o potencial de corte em função da frequência da luz incidente. E ainda pode calcular também, independente de Planck, a constante de mesmo nome. Planck em 1900 utilizou um ajuste de uma função da intensidade de radiação do corpo negro para calcular o valor de  $h$ , *hilfsgroosse* ou variável aleatória em alemão. Millikan em 1916 utiliza o efeito fotoelétrico e chega ao mesmo valor. Assim, Einstein confirma Planck e Millikan confirma Einstein (EFEITO [...], 2011).

Gráfico 6 - Dados obtidos por Millikan para  $V_0$  em função de  $f$  no Efeito Fotoelétrico  
Do coeficiente angular ( $h/e$ ), pode-se obter a cte de Planck



Fonte: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSwl83uEHOKt0L1f\\_Z6jY-ClxyWTWipvxUumw&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSwl83uEHOKt0L1f_Z6jY-ClxyWTWipvxUumw&usqp=CAU)

### 3.3 CAPACIDADE TÉRMICA DOS SÓLIDOS E A LEI DE DULONG – PETIT: A RACHADURA OCULTA NA TERMODINÂMICA E OS PRIMÓRDIOS DA FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA

Em 1907 no artigo: A teoria da radiação de Planck e a teoria do calor específico (*Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme*), Einstein usando a quantização, explica a duradoura discrepância entre o previsto pela Física Clássica e o observado para a Capacidade Calorífica de sólidos monoatômicos.

Tudo começa em 1819 Alexis-Trérèse Petit (1791-1820) e Pierre-Louis Dulong (1785-1838) publicaram um artigo intitulado Investigação sobre alguns aspectos importantes da teoria do calor (*Recherches sur quelques points importants de La Théorie de La Chaleur*) que mais tarde ficou conhecida como Lei de Dulong-Petit, que relaciona a capacidade calorífica dos elementos com sua massa atômica. Segundo Braga (2001), nesta publicação de trabalhos puramente experimentais com treze substâncias, os autores afirmaram que para sólidos, o produto do calor específico à volume constante, pela massa atômica ou massa molecular é constante.

Eles ainda encontraram para vários metais que o calor específico é proporcional a massa atômica para um valor constante de aproximadamente  $25 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , em torno de  $6 \text{ cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , posteriormente chamada de unidade de Dulong-Petit. Junior (2021) relata que, em 1832, Franz Neumann (1798-1895) estendeu esse resultado para corpos compostos e Victor Regnault (1810-1878) após longo trabalho

empírico, confirmou em 1841 a lei de Dulong & Petit para todos os corpos sólidos estudados.

A tabela abaixo é a original apresentada no artigo de Dulong e Petit, com os dados convertidos para J/K mol. Conforme Braga (2001), os autores usaram a massa molar normalizada para a massa molar do oxigênio. O valor de 16 g/mol foi usado para remover esta normalização conforme resultados apresentados na tabela abaixo. O erro percentual relativo,  $\varepsilon = \frac{C_v - 3R}{3R} \times 100$ , é também apresentado, sendo seu valor médio de 1,1415.

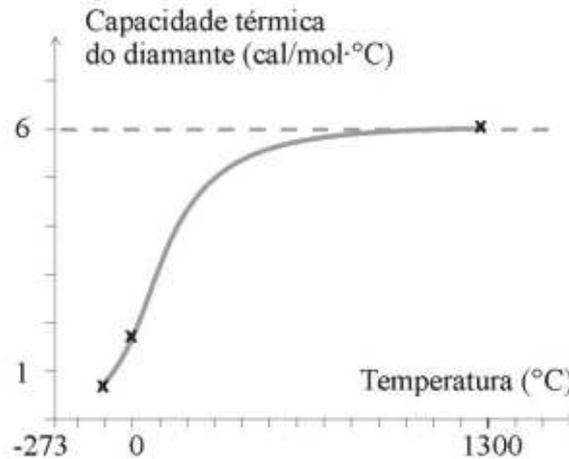
Tabela 2 - Dados originais de Dulong e Petit: Capacidade calorífica em J/K.mol

Sistema	$C_V$	$\varepsilon$
Bismuto	25,6150	2,6984
Chumbo	25,3743	1,7331
Ouro	24,7724	0,6802
Platina	25,0131	0,2815
Estanho	25,2740	1,3309
Prata	25,1402	0,7946
Zinco	24,9864	0,1779
Telúrio	24,5784	1,4578
Cobre	25,1134	0,6874
Niquel	25,5415	2,4035
Ferro	24,9529	0,0438
Cobalto	24,6453	1,1896
Enxofre	25,2806	1,3577

Fonte: BRAGA, J. P. O colapso da equi-partição da energia. Química Nova, v. 24, n. 5, p. 693-699, 2001.

Junior (2021) descreve que no decorrer do tempo, foi verificado que vários materiais violavam a lei de Dulong & Petit. Em 1872 Heinrich Weber (1842-1913), pesquisador em Zurique e futuro professor de Einstein, investigou exaustivamente a capacidade térmica do diamante de  $-50^\circ\text{C}$  até  $1300^\circ\text{C}$ , comprovando a citada violação. Ludwig Boltzmann (1844-1906) em 1871 já apresentara uma explicação usando a teoria clássica, repetido também sem sucesso em 1893 por Franz Richarz (1860-1920).

Gráfico 7 - Dados de Weber (1872) para a Capacidade Térmica do diamante



Fonte: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7683302/mod\\_resource/content/1/HFQ-03.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7683302/mod_resource/content/1/HFQ-03.pdf)

No final do século XIX e início do século XX o desvio do calor específico em baixas temperaturas foi muito investigado pela comunidade científica, como Karl Von Linde (1842-1934) em 1896, William A. Tilden (1842-1926) em 1903 e James Dewar (1842-1923) em 1905. Assim, foi evidenciado que o calor específico dos sólidos tende a zero à medida que se aproxima da temperatura de zero absoluto.

### 3.3.1 CAPACIDADE TÉRMICA

Ao fornecer calor para uma determinada substância variamos sua temperatura, porém substâncias diferentes possuem variações de temperaturas diferentes para a mesma Quantidade de Calor recebida ou perdida. Assim podemos fazer a distinção destes corpos pela Capacidade Térmica, que é a razão entre o Calor trocado e a variação de temperatura que este Calor provoca.

$$C(T) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{Q}{\Delta T} \quad (36)$$

Quando a variação de temperatura tende a zero, a Capacidade Térmica é uma função da temperatura. Para um gás a Capacidade Térmica depende do processo, assim temos capacidade térmica a volume constante ( $C_v$ ) e à pressão constante

( $C_p$ ). Em um sólido podemos aceitar que  $C_v = C_p$ , e isto pode ser explicado pela primeira lei da Termodinâmica:

$$dE = dQ + dW \quad (37)$$

Como os sólidos possuem uma variação de volume que tende a zero, a fração relacionada ao Trabalho também tende a zero. Assim a variação da energia interna em um sólido depende exclusivamente das trocas de Calor e nos sólidos:

$$C = \frac{\partial E}{\partial T} \quad (38)$$

Para se calcular a Capacidade Térmica, temos que calcular a Energia do sólido. Para isto, fazemos uso de um tópico da Mecânica Estatística clássica: o Teorema da Equipartição de Energia, que no equilíbrio térmico, cada grau de liberdade contribui com  $\frac{kT}{2}$ , onde  $k$  é a constante de Boltzmann e vale  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K. Podemos exemplificar com o caso de um gás monoatômico com três graus de liberdade nas dimensões de volume.

$$E = \frac{3}{2}NkT \Rightarrow C_v = \frac{3}{2}Nk \quad (39)$$

Se substituirmos  $N$  por  $nN_A$ , teremos:  $E = \frac{3}{2}nN_AkT \Rightarrow C_v = \frac{3}{2}nN_Ak$ .

E ainda para  $R = N_Ak$ , temos:

$$\boxed{E = \frac{3}{2}nRT \Rightarrow C_v = \frac{3}{2}nR} \quad (40)$$

Para os sólidos, utilizando o modelo clássico de Boltzmann, que vislumbra átomos em rede cristalina vibrando em torno de pontos fixos, temos para a Energia total:

$$E = 3NkT \Rightarrow C = 3Nk \quad (41)$$

Nesta descrição temos  $N$  átomos em equilíbrio térmico com seis graus de liberdade, três de energia cinética e três de energia potencial. Assim a capacidade térmica por átomo vale  $3k$  para todas substâncias, conforme a lei de Dulong-Petit. Lembrando que:

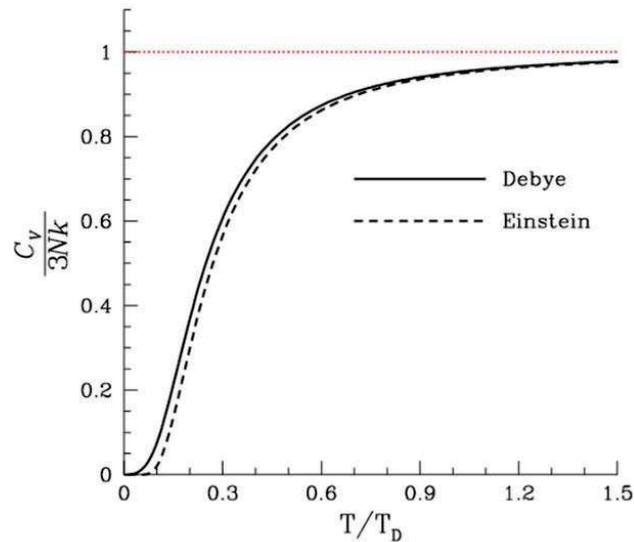
$$C = 3Nk = 3 nN_A k = 3nR \quad (42)$$

$\frac{C}{n} = 3R$ , que é a Capacidade Térmica por mol a volume constante, que vale aproximadamente  $25 \frac{J}{Kmol}$  (TERMODINÂMICA [...], 2020).

### 3.3.2 A SOLUÇÃO DE ENSTEIN

Capacidade térmica ou calorífica está relacionada à capacidade dos átomos vibrarem, ou de armazenarem energia. De acordo com a teoria clássica, os átomos poderiam oscilar em sua posição de equilíbrio em qualquer valor de energia ou frequência. Para o modelo de Einstein (1907) estes valores serão discretos e os átomos de um sólido continuam vibrando em torno de uma posição fixa, porém estas vibrações são quantizadas, ou seja, os átomos são agora osciladores quânticos e não mais clássicos. Isto levará à explicação do fato da capacidade térmica tender a zero para temperaturas muito baixas, confirmando os dados experimentais não explicados pela teoria clássica.

Gráfico 8 - Capacidade Térmica adimensional dividida por 3 em função da Temperatura segundo os modelos de Einstein, de Debye e o de Dulong-Petit



Fonte: [https://gl.wikipedia.org/wiki/Capacidade\\_calor%C3%ADfica](https://gl.wikipedia.org/wiki/Capacidade_calor%C3%ADfica)

Considerando a quantização do movimento vibracional, Einstein chegou à seguinte relação:

$$C_{v,m}(T) = 3R f_E(T)^2 \quad (43)$$

Admitamos que  $C_{v,m}(T)$  é a Capacidade calorífica molar a volume constante em função da temperatura e  $f_E(T)$  é o que chamamos de função de Einstein elevada ao quadrado. Podemos inferir que quando a temperatura tende a zero, a Capacidade calorífica tende também a zero, pois a função de Einstein tende a zero. Quando a temperatura tende a infinito, a função de Einstein tende a 1 e a Capacidade calorífica tende a  $3R$ .

A função de Einstein é estabelecida da seguinte forma:

$$f_E(T) = \left(\frac{\theta_E}{T}\right) \left(\frac{e^{\frac{\theta_E}{2T}}}{e^{\frac{\theta_E}{T}} - 1}\right) \quad (44)$$

Onde  $\theta_E$  é a temperatura de Einstein e vale  $\theta_E = \frac{h\nu}{k}$  com k sendo a constante de Boltzmann. E terá o Kelvin como unidade, pois:

$$\theta_E = \frac{J \cdot s \cdot s^{-1}}{JK^{-1}} = K \quad (45)$$

Quando  $T \rightarrow 0$ ,  $\theta_E \gg T$  e portanto:

$$\frac{\frac{\theta_E}{e^{2T}}}{\frac{\theta_E}{e^T - 1}} \approx \frac{\frac{\theta_E}{e^{2T}}}{\frac{\theta_E}{e^T}} = e^{\frac{\theta_E}{2T}} \cdot e^{-\frac{\theta_E}{T}} = e^{(\theta_E/2T) - (\theta_E/T)} = e^{-\frac{\theta_E}{2T}}$$

Então:  $f_E(T) = \frac{\theta_E}{T} e^{-\frac{\theta_E}{T}}$  (46)

Quando  $T \rightarrow 0$   $\rightarrow e^{-\infty} = 0 \rightarrow f_E(T) = 0 \rightarrow C_{v,m}(T) = 0$  (47)

Porém quando  $T \rightarrow \infty$ : Nesse caso,  $T \gg \theta_E$  e aplicando a expansão de Taylor:

$$\frac{\frac{\theta_E}{e^{2T}}}{\frac{\theta_E}{e^T - 1}} = \frac{1 + \left(\frac{\theta_E}{2T}\right) + \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{\theta_E}{2T}\right)^2 \dots}{\left(1 + \left(\frac{\theta_E}{2T}\right) + \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{\theta_E}{2T}\right)^2 \dots\right) - 1} \quad (48)$$

Desprezando-se os termos quadráticos e superiores:

$$\frac{\frac{\theta_E}{e^{2T}}}{\frac{\theta_E}{e^T - 1}} = \frac{1 + \left(\frac{\theta_E}{2T}\right)}{1 + \frac{\theta_E}{T} - 1} = \frac{1 + \left(\frac{\theta_E}{2T}\right)}{\frac{\theta_E}{T}} \quad (49)$$

$$\text{Então: } f_E(T) = \left( \frac{\theta_E}{T} \right)^{1 + \left( \frac{\theta_E}{2T} \right)} = 1 + \frac{\theta_E}{2T} \approx 1 \quad (50)$$

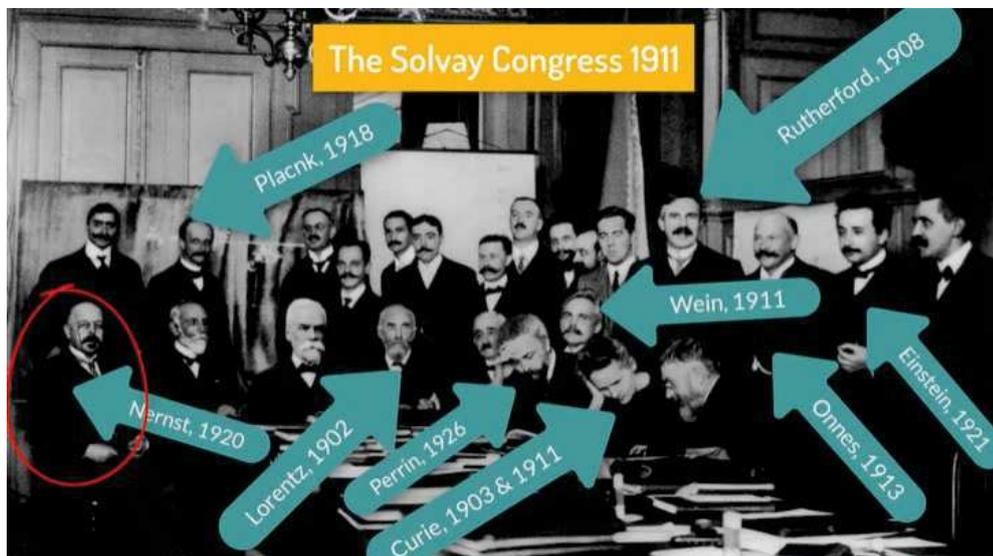
Assim, quando a temperatura tende a zero, a Capacidade Calorífera tende a zero conforme a teoria quântica. Quando a temperatura tende a infinito, a Capacidade Calorífera tende a  $3R$ , de acordo com as teorias quântica e clássica de Dulong-Petit (LEI DE DULONG [...], 2020).

Este resultado levou o renomado Walter Nernst (1864-1941) a ser um dos primeiros a aceitar a quantização de energia, já que o comportamento do calor específico a baixas temperaturas era consequência de sua formulação da 3ª Lei da Termodinâmica, segundo a qual a entropia tende a zero à medida que se aproxima do zero absoluto. Um ano depois, porém, medições mais precisas do grupo de Nernst mostraram desvios da lei de Einstein, que seriam corrigidas por Peter Debye (1884-1966) em 1912.

### 3.3.3 WALTHER NERNST TORNA EINSTEIN FAMOSO

Apesar do miraculoso ano de 1905 quando publicou importantes artigos científicos, onde um deles corroborou a quantização de Planck de 1900, marco instituidor da Mecânica Quântica, Albert Einstein em 1911 ainda era um desconhecido funcionário de patentes. Porém, de acordo com Joseph (2029), em outubro de 1911, Einstein com 31 anos, foi convidado para uma conferência de elite, para discutir a teoria dos quanta. Na época, quatro dos 23 cientistas presentes já haviam ganhado um ou dois Prêmios Nobel e outros cinco acabariam também ganhando um prêmio, incluindo o próprio Einstein. Mas como surgira um convite de tamanha envergadura para uma pessoa sem carreira acadêmica? Embora suas idéias sobre a relatividade estivessem lentamente ganhando força, suas teorias radicais de quantização da luz foram totalmente ignoradas, então, por que uma conferência sobre Mecânica Quântica?

Figura 8 - A Conferência de Solvay de 1911



Fonte: How the 3rd Law of Thermodynamics made Einstein famous - <https://youtu.be/ueqVVa4iA24>

O mentor desta Conferência e, conseqüentemente do reconhecimento de Einstein junto à comunidade acadêmica foi Walther Nernst (1864-1941), professor da Universidade de Berlim. Conforme relatos do ex aluno de pós graduação Robert Milikan (1868-1953) Nobel de Física em 1923, Nernst “era muito popular no laboratório, mas sempre tinha uma briga com alguém”. Conforme Joseph (2019), apesar de não promover um bom exemplo de organização em seu laboratório, escritório ou sala de aula, nem de ser um pacificador, sua competência e fama o precedia e estava sempre livre para estudar o que quisesse. Muito bem sucedido financeiramente, possuía patentes de lâmpadas elétricas e fertilizantes à base de nitrogênio, uma preocupação comum dos químicos da época desde 1898 quando William Crookes (1832-1919) previu que os métodos agrícolas da época estavam esgotando o solo de nitrogênio e com o crescimento populacional, poderia haver fome no mundo.

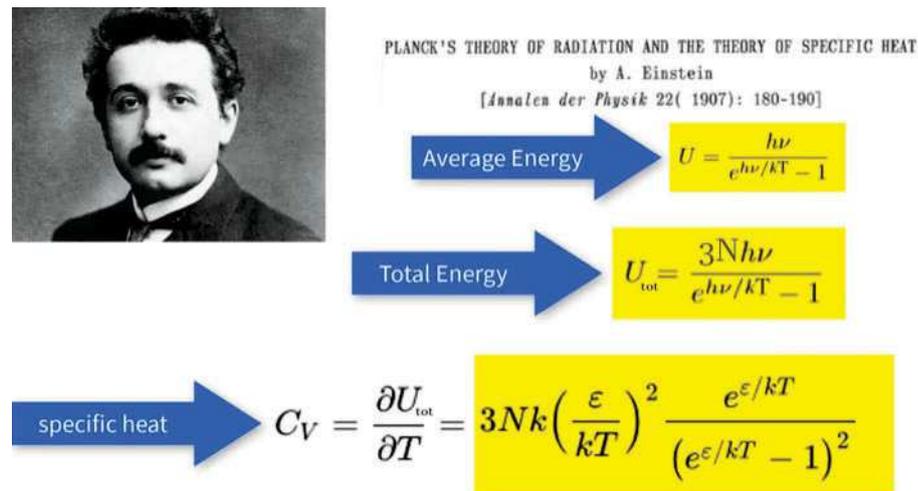
Nernst estava interessado em entender o comportamento anômalo do calor específico dos sólidos então, no início de 1910, tomou conhecimento de um inusitado artigo de 1907 de um funcionário de patentes, Albert Einstein, que provou teoricamente que o calor específico chega a zero, mas apenas se abdicarmos da teoria clássica e coadunarmos com a mecânica quântica, instituída em dezembro de 1900 por um amigo pessoal de Nernst chamado Max Planck.

Segundo Joseph (2019) o próprio Planck não tinha convicção da discretização da energia, pois o objetivo era obter uma equação de radiação que funcionasse. Porém Einstein teve olhos de ver, e em 1905 assumiu que a luz era composta de “um número finito de quanta de energia que estão localizados em pontos do espaço, movem-se sem se dividir e podem ser absorvidos ou gerados apenas como um todo”. Planck acreditava que a luz era uma onda descrita pelas equações de Maxwell refutando a visão da descontinuidade de Einstein, mas se entusiasmava com seu terceiro artigo do *annus mirabilis* que instituiu a teoria da relatividade. Dois anos depois, em 1907 Einstein escreveu um artigo no qual decidiu usar a quantização de Planck para entender como os sólidos emitem ou absorvem o calor, impactando Nernst.

Nernst mediu exaustivamente o calor específico de vários materiais verificando calores específicos muito baixos em baixas temperaturas. Na verdade, todos eles parecem ir a zero à medida que se aproximam de zero grau. O calor específico é a energia térmica necessária por massa, para aumentar a temperatura de um objeto por grau. Se o calor específico for zero, o objeto não precisa de calor para que a temperatura aumente, significando que o objeto não ficará no zero absoluto. Em outras palavras, o zero absoluto é inatingível. Nernst estava cada vez mais convencido de que estava à beira de uma idéia profunda, mas frustrava-se com o fato de não ter base teórica para suas teorias.

Einstein com muita simplicidade usou a equação de Planck para a energia média das moléculas vibrantes em função da temperatura, multiplicando por três (dimensões) para encontrar a energia total. Finalmente ele tomou a derivada dessa energia em função da temperatura. Como derivada é a mudança instantânea, ele obteve uma equação para o calor específico. Em 1912 Peter Debye (1884-1966), Nobel de química em 1936, aprimora esta teoria do calor específico para baixas temperaturas.

Figura 9 - O calor específico para Einstein



. Fonte: How the 3rd Law of Thermodynamics made Einstein famous-<https://youtu.be/ueqVVa4iA24>

Conforme relata Joseph (2019) o artigo de Einstein de 1907, assim como o artigo pioneiro de 1905 foram ignorados pela comunidade científica, sendo infrutíferas as tentativas de Einstein em divulgar o quantum. Em maio de 1909, ele escreveu a um amigo: “Esta questão quântica é tão extraordinariamente importante e difícil que todos deveriam se dar ao trabalho de trabalhar nela”. Três meses depois, Max Planck convidou Einstein para dar sua primeira palestra importante. Planck provavelmente esperava que Einstein falasse sobre relatividade, mas em vez disso, falou sobre a mecânica quântica. “Uma teoria da luz que pode ser entendida como uma espécie de fusão das teorias de ondas e partícula”. Enquanto isso, Einstein ainda trabalhava como balconista de patentes, e no início de 1910 Nernst leu o artigo de Einstein de 1907 e ficou empolgado, pois, encontrara finalmente um suporte teórico não importando o quão radical fosse.

Nernst escreveu a um amigo: “A hipótese quântica de Einstein está provavelmente entre as construções de pensamento mais notáveis de todos os tempos, se estiver correta, indica caminhos completamente novos para todas as teorias moleculares.” O famoso e poderoso Nernst decidiu então visitar o “Boltzmann renascido” pessoalmente, tumultuando Zurique. Einstein consagrado pela teoria dos quanta escreve para um amigo: “Minhas previsões sobre o calor específico, aparentemente foram brilhantemente confirmadas e até Nernst esteve aqui paraver”.

Ainda em 1910, Nernst idealizou uma grande reunião científica para discutir questões quânticas, divulgar sua teoria da terceira lei da termodinâmica e promover Einstein. Após ser desencorajado por Planck, o impaciente Nernst recorre a um rico fabricante de refrigerantes e filantropo científico chamado Ernest Solvay (1838-1922). Nernst organizou o primeiro encontro internacional de física em 1911 na cidade de Bruxelas e resolveu enviar 19 convites para os principais cientistas do mundo e um convite adicional e secreto para Einstein, que promoveu a teoria quântica, desestimada há onze anos.

Na Conferência de Solvay de 1911, até os mais conservadores se empolgaram com a palestra do desconhecido Einstein e, Marcel Brilloouin (1854-1948) ressaltou “que a partir de agora teremos que introduzir em nossas idéias físicas e químicas uma descontinuidade, algo para mudanças nos saltos do qual não tínhamos noção há alguns anos atrás.

Após a Conferência, os participantes se imbuíram em divulgá-la como um dos secretários Maurice de Broglie disse a seu irmão mais novo Louis, que relata “Comecei a pensar em quanta desde o momento que meu irmão me deu as notas do Congresso de Solvay de 1911”. Ernest Rutherford, de volta à Inglaterra, discutiu a reunião com seu aluno de pós-graduação, um bom dinamarquês chamado Niels Bohr.

Bohr ganhou o Nobel de Física em 1922 pelo seu modelo atômico e Louis de Broglie em 1923 pela descrição da natureza ondulatória das partículas.

### **3.4 ESPECTROS DE EMISSÃO E ABSORÇÃO DO HIDROGÊNIO: A FALHA DA ÓPTICA CLÁSSICA E A DETECÇÃO DE IMPRESSÕES DIGITAIS QUÂNTICAS**

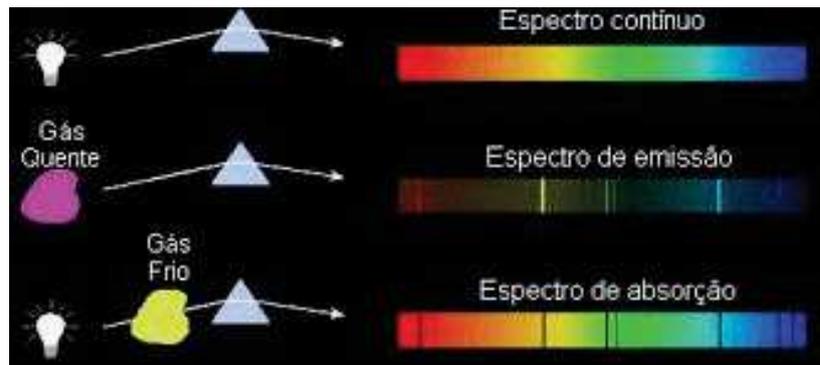
### 3.4.1 ESPECTROS DE EMISSÃO E ABSORÇÃO

O espectro é um conjunto de comprimentos de onda ou frequências emitidos ou absorvidos por uma fonte. O espectro de emissão é obtido quando incidimos luz em um prisma, surgindo linhas coloridas obtidas pela dispersão da luz emitida pela amostra. Cada linha corresponde a um determinado comprimento de onda. O espectro de absorção equivale às linhas escuras obtidas ao transmitir luz branca através da amostra. As linhas escuras estão sempre nas mesmas posições das linhas claras emitidas pela mesma amostra. Assim, o espectro de absorção coincide com o espectro de emissão.

A Espectroscopia é uma ferramenta imprescindível para a análise química de amostras diversas em laboratório e a composição química de estrelas distantes pode ser obtida analisando seus espectros de emissão. Importantes atores alemães protagonizaram o desenvolvimento da espectroscopia. Em 1814 Joseph von Fraunhofer (1787-1826), que fabricava instrumentos de vidro (lentes, prismas, microscópios e telescópios), inventou um aparelho que seria chamado de espectroscópio, e percebeu a existência de várias linhas escuras (*espectro de Fraunhofer*) no espectro solar, que esperava ser contínuo. Tais linhas escuras foram explicadas por Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) e Robert Wilhelm Eberhard von Bunsen (1811-1899) em 1859.

Kirchhoff enunciou as chamadas três leis da espectroscopia: 1ª) Um corpo opaco aquecido, independente de seu estado físico, emite um espectro contínuo. 2ª) Um gás rarefeito transparente, produz um espectro de emissão com surgimento de linhas brilhantes. O número e a posição dessas linhas dependem dos elementos químicos presentes no gás. 3ª) Se um espectro contínuo passar por um gás à temperatura mais baixa, o gás frio causa a presença de linhas escuras, ou seja, será formado um espectro de absorção. O número e a posição dessas linhas dependem dos elementos químicos presentes no gás.

Figura 10 - Espectro de absorção e emissão



Fonte: <https://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/Aula17-132.pdf>

Ressaltemos que a Alemanha experimentou sua revolução industrial a partir da metade do século XIX, o que fomentou um notável desenvolvimento na termodinâmica e uma grande produtividade de sua comunidade científica. Isto desencadeará no futuro, o surgimento da mecânica quântica. Conforme relata Saraiva (2014), Fraunhofer possuía uma expertise na construção de instrumentos ópticos.

### 3.4.2 AS LINHAS DE BALMER

Johann Jacob Balmer (1825-1898) foi um matemático suíço que em 1885 descobriu empiricamente, uma fórmula que instigou o desenvolvimento da teoria atômica e da evolução da espectroscopia. Balmer foi professor de matemática no Ensino Médio durante 39 anos. Também lecionou geometria entre 1865 e 1890, na Universidade de Basel.

Em 1885 ele publicou um artigo que descreve “notas sobre as linhas espectrais do hidrogênio” (*Notiz über die Spectrallinien des Wasserstoffes, Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft*). Foi o primeiro a desenvolver uma fórmula empírica que permitia prever o comprimento de onda de luz do espectro de emissão do hidrogênio. Mais tarde explicada por Bohr como sendo emitida em qualquer transição eletrônica num átomo de hidrogênio de um estado excitado para o nível  $n = 2$ . As linhas espectrais constituem a chamada série de Balmer, a primeira das séries espectrais a serem observadas experimentalmente. A fórmula de Balmer serviu como modelo para as fórmulas de outras séries espectrais, sendo fundamental na espectroscopia atômica.

Ao observar o espectro de emissão do Hidrogênio, Balmer utilizou os valores dos comprimentos de ondas observados nas linhas e formulou uma relação matemática:

$$\lambda = B \left( \frac{n^2}{n^2 - m^2} \right) \quad (51)$$

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda, B é a constante de Balmer, originalmente chamada de número fundamental do Hidrogênio e representada por H e vale  $3,6450682 \times 10^{-7} \text{nm}$ ;  $m = 2$  e  $n$  é um número inteiro tal que  $n > m$ . Adotando  $m = 2$  e valores de  $n$  a partir de 3, obtemos o valores dos comprimentos de onda visíveis no espectro de emissão do Hidrogênio.

$$n = 3 \rightarrow \lambda = 656 \text{ nm}$$

$$n = 4 \rightarrow \lambda = 486 \text{ nm}$$

$$n = 5 \rightarrow \lambda = 434 \text{ nm}$$

$$n = 6 \rightarrow \lambda = 410 \text{ nm}$$

$$n = 7 \rightarrow \lambda = 397 \text{ nm} \Rightarrow \text{não visível para Balmer}$$

Figura 11 - Espectro de absorção e emissão para o Hidrogênio



Fonte: <http://www.if.ufrgs.br/cref/camiladebom/Aulas/Pages/3.html>

Três anos mais tarde, o físico sueco Johannes Rydberg (1854-1919) generalizou a fórmula de Balmer de modo a poder prever-se o comprimento de onda da radiação emitida em qualquer transição eletrônica entre dois níveis no átomo de

hidrogênio. Vale ressaltar que em 1888 não se conhecia o elétron e nem o núcleo atômico, o que nos faz afirmar que tais equações eram produto de abstrações puramente matemáticas.

$$\boxed{\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)} \quad (52)$$

$$\lambda = \text{comprimento de onda}, \quad R_H = \frac{4}{B} = \text{cte de Rydberg} = 1,0973 \times 10^{-1} \text{ mm}^{-1}$$

e  $n_1$  e  $n_2$  são inteiros com  $n_1 < n_2$ .

Com  $n_1 = 2$ :

$$\boxed{\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)} \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R_H}{4} - \frac{R_H}{n^2}$$

$$\frac{1}{\lambda} = -R_H \frac{1}{n^2} + \frac{R_H}{4}, \text{ que é a equação de uma reta } (y = ax + b)$$

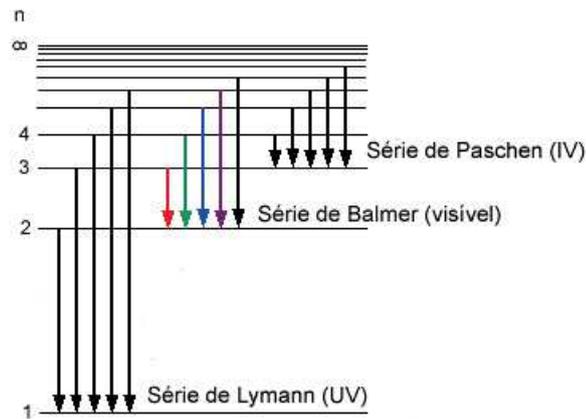
$OR_H$  vale  $0,0110 \text{ nm}^{-1}$  e pode ser obtido pela inclinação da reta.

$$\boxed{y = -0,011x + 0,0027} \quad (53)$$

De acordo com Ribeiro (2014), por ser matemático, Balmer encontrou sua relação matemática a partir de dados observacionais sem se ater aos aspectos conceituais da então física clássica. Sua equação descrevia adequadamente os espectros de emissão e de absorção do hidrogênio na região visível e foi aprimorada por dois alemães, em 1906 por Theodore Lyman (1874-1954) para a região do ultravioleta e em 1908 por Friedrich Paschen (1865-1947) para a região do infravermelho. No entanto, a equação de Balmer se mostra como mais um problema resolvido pela quantização da energia. Assim, somente vinte e oito anos depois, em 1913, Niels Bohr (1885-1962) descobriu que o enunciado da equação de 1885 se

encaixava com sua teoria dos estados discretos de energia do átomo de hidrogênio (ESPECTROS [...], 2011).

Gráfico 9 - Espectros do átomo de Hidrogênio



Fonte: <https://www.fq.pt/atomo/espectro-do-atomo-de-hidrogenio>

### 3.4.3 A ESPECTROSCOPIA E OS MODELOS ATÔMICOS DE THOMSON, NAGAOKA, JESSUP E NICHOLSON

Conforme relatam Filho e Matsumoto (2009), no início do século XX era interesse de vários pesquisadores, estabelecerem um modelo que explicasse a estrutura da matéria, apesar da aceitação da existência do átomo não ser um consenso. Muitos aceitavam a hipótese atômica, mas alguns proeminentes nomes como o químico Wilhelm Ostwald (1853-1932), futuro laureado com o Nobel de química de 1909 e o físico Ernest Mach (1838-1916) não admitiam uma estrutura corpuscular elementar para a matéria. O próprio Max Planck relutou antes de aceitar o átomo.

O ano de 1903 foi icônico para o físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940) e o físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950). Enquanto o primeiro palestrava na Universidade de Yale, nos Estados Unidos, o segundo palestrava na Sociedade de Física e Matemática em Tóquio e, de acordo com Filho e Matsumoto (2009), ambos apresentavam um modelo atômico.

Thomson já conhecia a existência do elétron desde 1897 e receberia em 1906 o Nobel de Física por isto. Conhecia também a partícula positiva idealizada em 1886 por Eugen Goldstein (1850-1930) que mais tarde seria chamado de próton por Ernest Rutherford (1871-1937), ganhador do Nobel de Química de 1908 por suas investigações sobre a desintegração dos elementos e a química das substâncias radioativas. Então, J.J. Thomson intuiu uma carga total nula e concebeu um modelo atômico que consistia em um volume esférico carregado com carga elétrica positiva, com elétrons estaticamente inseridos nesta massa esférica. Este modelo atômico recebeu a alcunha de pudim de passas.

Segundo Hentschel (2009), o primeiro modelo atômico planetário foi idealizado por Nagaoka, que se graduou em física pela Universidade de Tóquio em 1887 e depois de seu pós-doutorado na Alemanha e Áustria assumiu o cargo de professor em Tóquio se tornando mais tarde no mais importante físico moderno do Japão. Seu modelo, descrito por Filho e Matsumoto (2009), consistia de um átomo formado por um “caroço” central rodeado por anéis constituídos por partículas que giravam com velocidade angular única, como o planeta Saturno. Nagaoka, segundo Planas (2021) se amparava no fato de que cargas elétricas opostas são impenetráveis e propôs um modelo atômico baseado em uma esfera grande e massiva com uma carga elétrica positiva cercada por vários elétrons orbitando ao seu redor. Filho e Matsumoto (2009) afirmam que Nagaoka já sabia das limitações do seu modelo para justificar a estabilidade do átomo, o que ocorreria posteriormente também com o modelo atômico de Ernest Rutherford, que será sanado através da teoria quântica.

No ano de 1904, Thomson e Nagaoka publicaram seus modelos atômicos no mesmo volume da *Philosophical Magazine*, uma revista científica publicada até hoje que surgiu em Londres em 1798, quando filosofia natural era um termo que abrangia todas as ciências da natureza. Os dois pesquisadores tentaram, sem sucesso, explicar a existência das linhas espectrais, o que ocorrerá somente com o modelo do átomo de Bohr (1885-1962). De acordo com Filho e Matsumoto (2009), Nagaoka abandona seu modelo atômico em 1908 e segundo Ressurreição (2020), o modelo de Thomson desidrata um pouco antes da publicação em 1911, dos resultados encontrados com o espalhamento de partículas alfa, realizado em 1909 por Hans Geiger (1882-1945) e Ernest Marsden (1889-1970) com supervisão de Rutherford.

Compreenderemos melhor o trabalho de Nicholson após breve relato sobre a importância da espectroscopia para a compreensão da estrutura da matéria. Conforme relatam Lopes e Martins (2007), desde as pesquisas desencadeadas por Gustav R. Kirchhoff (1824-1887) e Robert W. Bunsen (1811-1899) vários trabalhos que procuravam caracterizar elementos por meios espectroscópicos foram desenvolvidos por físicos, químicos e astrônomos. De acordo com Gonzalez (2013), após Bunsen inventar um bico de gás de chama limpa, foi possível obter um padrão de linhas espectrais de diferentes vapores químicos e em 1859, utilizando um espectroscópio desenvolvido por ele mesmo, Kirchhoff mostrou que todas as substâncias puras têm espectros característicos. A partir daí, descreve Lopes e Martins (2007), várias descobertas passam a acontecer, como o Césio em 1860 por Kirchhoff e Bunsen, o Rubídio por Bunsen em 1861, o Tálcio por William Crookes (1832-1919) em 1861 e o Índio por Ferdinand Reich (1799-1882) e Theodor Richter (1824-1898) em 1863. Surgiram também, os primeiros passos para novos campos de conhecimento que se construíram nas fronteiras da física, química e astronomia (astrofísica, astroquímica, cosmoquímica), como a “química solar de John Tyndall (1820-1893) em 1861 e a nova linha amarela no espectro do sol descoberta em 1868, que Norman Lockyer (1836-1920) chamou de Hélio. A espectroscopia aproximou a química, a física e a astronomia desencadeando progressos nos processos de investigação em todos os campos.

Em 1908, os pesquisadores britânicos A. C. Jessup e A. E. Jessup publicaram o artigo, que não é citado na história da teoria atômica: “A evolução e involução dos elementos” na *Philosophical Magazine*, que apresentava unidades elementares corpusculares (elétrons segundo Thomson) e partículas positivas (futuros prótons) que formariam os átomos.

Em 1911, o matemático e físico inglês John William Nicholson (1881-1955) inicia, conforme relatam Lopes e Martins (2007), uma série de publicações sobre espectroscopia ligadas à astronomia e sobre a constituição da matéria e propõe um modelo atômico baseado na teoria clássica, que evolui para um modelo quântico.

Embora Nicholson seja uma figura muito pouca conhecida na história da química e da teoria atômica, suas pesquisas foram imprescindíveis para o desenvolvimento dos modelos atômicos no início do século XX. Nicholson teria sido o primeiro a criar um modelo atômico com elétrons com momentos angulares quantizados. Criou também uma teoria quântica para explicar as linhas espectrais

solares e de nebulosas Ele foi um grande matemático e pesquisava no campo da física e astroquímica. Obteve o doutorado em matemática em Cambridge, e também foi contemporâneo de Bohr no laboratório Cavendish. Em 1912 assumiu como professor de Matemática em King's College London. Nicholson foi citado no famoso artigo de Niels Bohr de 1913, que institui seu modelo atômico.

Lopes e Martins (2007) descrevem que o primeiro trabalho sobre estrutura atômica, publicado por Nicholson em 1911 na *Astronomical Society*, intui um átomo planetário formado por um núcleo positivo que podem...

[...] existir em distribuições esféricas de pequeno volume e densidade uniforme, cujo raio é pequeno na comparação com o raio de um elétron, uma reversão do ponto de vista mais geralmente aceito. A massa destas unidades positivas é muito grande em comparação com a de um elétron, sendo responsável pela quase totalidade da massa de um átomo. O átomo é chamado "simples" quando contém somente uma unidade positiva e um único anel de elétrons que giram em volta dele. (LOPES e MARTINS, 2007, p. 4).

O modelo atômico de Nicholson não fora influenciado pelo experimento idealizado por Rutherford, das finas lâminas de ouro bombardeadas por partículas alfa. Na visão de Lopes e Martins (2007), Nicholson aglutina a esfera positiva nuclear de Thomson (1904) e o modelo saturniano de Nagaoka (1904) com anéis de elétrons girando em torno do núcleo positivo com velocidade angular comum. Ele também acreditava que cada distribuição eletrônica corresponde a uma emissão específica no espectro de raios dos átomos.

Em artigo publicado em 1912, Nicholson cita pela primeira vez a teoria de Planck, considerando que os elétrons se assemelham aos osciladores de Planck, intuindo que o momento angular poderia assumir apenas determinados valores.

Assim, se a constante  $h$ , de Planck tem, como Sommerfeld tinha sugerido, um significado atômico, ele pode significar que o momento angular de um átomo pode somente aumentar e diminuir em valores discretos quando elétrons saem ou retornam. (LOPES e MARTINS, 2007, p. 4)

### 3.4.4 O ÁTOMO DE RUTHERFORD

O experimento de 1909 realizado na Universidade de Manchester por Hans Geiger (1882-1945) e Ernest Marsden (1889-1970), capitaneado por Ernest Rutherford (1871-1937) tinha como objeto, estudar a estrutura do átomo. Com este experimento, o experimento da folha de ouro, Rutherford se contrapôs ao modelo de Thomsom, inferindo a existência de um pequeno núcleo, que rechaçava partículas alfa disparadas nos átomos de ouro.

Esta representação clássica planetária baseada nos experimentos de Rutherford coloca o átomo como um sistema simples, com elétrons orbitando ao redor do núcleo como planetas ao redor do sol. Este modelo pictórico, além de equacionado de maneira idêntica, era filosoficamente atraente, pois igualava o macro e o micro, tornando-se extremamente aceitável na comunidade científica. No entanto, de acordo com a mesma teoria clássica, esse átomo não poderia existir.

Os elétrons do átomo de Rutherford parecem estar em condições muito mais favoráveis do que, por exemplo, os satélites artificiais da Terra, pois parecem totalmente livres de quaisquer forças dissipativas por não haver mais nada no espaço ao redor do núcleo. Já os satélites, que em face de pequena resistência do ar, eventualmente caem por perda de energia. Ou seja, os elétrons deveriam ser "planetas" ideais, sem perdas de energia no caminho.

Porém, esta tese despreza o fato fundamental de que cada elétron carrega uma carga elétrica e, conseqüentemente, seu próprio campo eletromagnético. Assim, este elétron executando um movimento circular, possui aceleração centrípeta e de acordo com a teoria eletromagnética clássica, emite radiação e perde energia. Conforme relata Fayngold (2013), temos como resultado após cerca de  $10^{-8}$  segundos, a colisão do elétron com o núcleo, deixando de existir o átomo de Rutherford.

De um lado, temos os experimentos de Rutherford que mostram um modelo atômico possível e estável. De outro, temos uma teoria que além de não explicar os espectros de emissão e absorção, afirma que as orbitas de Rutherford tendem a colapsar. Teria a teoria clássica falida ou ela é somente limitada?

### 3.4.5 O ÁTOMO DE BOHR E A EXPLICAÇÃO PARA AS LINHAS

Bohr propõe uma maneira de justificar a estabilidade do átomo de Hidrogênio, incompatível com o eletromagnetismo clássico, além de explicar seu espectro observado. Ele impõe de maneira oficialmente original e sem nenhuma justificativa, que o raio de órbita do elétron não pode ser um raio qualquer. Ele não pode ser uma variável contínua e sim, uma variável discreta, quando somente alguns valores de raios podem existir e ainda impõe uma quantização do momento angular do elétron em sua trajetória circular, com valores múltiplos de um valor fundamental:

$$\boxed{L = n\hbar}, \quad (54)$$

Onde  $L$  é o momento angular e  $\hbar$  é a constante de Planck reduzida ( $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ).

Bohr continuava admitindo para o átomo, um núcleo central muito massivo com órbitas circulares dos elétrons conforme previa Rutherford. A força de atração elétrica entre núcleo e elétrons tinha uma função centrípeta:

$$F_{el} = F_{cp} \quad (55)$$

$$\frac{ke^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (56)$$

Como momento angular pode ser descrito por:  $L = mvr = n\hbar$ , temos:

$$v = \frac{n\hbar}{mr} \quad e \quad v^2 = \frac{n^2\hbar^2}{m^2r^2}, \quad \text{então:}$$

$$\frac{ke^2}{r^2} = \frac{m n^2 \hbar^2}{r m^2 r^2}$$

$$r = n^2 \frac{\hbar^2}{nke^2} \quad (57)$$

$\frac{\hbar^2}{mke^2} = a_B$ , chamado de raio de Bohr

$$\boxed{r = n^2 a_B} \quad a_B = 0,529 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (58)$$

Percebe-se acima uma expressão para os raios de órbita possíveis. Quando  $n = 1$ , temos que o raio de órbita do elétron é o próprio raio de Bohr, associado à órbita de menor energia e a mais estável. Analisando a Energia, temos:

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \quad (59)$$

O sinal negativo significa que o referencial está no infinito, significando que quando a energia vale zero, o elétron e o núcleo estão infinitamente distantes. E ainda:

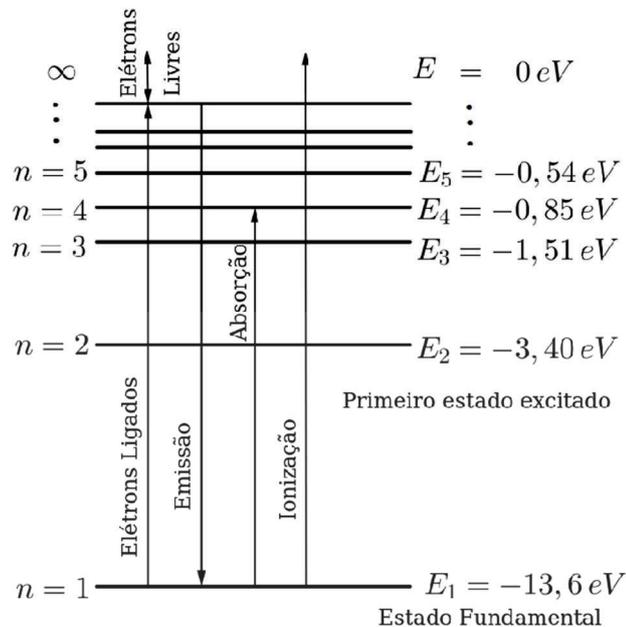
$$\boxed{E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{ke^2}{2a_B}} \quad (60)$$

O termo  $\frac{ke^2}{2a_B}$  pode ser chamado de Energia de Rydberg ( $E_R$ ), então:

$$\boxed{E_n = -\frac{1}{n^2} E_R} \quad (61)$$

Podemos perceber que a quantização do momento angular imposta por Bohr, resultou na quantização dos raios das órbitas dos elétrons e na quantização dos níveis de Energia (ÁTOMO [...], 2014).

Gráfico 10 - Diagrama dos níveis de Energia do átomo de Hidrogênio



Fonte: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQH8VI0yTP4GsDQstkNA\\_2rSI5WCnpLPlllu66ILL45XJC2-BaX7IPC1zHC3OgCQWIPg\\_L4&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQH8VI0yTP4GsDQstkNA_2rSI5WCnpLPlllu66ILL45XJC2-BaX7IPC1zHC3OgCQWIPg_L4&usqp=CAU)

Podemos entender que haverá absorção de energia quando o elétron passar de um nível de energia mais estável para outro nível superior, e isto só será possível se este ganho de energia, ou seja, se este fóton possuir energia igual à diferença energética entre estes dois níveis. Assim só acontecerá uma transição (salto quântico) de um elétron entre dois níveis quaisquer, se este receber um fóton com energia equivalente a respectiva diferença energética. Este novo estado excitado onde agora se encontra o elétron é instável, e o mesmo tende a voltar para seu nível mais estável emitindo um fóton com mesma energia.

$$\text{Assim chegamos à relação: } \boxed{E_\gamma = E_n - E_{n'}}, \quad (62)$$

o que equivale dizer que na absorção  $n'$  é o nível de partida e  $n$ , o nível de chegada.

$$E_Y = -\frac{1}{n^2}E_R + \frac{1}{n'^2}E_R \quad (63)$$

$$E_Y = E_R \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (64)$$

$$\boxed{\frac{1}{\lambda} = \frac{E_R}{hc} \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)} \quad (65)$$

A equação acima desenvolvida por Bohr a partir das quantizações acima citadas é equivalente a equação de Balmer-Rydberg, puramente matemática advinda de observações, sem nenhum argumento físico.

Para a constante de Rydberg, Bohr finaliza:

$$R = \frac{E_R}{hc} \quad (66)$$

$$R = \frac{ke^2}{2a_B} \frac{1}{hc} \quad (67)$$

$$R = \frac{ke^2 m ke^2}{2\hbar^2} \frac{1}{hc} \quad (68)$$

$$R = \frac{2\pi^2 (ke^2)^2 m}{h^3 c} \quad (69)$$

$$\boxed{R = 0,0110 \text{ nm}^{-1}} \quad (70)$$

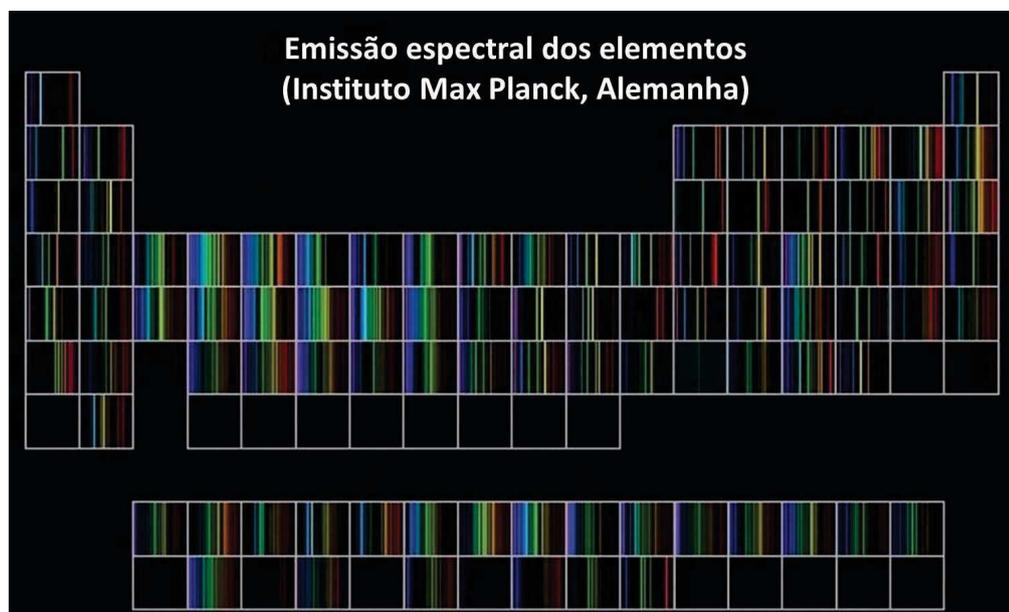
O valor da constante de Rydberg encontrado por Bohr usando conhecidas constantes fundamentais da natureza é o mesmo encontrado por Balmer-Rydberg, vinte e cinco anos atrás. Assim mais um problema que a teoria clássica não podia explicar, fora solucionado pela teoria quântica. Agora, o mistério das linhas espectrais de absorção e emissão tem uma explicação, pois o valor do comprimento de onda do fóton emitido ou absorvido pode ser estabelecido:

$$|\Delta E| = hf \quad (71)$$

$$|\Delta E| = \frac{hc}{\lambda} \quad (72)$$

$$\lambda = \frac{hc}{|\Delta E|} \quad (73)$$

Figura 12 - Tabela Periódica com linhas espectrais de emissão dos elementos



Fonte: <https://www.facebook.com/QualitativaInorgUfrj/posts/3534108353284878/>

### 3.5 RADIOATIVIDADE: A DETERIORAÇÃO DO DETERMINISMO E A DESCOBERTA DA FÍSICA NUCLEAR

A radioatividade é um fenômeno natural que revolucionou a ciência e a tecnologia desde sua descoberta, no início do século XX. Este fenômeno, que envolve a emissão de partículas subatômicas e radiação por átomos instáveis, tem uma história fascinante que se desenrolou ao longo dos anos. Neste texto, examinaremos os aspectos históricos da radioatividade, desde suas descobertas iniciais até os desenvolvimentos posteriores que moldaram nossa compreensão atual desse fenômeno que desencadeou avanços não apenas no campo da física nuclear, mas também motivaram profundos impactos na medicina e na indústria.

#### 3.5.1 OS RAIOS CATÓDICOS

A radioatividade é um fenômeno natural que revolucionou a ciência e a tecnologia desde sua descoberta, no início do século XX. Este fenômeno, que envolve a emissão de partículas subatômicas e radiação por átomos instáveis, tem uma história fascinante que se desenrolou ao longo dos anos. Neste texto, examinaremos os aspectos históricos da radioatividade, desde suas descobertas iniciais até os desenvolvimentos posteriores que moldaram nossa compreensão atual desse fenômeno que desencadeou avanços não apenas no campo da física nuclear, mas também motivaram profundos impactos na medicina e na indústria.

Conforme relata Piedade (2023), em 1838 Michael Faraday (1791-1867) se interessou pelos experimentos de descargas elétricas em tubos de vácuo, realizadas por Heinrich Geissler (1814-1879). Faraday desenvolve uma ampola de vidro em forma de ovo dotada de dois eletrodos (*Faraday Electric Egg*) e estudou a relação entre a condução elétrica em um gás rarefeito e a pressão no interior da ampola, observando também pequenas descargas elétricas em seu interior. Vinte anos depois, utilizando um aparato mais adaptado, Julius Plucker (1801-1868), um colega de Geissler, juntamente com seu aluno Jonatham Hittorf (1817-1894), utilizando tensões mais elevadas produziram feixes de partículas que interagiam com campos magnéticos.

Em 1876, Eugen Goldstein (1850-1930) batiza os estranhos raios por Raios Catódicos.

Os raios catódicos tiveram um longo caminho para seu entendimento, desencadeando várias descobertas, como a do elétron. A ampola de Crookes, amplamente utilizada neste período, que é feita de vidro e tem o vácuo no seu interior, contém duas placas metálicas que são ligadas a uma fonte de tensão elétrica. Cátodo é como chamamos a placa que é ligada ao polo negativo, e anodo é a unificada ao polo positivo. A tensão que se forma entre o cátodo e o anodo, quando fica elevada, gera o feixe luminoso que sai do cátodo atravessando o tubo inteiro.

Sir William Crookes (1832-1919) foi um físico e químico britânico descobridor do elemento químico Tálcio, e ainda identificou a primeira amostra conhecida de Hélio em 1895. Foi o inventor do radiômetro de Crookes e desenvolveu os tubos de mesmo nome, investigando os raios catódicos. Em suas pesquisas sobre a condutividade elétrica em gases sob baixa pressão, descobriu que, à medida que se diminuía a pressão e aumentava a tensão elétrica, o eletrodo negativo emitia raios catódicos, que hoje se sabe tratar-se de um feixe de elétrons livres. Foi um dos primeiros a investigar o que hoje chamamos de plasma.

Cabe ressaltar que naquela época não se sabia da existência do elétron. Experimentos com o Tubo de Crookes eram comuns em toda comunidade científica mundial, porém Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) se notabilizou com a publicação do artigo, *Ueber Eine Neue Art von Strahlen* ("Sobre uma nova espécie de Raios") em 28 de dezembro de 1895.

### 3.5.2 OS RAIOS X

Por acaso Wilhelm Röntgen (1845-1923) certa noite estava em seu laboratório trabalhando com uma ampola de Crookes, onde no seu interior existiam gases em pequena quantidade e a baixas pressões. Em suas extremidades, havia dois eletrodos que estabeleciam uma diferença de potencial, passando corrente elétrica pelos gases dentro do tubo. A ampola de Crookes estava coberta com papel-cartão preto e as luzes estavam apagadas.

Röntgen percebeu que uma tela contendo platinocianeto de bário, que por acaso estava no seu laboratório, começou a brilhar quando a corrente surgia dentro

do tubo, apesar de que a placa estar a alguns metros de distância do tubo, mesmo com alguns objetos se interpondo entre eles. Platinocianeto de Bário é uma substância fluorescente que emite luz visível quando absorve energia, mas de onde vinha esta energia? Röntgen sabia se tratar de uma nova radiação e por não saber, chamou de Raios-X. Obteve o reconhecimento máximo com o prêmio Nobel em 1901 “em reconhecimento aos extraordinários serviços que a descoberta dos notáveis raios que levam seu nome possibilitara” e tem como homenagem, seu nome em um elemento químico, o Roentgênio (111-Rg). Apesar de ter ganhado seu nome, hoje majoritariamente são chamados de raios X, como preferia o próprio Roentgen. Ele doou todo prêmio em dinheiro obtido pelo Nobel para a Universidade de Munique, pois relatava que “a ciência devia estar a serviço da humanidade e não do lucro pessoal.”

Os raios catódicos são estabelecidos entre os dois eletrodos (do catodo ao anodo) e quando os elétrons atingem o anodo, eles perdem energia cinética. Esta perda é a origem da radiação eletromagnética raio-X, que é também chamada de *Bremsstrahlung*, radiação de frenagem em alemão. Röntgen notou também que eles não sofriam desvio por campo elétrico e podiam sensibilizar uma chapa fotográfica. Ele não sabia explicar a origem dos raios X, só sabia observá-los, pois neste momento histórico, ainda não se conhecia nêutron, próton e elétron, mas mesmo assim, era possível usá-lo em aplicações médicas. Röntgen fez a primeira radiografia usando a mão de sua esposa, pois percebeu que átomos mais pesados possuíam a propriedade de *bloquear* os raios-X e como os ossos são mais densos que outros tecidos, eles farão o papel de *meio opaco*, projetando no filme uma *sombra*.

A aplicação após descoberta foi rápida, pois a descoberta dos raios x ocorrera em novembro e a primeira radiografia em dezembro de 1895, um mês após. Em menos de dois meses, os mais importantes jornais do mundo já haviam noticiado esta descoberta, o que proporcionou que um hospital em Montreal utilizasse o raio x para localizar e extrair um projétil da perna do paciente Toulson Cunning, baleado em 25 de dezembro de 1895. Em maio de 1896 os raios X foram preponderantes para extrair balas do braço de um soldado italiano, ferido em campanha contra os etíopes. Marie Currie inventou um aparelho portátil que emitia Raios-X, amplamente utilizado na 1ª Guerra Mundial.

Como a utilização do Tubo de Crookes em pesquisas era muito comum nesta época, várias Universidades pelo mundo replicaram rapidamente o experimento de Röntgen, popularizando os raios-X em aplicações na medicina. Curioso é que o

próprio Crookes já havia percebido, segundo seus relatos, a existência dos raios X, pois várias placas fotográficas em seu laboratório inexplicavelmente também ficavam borradas.

### 3.5.3 A ORIGEM DA RADIOATIVIDADE

Cabe ressaltar que os raios X não são o mesmo que radioatividade. Os raios X são ondas eletromagnéticas de alta energia, com comprimento de onda no intervalo aproximado de  $10^{-11}$  a  $10^{-8}$  m (0,1 a 100 Å), portanto altamente penetrantes e resultam da colisão entre elétrons, ou seja, originam-se fora do núcleo do átomo. Já a radioatividade caracteriza radiações emitidas de núcleos atômicos instáveis. A descoberta dos raios X suscitou quase instantaneamente um grande número de trabalhos na Academia de Ciências de Paris e foi a principal motivação para o trabalho inicial de Antoine Henri Becquerel (1852-1908).

Antoine Henri iniciou sua carreira científica, de acordo com Oliveira (2019), seguindo os passos do pai, Alexandre-Edmond Becquerel (1820-1891). Suas principais investigações científicas de Becquerel foram sobre os fenômenos ópticos, especialmente a fosforescência utilizando compostos de urânio colecionados por seu pai. Segundo Martins (1990), a utilização de compostos de Urânio em pesquisas ópticas era muito comum na época. E o diferencial de Becquerel foi o uso de uma nova substância, o sulfato duplo de uranila e potássio.

Becquerel deixou ao sol amostras de um composto de urânio, o sulfato duplo de potássio e a uraniladi-hidratada. Em seguida, ele colocou essas amostras em contato com um filme fotográfico envolvido por um invólucro preto para ver se elas impressionavam o filme e, assim, emitiam raios X. Entretanto começou a chover em Paris e Becquerel teve que guardar as suas amostras em uma gaveta escura com alguns filmes virgens protegidos com um papel preto. Segundo Martins (1990), é questionável a pregada descoberta acidental da radioatividade, porém Becquerel relatou à Academia de Ciências da França em 1896, o supracitado acontecimento:

Como o Sol não apareceu de novo nos dias seguintes, revelei as placas fotográficas a 1º de março, esperando encontrar imagens muito fracas. Ao contrário, as silhuetas apareceram com grande intensidade. Pensei logo que a ação devia ter continuado na obscuridade e preparei a experiência seguinte: No fundo de uma caixa de cartão opaco coloquei uma placa fotográfica; depois, sobre o lado sensível, coloquei uma lamela do sal de urânio, lamela

convexa [com a parte central mais alta] e que tocava a gelatina apenas em poucos pontos; então, ao lado, na mesma placa, coloquei outra lâmina do mesmo sal, separada da gelatina por uma fina lâmina de vidro. Após realizar essa operação, na sala escura, a caixa foi fechada, então colocada dentro de outra caixa de papelão e por fim dentro de uma gaveta. (MARTINS, 1990, p. 34).

Segundo Oliveira (2019), Somente quando Marie e Pierre Curie descobriram substâncias muito mais ativas do que o urânio, houve uma maior divulgação da descoberta e dos efeitos da radioatividade, se tornando um fenômeno de grande importância para os físicos.

Marie Scklodowska Curie (1867-1934), objetivando iniciar sua tese de doutorado, decidiu estudar os *raios de Becquerel* e teve apoio de Pierre Curie (1859-1906), que promoveu seu acesso a laboratórios, ao seu rico aparato experimental e a minérios específicos. Eles descobriram que a propriedade verificada era pertencente ao urânio, pois todos os minérios de urânio, além de outros como o Tório, emitiam os raios que impressionavam o filme. Marie Curie batizou essa propriedade de o urânio emitir raios de *radioatividade*.

Os trabalhos do casal Curie protagonizaram avanços nos estudos da radioatividade. Em 1902, isolaram átomos de dois elementos químicos radioativos que não eram conhecidos na época. O *Rádio* (do latim *radius*, raio) muito mais radioativo que o Urânio e o *Polônio*, em homenagem à terra natal de Madame Curie. Em 1903, Marie Curie, Pierre Curie e Antoine-Henri Becquerel dividiram o Prêmio Nobel de Física pelos seus trabalhos com radioatividade.

Ernest Rutherford possuía dois brilhantes assistentes em Manchester, o jovem doutor Hans Geiger (1882-1945) e o estudante de graduação Ernest Marsden (1889-1970). Eles pesquisavam penetrabilidade de partículas  $\alpha$  em vários materiais, além de técnicas de contagem delas. Tais experimentos sobre comportamento das partículas alfa quando em interação com a matéria, culminaram em uma primeira publicação: *On a Diffuse Reflection of the  $\alpha$  – Particles*, na Royal Society em 1909. Conforme relata Lopes (2009), Geiger e Marsden mostraram resultados em lâminas de estanho, ouro, platina, chumbo, cobre, ferro e alumínio. Em uma segunda publicação mais detalhada feita por Geiger em 1910, o ouro recebeu destaque em relação aos outros metais.

Tais experimentos motivaram Rutherford a comunicar na Manchester Literary and Philosophical Society e publicar na revista *Philosophical Magazine and Journal of Science*, em maio de 1911 um artigo que descreve a dispersão de partículas  $\alpha$  e  $\beta$

pela estrutura do átomo, propondo seu modelo atômico, com um pequeno núcleo massivo e central e elétrons a sua volta. Na verdade Rutherford não afixou neste artigo, uma trajetória planetária para o elétron, para ele o átomo era composto por um núcleo e uma esfera eletrificada de carga. Cabe ressaltar que o modelo atômico de 1903 de Hantaro Nagaoka (1865-1950) anteriormente citado, dá justificativa teórica para a radioatividade, com quebras ocasionais dos anéis saturnianos. De acordo com Hentschel (2009), Nagaoka afirmava que os elétrons eram ejetados dos átomos na forma de raios beta.

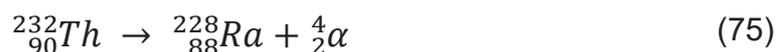
Rutherford refutou a tese de Thomsom da existência de pequenos desvios sucessivos no bombardeamento de partículas alfa, pois constatou alguns dos desvios ao atravessarem finas lâminas de ouro eram superiores a  $90^\circ$ . Assim, ele inferiu que os desvios decorriam de um único encontro da partícula com uma zona de intenso campo elétrico em uma zona central, um núcleo que poderia ser dotado de carga positiva e uma zona difusa à sua volta, com carga negativa. Corrêa (2014) resalta que neste momento, Rutherford não tinha convicção em sua teoria, sobre ao sinal da carga elétricas do núcleo, mastinha a noção de sua importância, que além de massivo, determinava as características físicas e químicas dos elementos, e ainda determinava o número e a distribuição dos elétrons ao seu redor.

Novos experimentos de Geiger e Marsden em 1913 corroboraram o modelo atômico de Rutherford o que o faz publicar outro artigo em março de 1914, mais detalhado sobre o núcleo ("The Structure of the Atom"), na mesma revista que publicara seu primeiro artigo em 1911. Ele inferiu que o átomo consistia num núcleo de pequenas dimensões carregado positivamente no qual se concentrava praticamente toda a massa do átomo. Da mesma forma que Bohr, Rutherford questiona a possibilidade de existência de elétrons no núcleo e também concluiu que as partículas  $\beta$  provinham do núcleo. O átomo de Rutherford instigou a comunidade científica sendo base para outros modelos atômicos e inaugura o que no futuro vai se chamar física nuclear. Ele relata:

Para explicar os grandes desvios angulares das experiências de dispersão das partículas  $\alpha$ , supus que o átomo consistia num núcleo de pequenas dimensões carregado positivamente no qual se concentrava praticamente toda a massa do átomo. Considerei o núcleo rodeado de elétrons, de modo a tornar o átomo eletricamente neutro, distribuídos a distâncias comparáveis ao que se considera ser o raio do átomo. (CORRÊA, 2014, p. 2).

A radioatividade é a desintegração espontânea de alguns núcleos atômicos em face de emissão de partículas ou radiação eletromagnética. Um elemento químico é radioativo quando seu núcleo é instável e esta instabilidade vem do desequilíbrio entre duas forças ali existentes, a força eletrostática e a força nuclear forte. A primeira força determina a repulsão entre os prótons e a segunda, com alcance limitado a distâncias de dimensão do diâmetro atômico, é intermediada por uma partícula elementar, o glúon que tem como função manter os quarks juntos uns aos outros, bem como os nêutrons e prótons no núcleo atômico. O excesso de prótons ou nêutrons no núcleo promove desequilíbrio entre as citadas forças motivando a instabilidade, haja vista que, de acordo com Parkhomenko (2005), todo átomo com mais de 82 prótons é radioativo. Chamamos de decaimento radioativo, o rompimento do núcleo em face desta instabilidade e na busca do equilíbrio, o núcleo atômico emite radiações alfa, beta e gama. Ressaltemos ainda que, conforme relata Silva (2019), não possuímos leis determinísticas de desintegração para átomos individuais. O que temos é que o fenômeno de desintegração radioativa é de natureza estatística para uma grande amostra de núcleos.

O decaimento alfa, o mais comum, surge com a emissão de dois prótons e dois nêutrons com velocidade igual a um décimo da velocidade da luz e tem baixo poder de penetração na matéria. Após a eliminação um novo átomo/núcleo é formado com número atômico de duas unidades menor que o do átomo originário e número de massa quatro unidades menor. O decaimento alfa é comumente encontrado em núcleos pesados, como o urânio-238 e o rádio-226. Esse processo é regido por interações nucleares fortes.



O decaimento beta é um tipo de decaimento radioativo em que um núcleo instável emite um elétron ( $\beta^-$ ) ou um pósitron ( $\beta^+$ ). No decaimento beta negativo ( $\beta^-$ ), um nêutron se transforma em um próton, um elétron e um antineutrino. No decaimento beta positivo ( $\beta^+$ ), um próton se transforma em um nêutron, um pósitron e um neutrino.

Essa transformação muda o número atômico do núcleo, enquanto o número de massa permanece o mesmo. Possui penetrabilidade intermediária na matéria, com 90% da velocidade da luz no vácuo. Este tipo de emissão é regido por interações nucleares fracas.

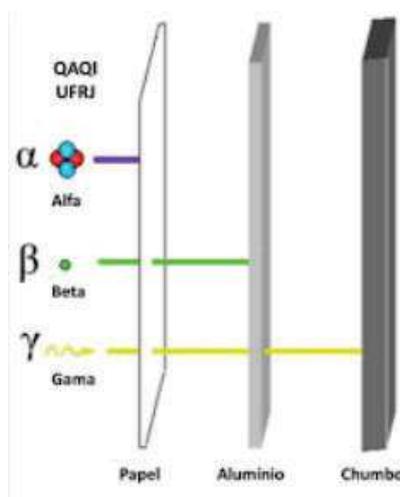


O decaimento gama é um processo no qual um núcleo excitado emite uma partícula de alta energia, chamada fóton gama ( $\gamma$ ), para alcançar um estado de menor energia. Estes fótons não possuem carga elétrica nem massa, possuem alto poder de penetração na matéria e velocidade  $c$ . Esse tipo de decaimento não promove a transmutação e geralmente segue os decaimentos alfa e beta para estabilizar o núcleo.



*m significa metaestável*

Figura 13 - Penetrabilidade das radiações



Fonte: <https://www.facebook.com/QualitativaInorgUfrj/photos/a.903760846319655/3565962100099503/?type=3>

As radiações podem ser classificadas em ionizantes, quando possui energia suficiente para arrancar elétrons dos átomos produzindo cátions e não ionizantes. Podemos exemplificar as radiações ionizantes com os raios-X e as radiações alfa, beta e gama. As ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível e ultravioleta são exemplos de radiação não ionizante.

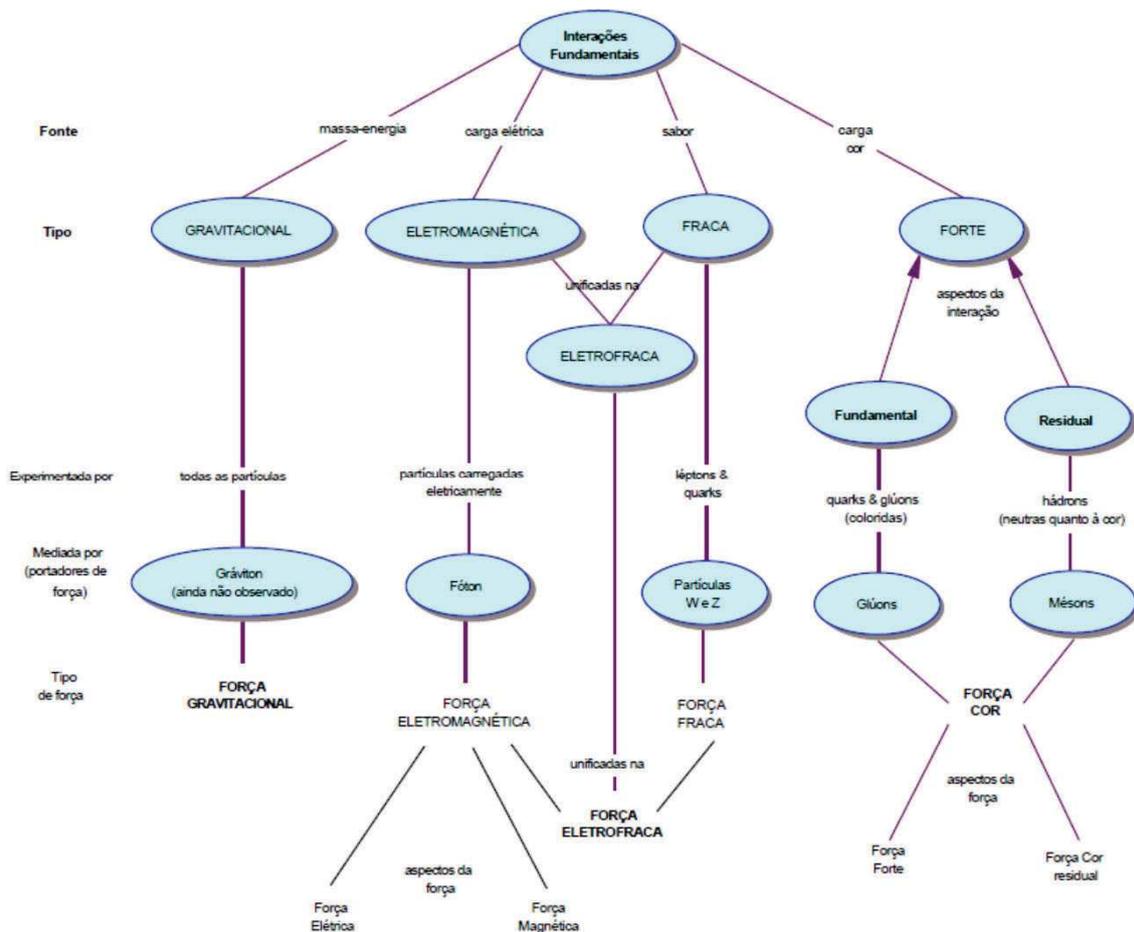
Apesar de ter sido constatada em 1896 por Becquerel e investigada incansavelmente pelo casal Curie, o que motivou um prêmio Nobel de Física em 1903 para o trio, uma explicação consistente para a radioatividade não encontrou amparo teórico no conhecimento até então existente.

O raio de Becquerel fez parte do rol dos fenômenos sem explicação e ombreou juntamente com o problema da capacidade térmica para sólidos (Lei de Dulong – Petit 1819), com a radiação do corpo negro (Kirchhoff 1860), com as linhas espectrais do átomo de hidrogênio (Balmer 1885) e com o efeito fotoelétrico (Hertz 1887); na busca de uma teoria esclarecedora em face da limitação da Física Clássica. Somente com o surgimento de uma *física moderna*, ou seja, com o advento da teoria quântica, todas as inseguranças conceituais foram sanadas. Neste diapasão de descobertas, a radioatividade foi contemplada no início do século XX, com o desenvolvimento de um modelo que descreve as partículas que constituem a matéria e suas interações. Estamos falando do Modelo Padrão da Física de Partículas, uma teoria quântica de campos desenvolvida nos anos 70 do século XX e estudada até hoje.

Conforme relata Moreira (2004), não somente devemos conhecer as várias partículas constituintes da matéria, existentes no modelo padrão. Devemos também

saber como também elas interagem, como elas integram sistemas estáveis e como elas se desintegram. Chegamos às partículas mediadoras das forças fundamentais da natureza, protagonistas da cromodinâmica quântica (QCD). No entanto, diante do universo das incertezas das partículas elementares, o conceito de força não se faz preciso, sendo mais aprazível o uso do termo interação, assim temos as interações gravitacionais, eletromagnética, forte e fraca. A interação forte atua nos hádrons, que são sistemas de quarks e glúons e mantém prótons e nêutrons juntos no núcleo atômico. A interação fraca atua sobre todas as partículas elementares, esta é a responsável pelo decaimento radiativo de partículas como nêutrons, e também por todas as reações envolvendo neutrinos.

Figura 14 - Mapa Conceitual das Interações Fundamentais



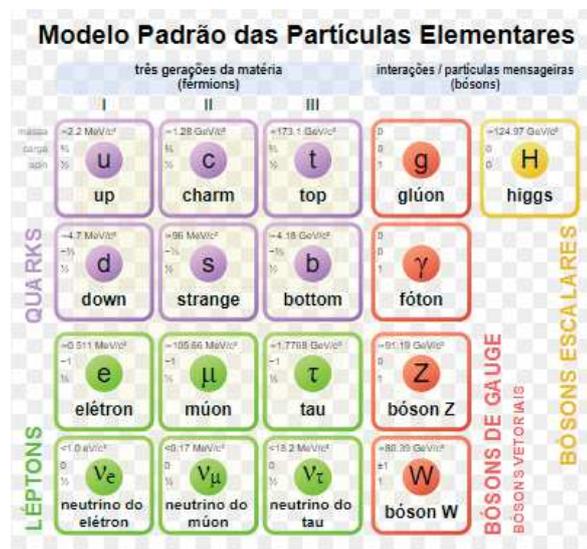
Fonte: MOREIRA, M. A. Partículas e Interações. Física na Escola, 2004.

Estas interações são viabilizadas por partículas elementares, a saber: o gráviton, a partícula hipotética que media a interação gravitacional; o fóton, presente na interação eletromagnética; os bósons W e Z, na interação fraca e os glúons, na

interação forte. A massa de repouso destas partículas é inversamente proporcional ao alcance da interação por ela causada. Fótons e grávitons por não terem massa, promovem um alcance infinito da interação eletromagnética e gravitacional, respectivamente. As interações forte e fraca são mediadas por partículas massivas, portanto, de curto alcance. Ressalta ainda Moreira (2004):

Essas quatro (ou três) interações são mediadas por partículas (portadoras de força) elementares – grávitons (gravitacional), fótons (eletromagnética), W e Z (fraca) e glúons (forte) – e descritas por campos de força. Os mésons mediam a interação forte residual. Quer dizer, além dos campos gravitacional e eletromagnético, que são relativamente familiares, há também o campo forte e o campo fraco. A energia armazenada nesses campos não está neles distribuída de maneira contínua: está quantizada, isto é, concentrada nos chamados quanta de energia. Assim, os fótons são os quanta do campo eletromagnético, as partículas W e Z são os quanta do campo fraco, os glúons do campo forte e os grávitons do campo gravitacional. (MOREIRA, 2004, p. 12).

Figura 15 - Modelo Padrão das Partículas Elementares



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo\\_Padr%C3%A3o](https://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo_Padr%C3%A3o)

### 3.5.4 TUNELAMENTO QUÂNTICO E O DECAIMENTO ALFA

Chamamos de Barreira de Potencial a região onde existe um potencial que impede classicamente, uma partícula de atravessá-lo, usando uma imaginação pictórica, um muro a ser transposto. Para atravessar esta barreira classicamente teremos que ter um incremento de energia cinética à energia potencial mínima  $U_0$  necessária para transpor a barreira, ou seja, uma energia total  $E > U_0$ . Outra alternativa deriva de visão quântica, quando partículas podem transpor esta barreira, ou um estado de energia classicamente proibido, ou escapar de regiões cercadas por barreiras potenciais, mesmo com energia cinética menor que a energia potencial das barreiras. Assim, esta partícula pode usar da pequena probabilidade do tunelamento quântico ou efeito túnel, analogamente a uma bola atravessando um muro. Podemos identificar tais barreiras no perímetro de um núcleo atômico, e adotando esta opção, existe a probabilidade de uma partícula vencer a barreira de potencial do núcleo radioativo e ser emitida, com energia menor que a do pico de barreira, como observamos na emissão de radiação alfa.

Figura 16 - Compton, Heisenberg, Dirac e Hund em Chicago (1929)



Fonte: [https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Hund,Friedrich\\_1929\\_Chicago.jpg](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Hund,Friedrich_1929_Chicago.jpg)

Este fenômeno quântico fora observado e teorizado em 1927 por Friedrich Hund (1896-1997) e, conforme afirma Bassalo (2019), o intrigante decaimento alfa foi resolvido após o estabelecimento teórico do tunelamento quântico por George Antonovich Gamow (1904-1968), publicado no extinto periódico alemão *Zeitschrift für*

*Physik* (Revista de Física) em 1928, quando o mesmo se encontrava concluindo seu pós-doutoramento em Gottingen, na Alemanha. Gamow aplicou a descrição da mecânica quântica ondulatória de Erwin Schrodinger (1887-1961) publicada no periódico *Annalen der Physik* dois anos antes. Em entrevista ocorrida em 25 de abril de 1968, quatro meses antes de sua morte, ao historiador da ciência norte-americano Charles Weiner (1932- 2012), Gamow revelou que em face da sua bolsa em Göttinger ser encerrada, e ele, com apenas 10 dólares disponíveis, decidiu voltar para Leningrado, e passando por Copenhague, resolveu encontrar Bohr:

Eu desejava encontrar Bohr, e como eu tinha a passagem de volta, eu mudei para Copenhague/Estocolmo e Finlândia. Dispunha de algo em torno de \$10, o bastante para um dia. Cheguei a Copenhague, me instalei num hotel barato e rumei para o Instituto de Bohr onde fui recebido pela secretária, Sra. Schultz [Betty Schultz (1898-1980)]... Falei a ela que só iria passar um dia e gostaria de falar com Bohr. Ela me falou que o professor era muito ocupado e que eu teria de esperar pelo menos um par de dias. Repliquei, “Eu tenho de viajar amanhã porque não tenho dinheiro nem para comer”. Ela foi até Bohr que veio falar comigo na biblioteca onde eu estava esperando e perguntou-me o que eu estava pesquisando. Falei-lhe do meu trabalho sobre o decaimento alfa, que ainda não havia sido publicado... e então Bohr disse, “Minha secretária falou-me que você não pode ficar mais do que um dia porque você não tem dinheiro. Agora se eu arranjar uma bolsa de estudos (‘fellowship’)...Você ficaria por um ano? Respondi imediatamente: “Claro, sem dúvida! (BASSALO, 2019, p. 2).

Gamow ficou na Dinamarca por três anos, local muito apropriado para físicos que almejavam se aprimorar em Física Atômica. De acordo com Harper (2000), além de ter sido grande colaborador na teoria do big bang e do universo em expansão, Gamow fez enormes contribuições para a compreensão da incipiente Física nuclear e na astronomia. Foi o primeiro pesquisador a propor que a seqüência de nucleotídeos do DNA poderia servir como código para a produção das proteínas, sendo grande colaborador na compreensão do código genético. Foi um dos participantes da 7ª Conferência de Solvay de 1933 que abordou a “Estrutura e propriedades do núcleo do átomo”

Figura 17 - 7ª Conferência de Solvay - Bruxelas (1933)

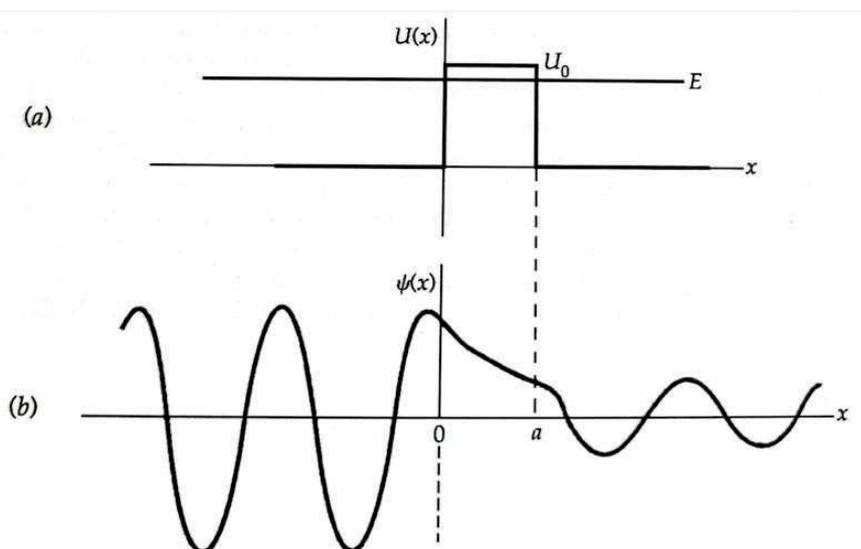


Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a9/Solvay1933Large.jpg>

Tipler (1995) relata a penetração de barreiras (tunelamento quântico) apresentada por Gamow em 1928 para explicar o decaimento alfa. Consideremos uma partícula quântica vinda da esquerda, com energia  $E$  menor que  $U_0$ , que pode ser representada por uma função de onda contínua, incidindo sobre a barreira potencial. Na visão clássica, a partícula seria refletida pela barreira com total certeza. Porém, a onda incidente na barreira não tem sua amplitude reduzida à zero de forma instantânea, mas diminui exponencialmente na região ( $0 < x < a$ ) classicamente proibida. Ao atravessar a barreira, se a amplitude da onda não tiver sido reduzida a zero, esta amplitude final volta a ser constante e constituirá a nova onda, conforme a figura 28. Embora a proibição pela teoria clássica, existe a probabilidade da partícula (onda) atravessar a barreira de potencial, e esta probabilidade de penetração diminui

exponencialmente com a espessura  $a$  e com a raiz quadrada da altura relativa da barreira ( $U_0 - E$ ).

Gráfico 11 - Penetração em barreiras



Fonte: TIPLER, P. A. **Física**: para cientistas e engenheiros, vol 4, p. 228 3ª Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1995.

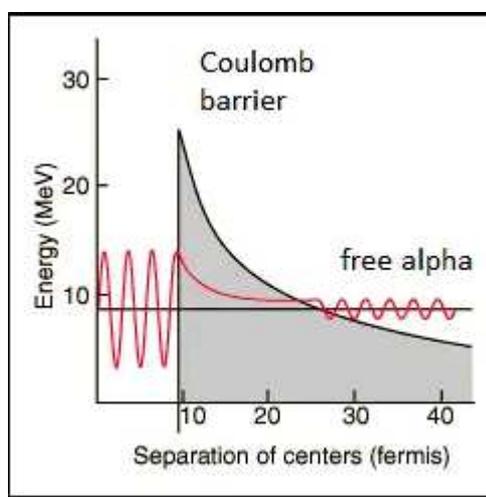
A partir dos trabalhos 1924 de Louis de Broglie (1892-1987), que descreve um comportamento ondulatório para partículas, Erwin Schrödinger (1887-1961) em 1926 instituiu o formalismo básico da mecânica quântica, a equação de Schrödinger. Neste mesmo ano, Max Born (1882-1970) propôs um significado físico para aquela equação. Para Born a função de onda da equação de Schrödinger elevada ao quadrado define a probabilidade de se encontrar uma partícula, onde para uma maior amplitude, temos maior probabilidade. Assim, nesta análise estatística, a menor amplitude da onda após o tunelamento, mostra uma probabilidade muito menor deste tunelamento realmente acontecer. E ele só acontece por conta do comportamento ondulatório das partículas, neste universo microscópico e quântico.

A estabilidade do núcleo decorre do equilíbrio entre a força eletrostática e a nuclear forte, assim apesar da força forte ter alcance limitado, ela constituirá uma barreira potencial para qualquer emissão deste núcleo. De acordo com Connor (2020), o decaimento alfa só acontece em face de um processo de tunelamento quântico, pois

a partícula alfa só será emitida após atravessar uma barreira de potencial, que chamaremos de barreira de Coulomb.

Ocorre que esta barreira, ou a altura da barreira de Coulomb é equivalente a uma energia potencial a ser vencida de aproximadamente 25 MeV e as partículas alfa emitidas no decaimento do núcleo, possuem em torno de 5 MeV. Classicamente, isto é impossível, mas para a mecânica quântica, não. Assim, a radiação de partículas alfa pode ser estatisticamente explicada pelo tunelamento quântico de Gamow.

Gráfico 12 - Barreira de Coulomb



Fonte: <https://www.radiation-dosimetry.org/pt-br/o-que-e-a-teoria-do-decaimento-alfa-tunelamento-quantico-definicao>

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 METODOLOGIA DE ENSINO

Toda idealização de um roteiro de trabalho, teve como fator norteador, a busca de resposta para a pergunta de pesquisa: “Como o estudo de temas da Mecânica Quântica, dando a devida relevância ao contexto histórico, pode contribuir para a promoção do Letramento/Alfabetização Científica do aluno?”

Cabe ressaltar que originalmente, este professor objetivou desenvolver sua pesquisa sobre a possibilidade de se ministrar tópicos de Mecânica Quântica no Ensino Médio com Aprendizagem Significativa, a partir da apresentação da constante

de Planck e seu contexto na Radiação do Corpo Negro. Assim, já estavam planejados a apresentação de uma singela Sequência Didática e a realização de uma atividade experimental com obtenção da referida constante utilizando-se LEDs. Seriam abordados na Sequência os assuntos: Radiação do Corpo Negro, Metrologia e a Mecânica Quântica com seus aspectos conceituais abordados de forma qualitativa.

Assim, após a execução de todo este planejamento, esperava-se testar com resultados positivos, a hipótese que **os alunos possuem uma motivação prévia e latente para a busca de conhecimentos ligados a Mecânica Quântica e estão à espera de uma ação docente para despertá-los.**

No entanto, este projeto ganhou mais corpo e a pesquisa se baseou na descrição de cinco problemas não resolvidos pela Teoria Clássica até o final do século XIX, ganhando outro título, Prelúdio do Quantum: as cinco rachaduras na Física Clássica que levaram à Teoria Quântica. Foi então aperfeiçoado o rol de assuntos a serem abordados, incluindo o estudo do Efeito fotoelétrico, As linhas espectrais de Balmer, a Capacidade térmica molar a volume constante dos sólidos e o Tunelamento quântico de Gamow para explicar a emissão alfa na Radioatividade.

Coroando este trabalho de pesquisa sobre assunto tão relevante, foi concebido um robusto Produto Educacional que dividimos em três partes.

A primeira parte do Produto Educacional se trata de um e-book de título: **“Prelúdio do Quantum: As Cinco Rachaduras na Física Clássica que levaram à Teoria Quântica”**. Neste livro abordamos cinco problemas sem embasamento teórico na Teoria Clássica e sem respostas até o final do século XIX, que só foram solucionados com o surgimento do quantum. Assim, discorreremos sobre a Radiação do Corpo Negro, Efeito Fotoelétrico, Linhas espectrais de emissão e absorção, Capacidade Térmica de sólidos a volume constante e Radioatividade. Estes assuntos também fazem parte do rol de aulas presentes no segundo segmento do Produto Educacional, aplicado aos alunos, cujo resultado será apresentado em outra seção. Ressaltemos que o título do e-book acima citado, é também, título da Dissertação e do Produto Educacional.

Esta primeira parte tem como destino o professor-leitor, mesclando recortes de História da Ciência e em alguns momentos, incrementos quantitativos com certo rigor conceitual. Nos outros dois segmentos, o alvo final é o aluno. Então, esforços pedagógicos são envidados nestas duas outras frações do Produto Educacional, para

que o professor-leitor esteja apto para a importante tarefa educacional introdutória à Mecânica Quântica.

O segundo segmento do Produto Educacional é uma Seqüência Didática “**O surgimento da Mecânica Quântica: Recursos pedagógicos para a sala de aula**”. Aqui nossa proposta foi apresentar o nascimento da Teoria Quântica sob uma óptica qualitativa, com linguagem adequada e atrativa. Nosso objetivo é convidar o aluno para um universo diferente do seu mundo real de dimensões visíveis, onde a física se baseia em observações lógicas com previsões concretas. Neste segundo momento, apresentamos aos alunos, as escalas subatômicas da matéria, onde as certezas desaparecem e uma realidade probabilística desafia o senso comum. Abordaremos em uma Seqüência Didática em oito aulas em PowerPoint, os cinco problemas citados no e-book, além de tópicos de metrologia e conceitos básicos da Teoria Quântica.

Para cada aula são disponibilizados dois links. O primeiro remete o professor-leitor ao conjunto de slides que compõem o assunto. O segundo direciona o leitor a um vídeo produzido pelo autor, que apresenta a aula disponibilizando dicas e ideias que fomentaram a construção dos slides, além de curiosidades históricas que ilustram o conteúdo.

Ainda nesta segunda fração do Produto Educacional, são apresentados nove questionários. O primeiro de caráter investigativo, composto de quarenta questões, cinco de cada assunto, visa obter concepções prévias de nossos alunos. Este primeiro questionário é aplicado antes das oito aulas. Os demais questionários são aplicados após cada aula com dez perguntas cada, cinco repetidas e cinco inéditas.

Assim, as quarenta perguntas presentes no primeiro questionário, são apresentadas aos alunos duas vezes, antes e depois das aulas ministradas, para posterior comparação de resultados. Outras quarenta questões inéditas, cinco de cada assunto, são feitas aos alunos após as aulas, com objetivo de reforçar o instrumento de medida de ocorrência ou não de Aprendizagem Significativa.

Foi utilizado como mecanismo de coleta de dados referentes às respostas dos alunos às oitenta questões, o Google Forms. Para o posterior tratamento estatístico das informações coletadas, foi utilizado o Google Planilhas.

Conforme relatado nas Seções Fundamentação Teórica e Revisão da Literatura, este professor-perquisador escolheu como embasamento pedagógico para este trabalho, uma Teoria da Aprendizagem que, para Moreira (2019), é fronteira entre duas Correntes Filosóficas, a Cognitivista e a Humanista. Trata-se da Teoria da

Aprendizagem idealizada por Ausubel (1918-2018) e corroborada por Novak (1932-2023), a Aprendizagem Significativa. Este pesquisador ainda vislumbrou nas Seções acima citadas que, o Produto Educacional, principalmente nos seus dois últimos segmentos, caracterizou-se como uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), conforme ensina Moreira (2011).

O terceiro momento do Produto Educacional promove um coroamento da apresentação deste importante tópico de Física Moderna no Ensino Médio: a Mecânica Quântica. Trata-se de uma prática em laboratório didático: **“A Constante de Planck em um contexto pedagógico: Atividade experimental introdutória à Mecânica Quântica”**. Nesta última parte, apresentamos uma atividade testada com alunos do terceiro ano do Ensino Médio, que objetiva calcular o valor da constante de Planck em laboratório, utilizando LED de várias cores. O aplicativo de celular **Spectrometer**, em sua versão gratuita, foi utilizado para se obter com boa precisão, as frequências das cores emitidas por cada LED, imprescindíveis para o cálculo da referida constante.

Neste momento podemos observar o empenho e motivação dos alunos no ambiente de um laboratório didático de Física. Percebemos praticamente uma unanimidade participativa, quando ouvimos relatos efusivos de como um experimento tão simples pudesse chegar ao valor de uma constante fundamental que parecia tão distante do universo dos alunos.

## 4.2 METODOLOGIA DO TRABALHO

A aplicação do Produto Educacional ocorreu em duas turmas do terceiro ano do Ensino Médio e o local escolhido foi o Campus Niterói-RJ do Colégio Pedro II.

Ressaltemos que a composição do Corpo Discente do Colégio se dá por concurso público com metade das vagas para alunos oriundos da rede privada e a outra metade da rede pública.

Foram realizados 10 (dez) encontros. No primeiro, realizado em sala de aula da respectiva turma, foi aplicado um questionário de 40 (quarenta) perguntas sobre Mecânica Quântica, após breve discussão e antes da apresentação da Sequência Didática, com o objetivo de se conhecer eventuais concepções prévias dos alunos, a

respeito de cada tema que futuramente será abordado em aula específica. No último encontro foi realizada uma atividade experimental com obtenção da constante de Planck.

Com exceção do primeiro, todos os encontros, pormenorizados nas duas últimas partes do Produto Educacional, foram realizados no Laboratório Didático de Física do Campus, onde foram ministradas oito aulas utilizando-se o recurso de PowerPoint.

As oito aulas ministradas, de caráter eminentemente qualitativo, abordaram os temas abaixo, com forte presença da História da Ciência:

- Aula 1 - Os cinco problemas não resolvidos pela Teoria Clássica
- Aula 2 - As Constantes da Natureza, o Sistema Internacional de Unidades e as Grandezas Físicas Fundamentais
- Aula 3 - Radiação do Corpo Negro
- Aula 4 - Efeito Fotoelétrico
- Aula 5 - Capacidade Térmica molar a volume constante dos sólidos
- Aula 6 - Radioatividade e o Tunelamento Quântico
- Aula 7 - Linhas Espectrais de Emissão e Absorção
- Aula 8 - A Mecânica Quântica

Cada turma de aula tem 04 (quatro) tempos semanais de física e em face do cumprimento do conteúdo programático previsto, cada encontro teve a duração de 02 (dois) tempos de aula com 40 (quarenta) minutos cada.

Ressalta-se o apoio recebido por este pesquisador, do Campus Niterói do Colégio Pedro II, nas figuras do Técnico de laboratório, Coordenador de Física e Direção. Sem estas pessoas, este projeto não seria viável.

Previamente avisados por um calendário antecipadamente estabelecido, cada aluno providenciava para cada aula, um telefone celular para responder questionários disponibilizados no e-mail da respectiva turma.

Tabela 3 - Cronograma de aplicação do Produto Educacional

<b>Encontro</b>	<b>Atividade</b>	<b>Turma 1307</b>	<b>Turma 1311</b>
<b>1</b>	Questionário Introdutório	18 set 2023	14 set 2023
<b>2</b>	Aula 1	25 set 2023	21 set 2023
<b>3</b>	Aula 2	2 out 2023	28 set 2023
<b>4</b>	Aula 3	19 out 2023	10 out 2023
<b>5</b>	Aula 4	26 out 2023	19 out 2023
<b>6</b>	Aula 5	9 nov 2023	26 out 2023
<b>7</b>	Aula 6	16 nov 2023	9 nov 2023
<b>8</b>	Aula 7	23 nov 2023	16 nov 2023
<b>9</b>	Aula 8	27 nov 2023	23 nov 2023
<b>10</b>	Atividade Experimental	4 dez 2023	30 nov 2023

Fonte: O autor

Na próxima Seção apresentaremos os excelentes resultados obtidos com a Sequência Didática, que responderá a Pergunta da Pesquisa e corroborará a hipótese estabelecida desde a fase de projeto deste trabalho.

## 5. RESULTADOS

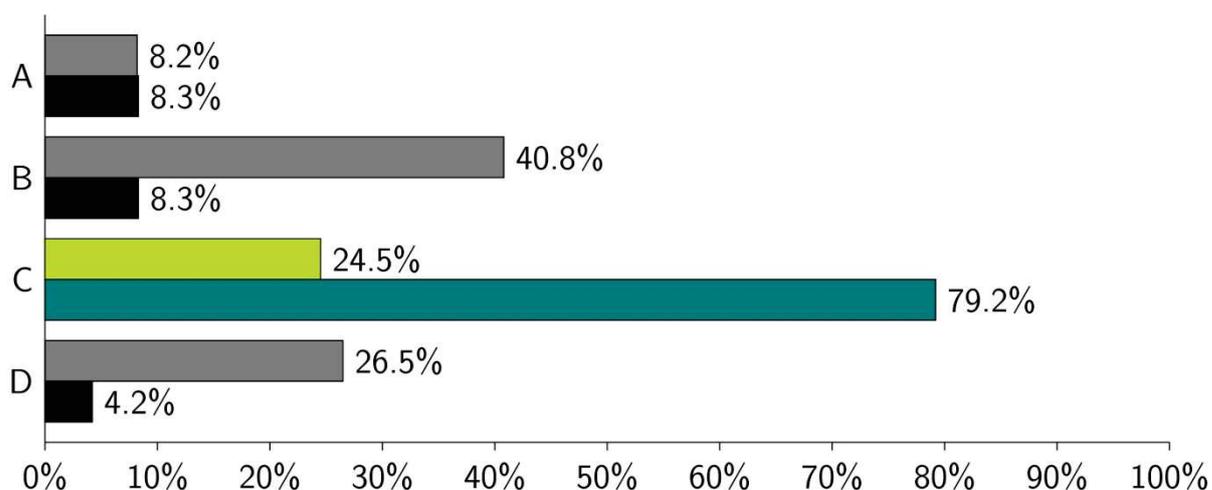
Segue abaixo um questionário com 40 perguntas apresentadas aos alunos, antes e depois das aulas. São cinco questões de cada tópico, dos oito apresentados. Após cada pergunta, foi registrado o desempenho dos alunos, com o percentual antes e depois em cada alternativa da questão. A opção correta apresenta o percentual na cor verde escuro quando aplicada ao aluno depois da aula e na cor verde clara para a opção correta assinalada pelos alunos antes de cada aula. Para as opções incorretas de cada pergunta, temos a cor cinza que representa percentuais registrados pelos alunos antes de cada aula e a cor preta para percentuais de erros cometidos pelos alunos quando respondiam as perguntas depois das aulas ministradas.

## Quiz 0 – Questionário introdutório visando percepção de conhecimentos prévios dos alunos sobre Mecânica Quântica e verificação da aprendizagem

### I. Contexto Histórico da Física Quântica - Cinco problemas solucionados pela Mecânica Quântica

#### 1) O que é Física Clássica?

- a) A física que se desenvolveu até o período renascentista no final do século XVI.
- b) Todos os desenvolvimentos teóricos e experimentais em física, até a publicação do livro *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* em 1687 por Isaac Newton.
- c) Conhecimentos acumulados de mecânica, eletromagnetismo e termodinâmica desenvolvidos até a percepção da discretização energética.
- d) Conjunto de conceitos físicos que compreendem mecânica, óptica, eletromagnetismo, termodinâmica e mecânica quântica.

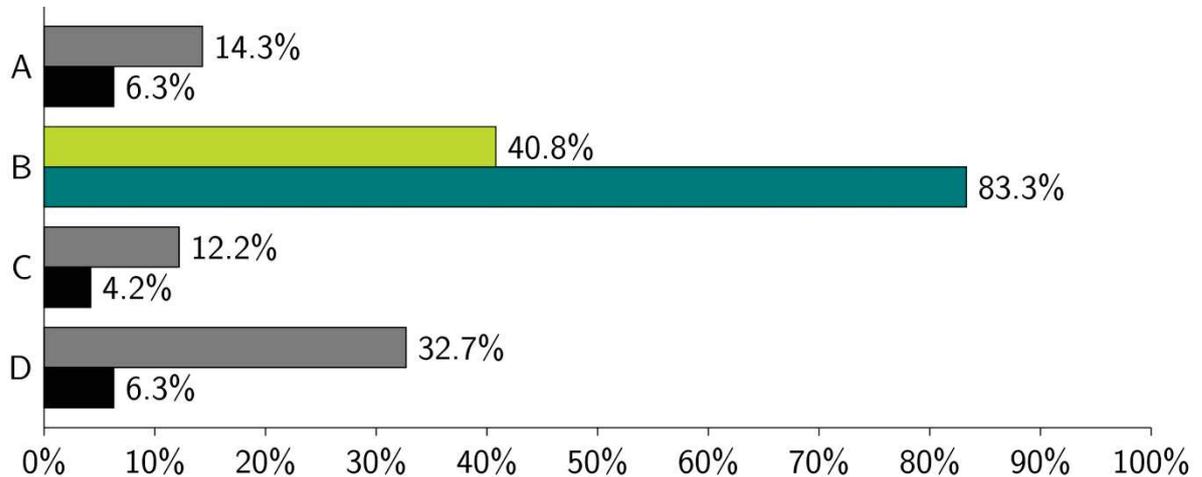


#### 2) Quais são os problemas experimentais do século XIX que não foram resolvidos pela física clássica e que só foram compreendidos com o desenvolvimento da teoria quântica no início do século XX?

- a) Lei da Inércia, relatividade especial, radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico e gravitação.
- b) Espectro de emissão e absorção de gases, calor específico de sólidos, radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico e radioatividade

c) Ondas eletromagnéticas, calor específico dos sólidos, radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico e coeficiente de atrito estático.

d) Relatividade especial, radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico, gravitação e força de atrito.



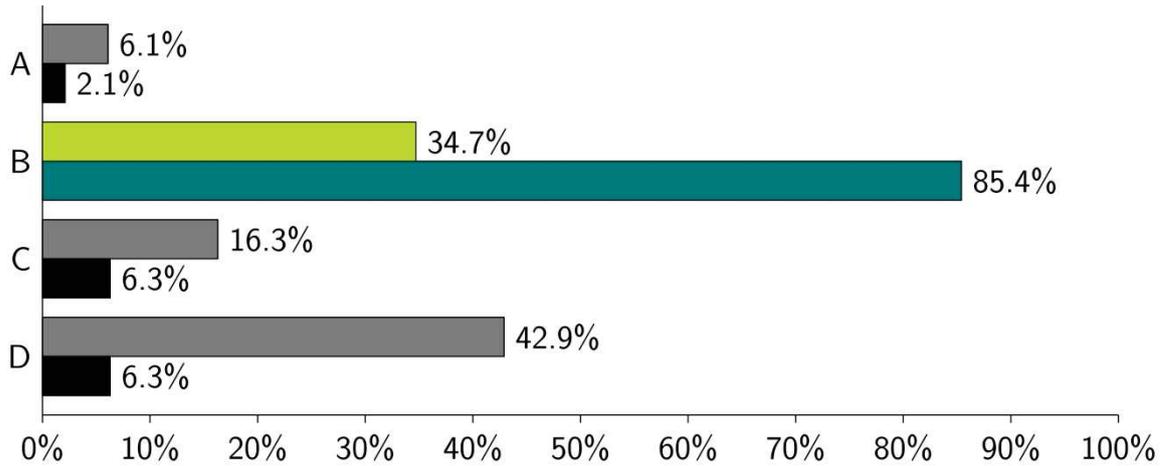
**3) Por que a Alemanha no final do século XIX foi o ambiente fértil para o surgimento e desenvolvimento da mecânica quântica?**

a) Tendo em vista a tradução para o alemão da obra Livro de Óptica escrita por Ibn al-Haytham no Século X.

b) Unificação política e territorial com a subsequente revolução industrial alemã. Assim, grandes reservas de carvão fomentaram o desenvolvimento da metalurgia alemã e das teorias de refinamento da Termodinâmica.

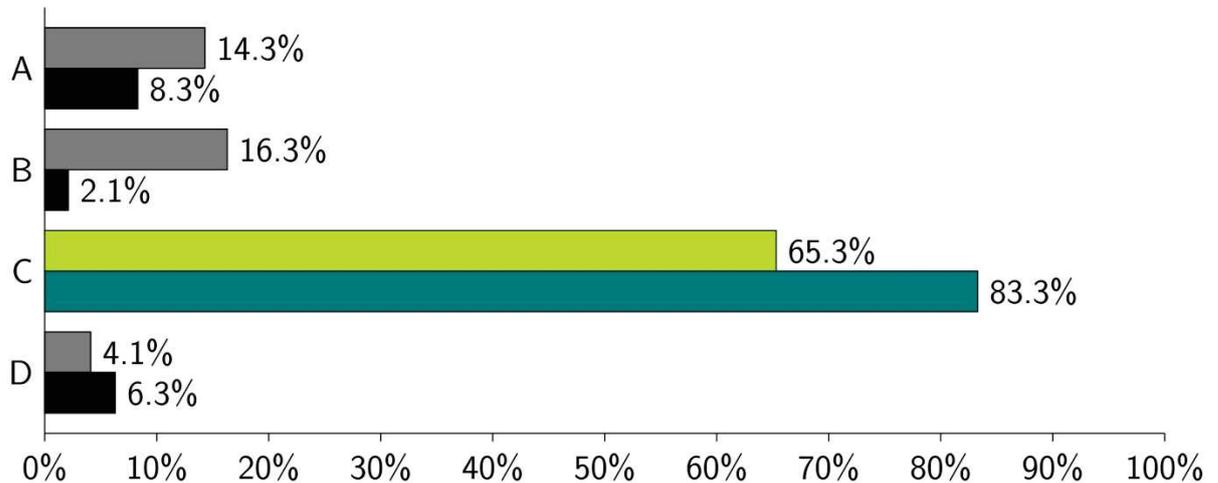
c) Acordo de colaboração científica celebrado entre a Alemanha e a Inglaterra em 1887 liderado por Michael Faraday e Gustav Kirchhoff.

d) O protagonismo alemão liderado por Hermann Von Helmholtz no eletromagnetismo teórico e experimental pós-Maxwell.



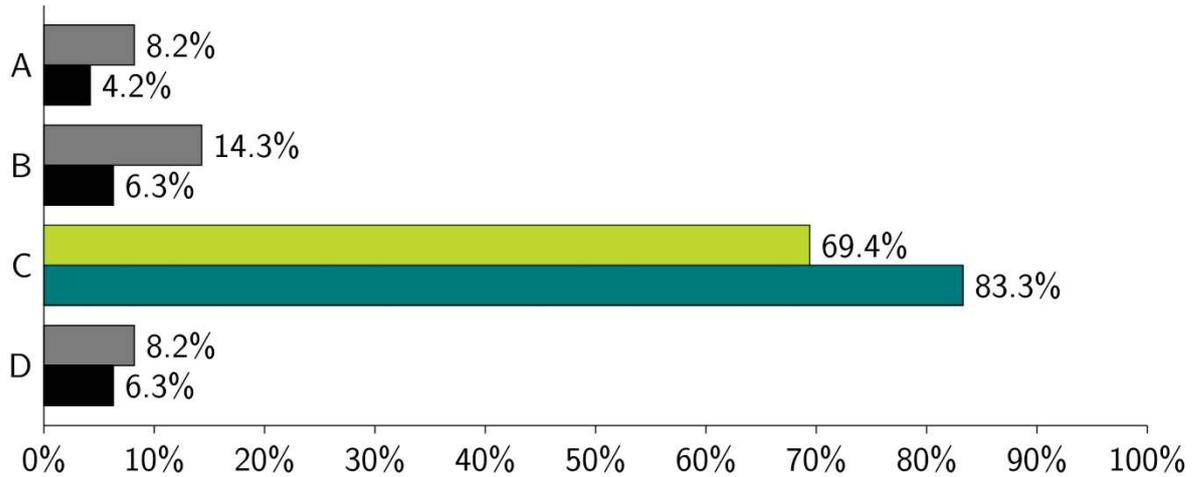
**4) Qual das alternativas a seguir NÃO contribuiu para o desenvolvimento da mecânica quântica?**

- a) A descoberta do elétron por J. J. Thompson.
- b) As observações do efeito fotoelétrico.
- c) O desenvolvimento da dinâmica por Isaac Newton.
- d) O estudo da radiação do corpo negro.



**5) Por que a mecânica quântica é considerada uma revolução?**

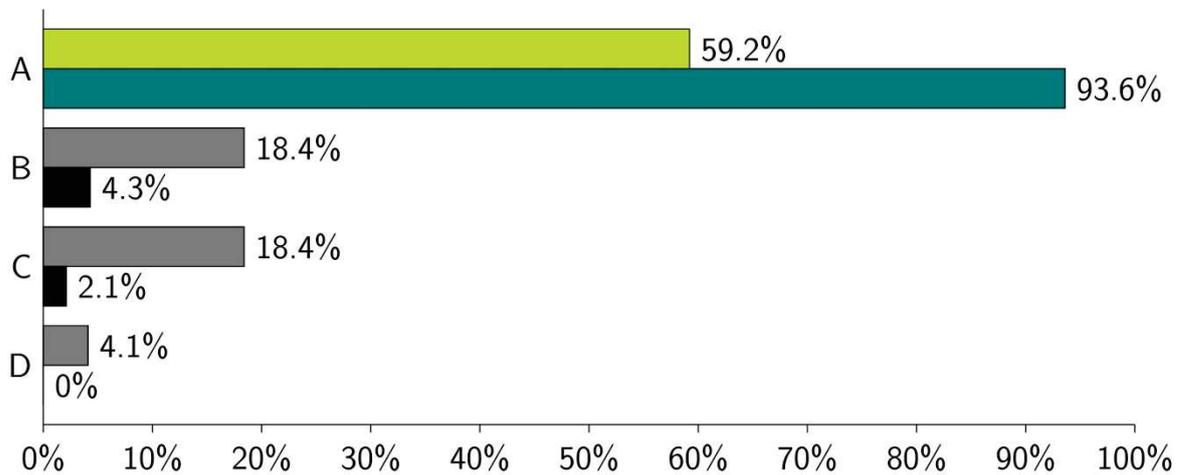
- a) Porque estabelece um valor numérico para a velocidade da luz no vácuo.
- b) Porque nega implacavelmente a constante de Boltzmann.
- c) Porque foi evidenciado que as ondas eletromagnéticas podem ser descritas como fótons.
- d) Porque estabelece o caráter contínuo e indivisível da luz.



## II. O Sistema Internacional de Unidades e as Constantes Fundamentais

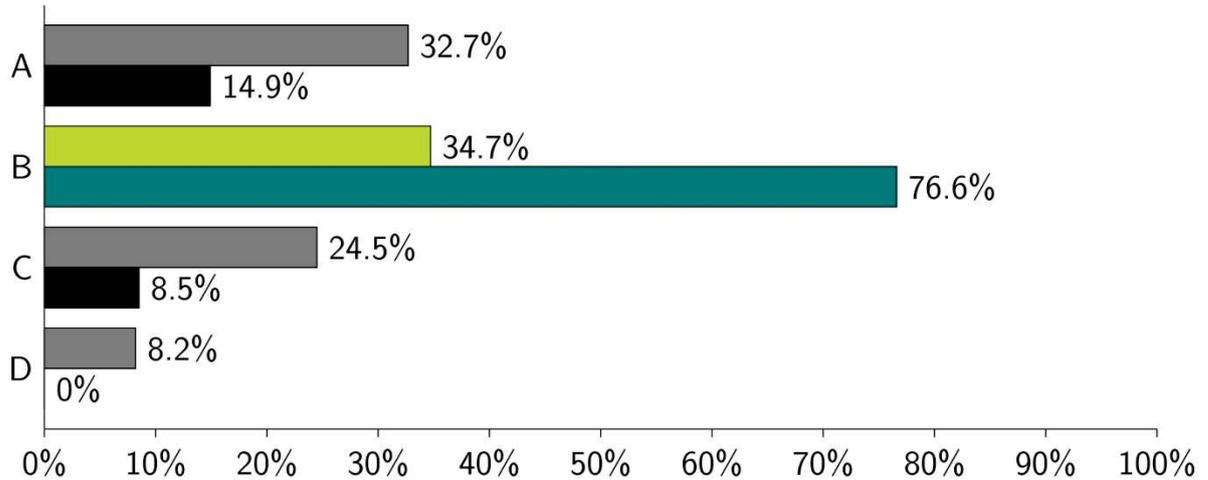
### 6) Qual sistema de unidades serviu de base para o desenvolvimento do SI?

- a) Sistema Métrico Decimal
- b) Sistema Antropométrico Inglês
- c) Sistema Grego de Euclides
- d) Sistema Babilônico



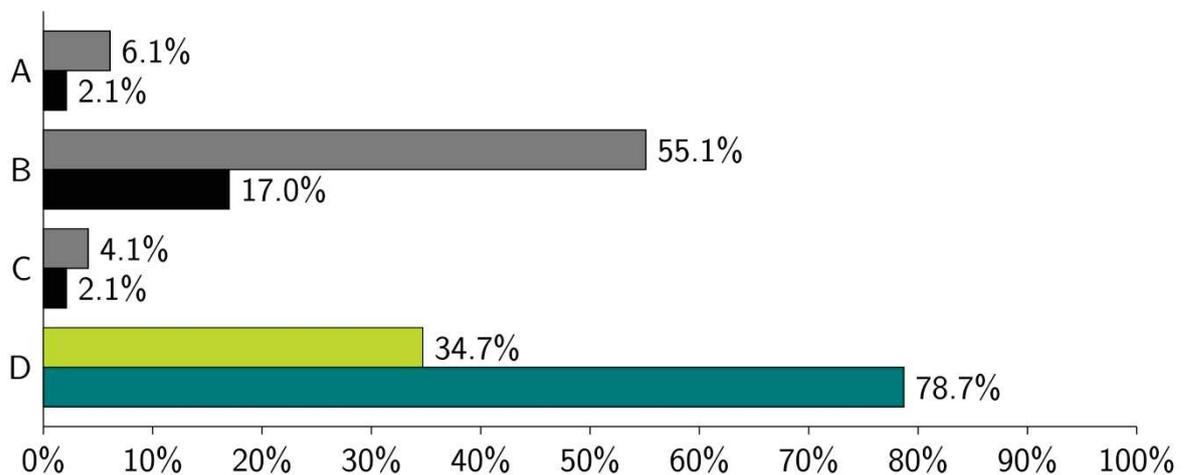
### 7) Qual é a unidade do Sistema Internacional de Unidades (SI) para Intensidade Luminosa?

- a) ampère
- b) candela
- c) tesla
- d) gaussiano



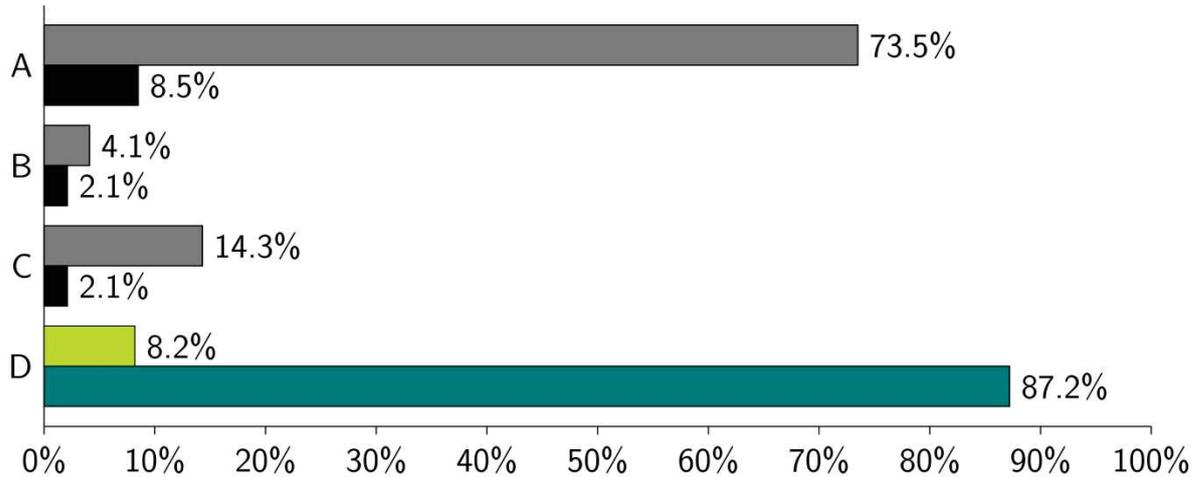
**8) Por que é importante definir a unidade de massa utilizando constantes fundamentais?**

- a) Cumprir apenas a tradição da Royal Society, estabelecida por Sir Isaac Newton.
- b) Padronizar unidades científicas, conforme solicitado por Lord Kelvin.
- c) Garantir que as unidades sejam alteradas apenas por especialistas.
- d) Evitar a dependência de objetos físicos que, por exemplo, possam variar sua massa em função do tempo.



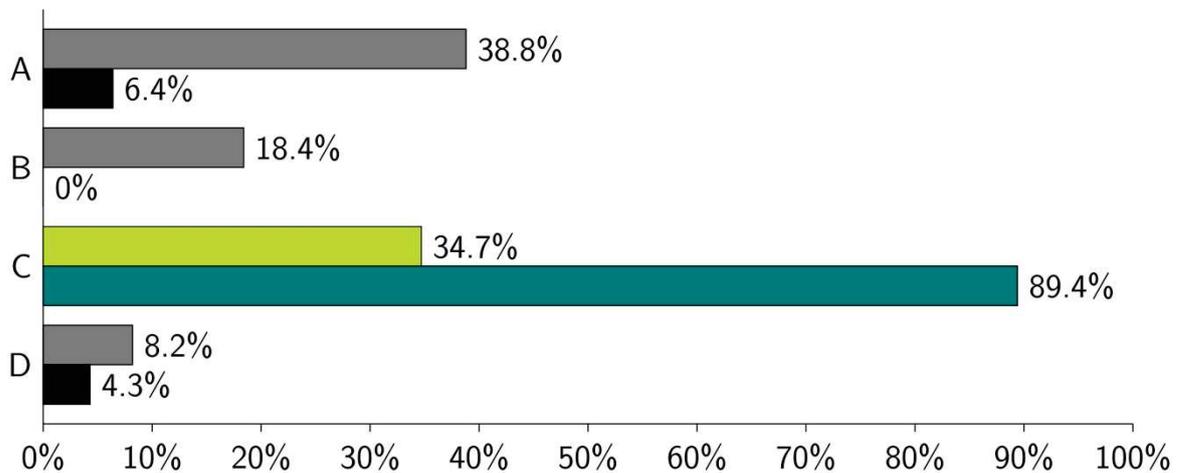
**9) Quais grandezas físicas não fazem parte das grandezas fundamentais do SI?**

- a) Intensidade da corrente elétrica
- b) Massa
- c) Temperatura
- d) Velocidade



**10) O quilograma é a unidade SI para medir massa. Em que se baseia a definição recente do quilograma?**

- a) A massa de um litro de água
- b) A massa de um cilindro específico de platina-irídio
- c) A constante de Planck
- d) A massa de uma barra de ouro padrão

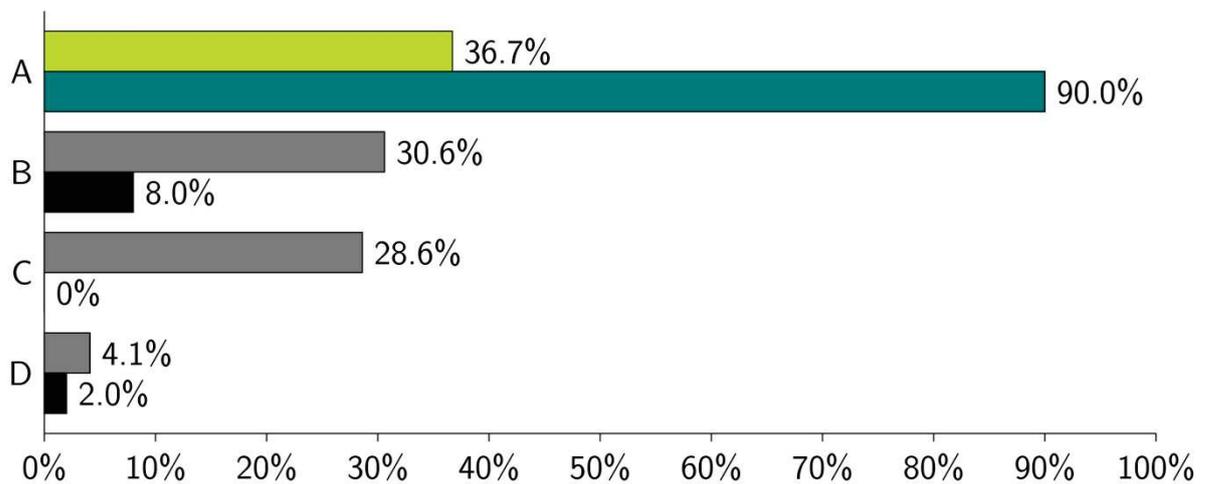


### III. Radiação do Corpo Negro

**11) Qual foi a principal contribuição de Max Planck para a compreensão da radiação do corpo negro e para o surgimento da mecânica quântica?**

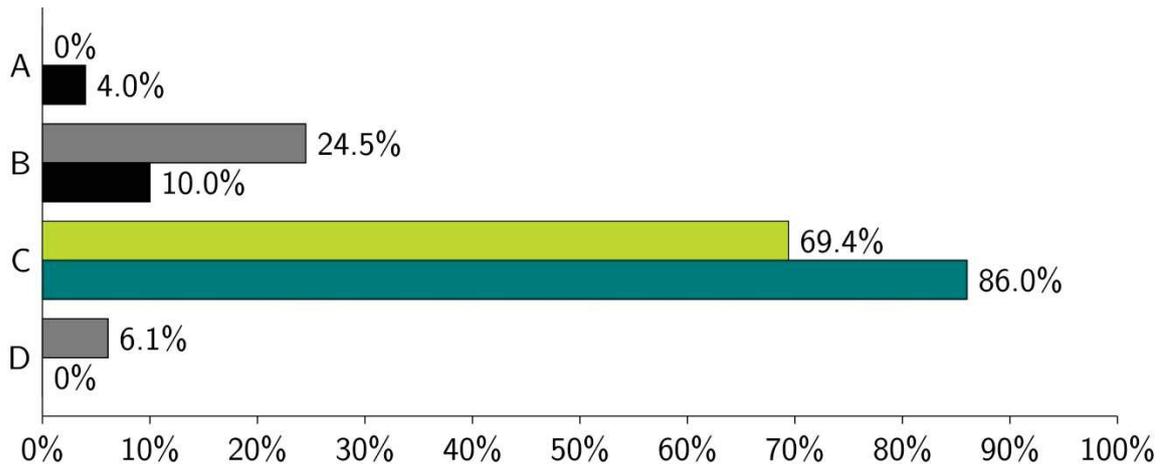
- a) Utilizando conceitos da Termodinâmica, descobriu que uma teoria poderia explicar os dados experimentais se fosse adotado um caráter descontínuo para a energia.

- b) Descobriu, em parceria com Richard Feynman, que a constante cosmológica tem origem na mecânica quântica.
- c) Ele descobriu a dualidade onda-partícula.
- d) Descobriu a constante de estrutura fina, que motivou a descoberta do telégrafo sem fio.



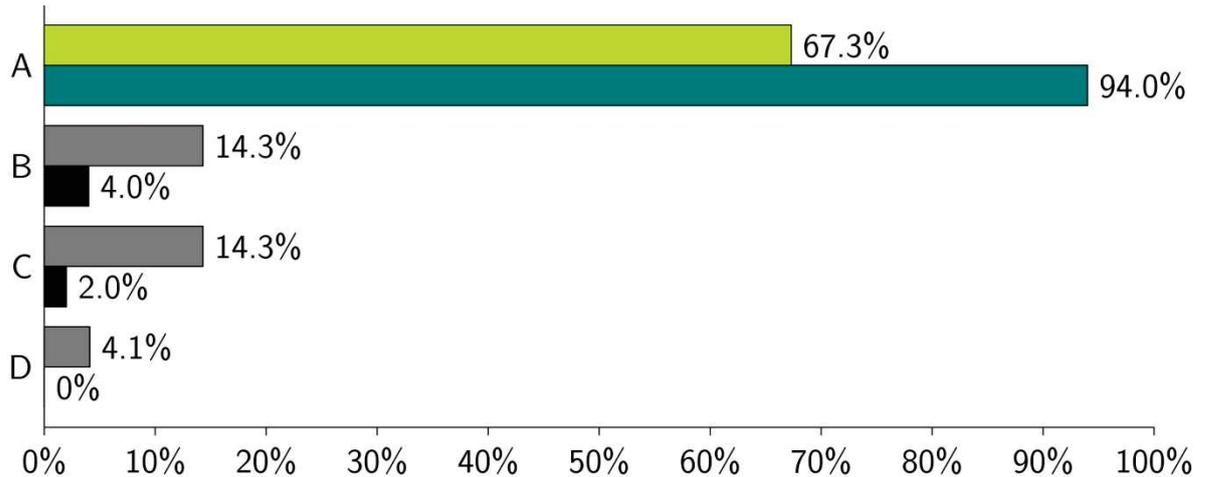
**12) A idéia revolucionária de Planck publicada em 1900, foi imediatamente aceita sem resistência pela comunidade científica?**

- a) Sim, no ano seguinte, em 1901, houve consenso na Sociedade Alemã de Física.
- b) Sim, mas só em 1905, com a publicação do artigo de Einstein explicando o efeito fotoelétrico, Planck obteve pleno reconhecimento.
- c) Não, porque o próprio Planck não estava convencido, e só depois de provas subseqüentes Planck recebeu o Prêmio Nobel de Física por este feito, somente em 1918.
- d) Não, dados os trabalhos de Bohr, Millikan e Compton, as idéias de Planck nunca foram aceitas.



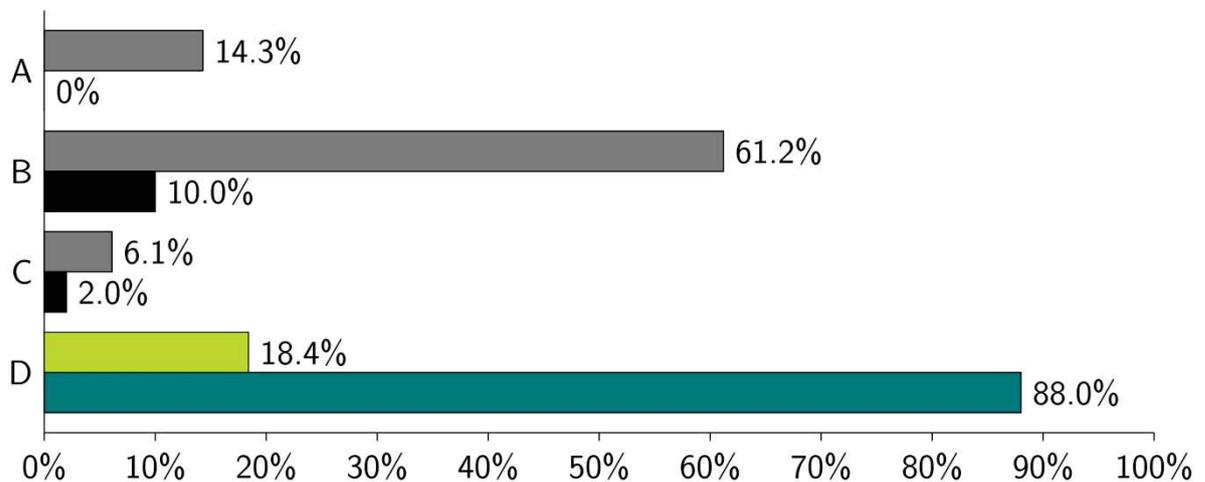
**13) Como as compreensões da radiação do corpo negro e do efeito fotoelétrico levaram ao desenvolvimento de uma nova teoria, a mecânica quântica?**

- a) Planck, em 1900, definiu a idéia de que a energia radiante era quantizada em unidades discretas, que chamou de quanta. Einstein explicou o efeito fotoelétrico em 1905 propondo que a luz também era quantizada em pacotes de energia, que dependem da frequência. Mais tarde, eles foram chamados de fótons.
- b) Tanto a explicação da radiação do corpo negro como o esclarecimento do efeito fotoelétrico dependem exclusivamente das equações de Maxwell.
- c) A radiação do corpo negro e o efeito fotoelétrico não influenciaram o surgimento da mecânica quântica porque suas explicações dependem exclusivamente da Física Clássica.
- d) Apesar dos esclarecimentos sobre a radiação do corpo negro e do efeito fotoelétrico que estabelecem o conceito de quântico, a mecânica quântica teve seu nascimento filosófico com Montesquieu em 1755 e experimental com Sadi Carnot em 1832.



**14) Quem primeiro introduziu o conceito de corpo negro e radiação de corpo negro?**

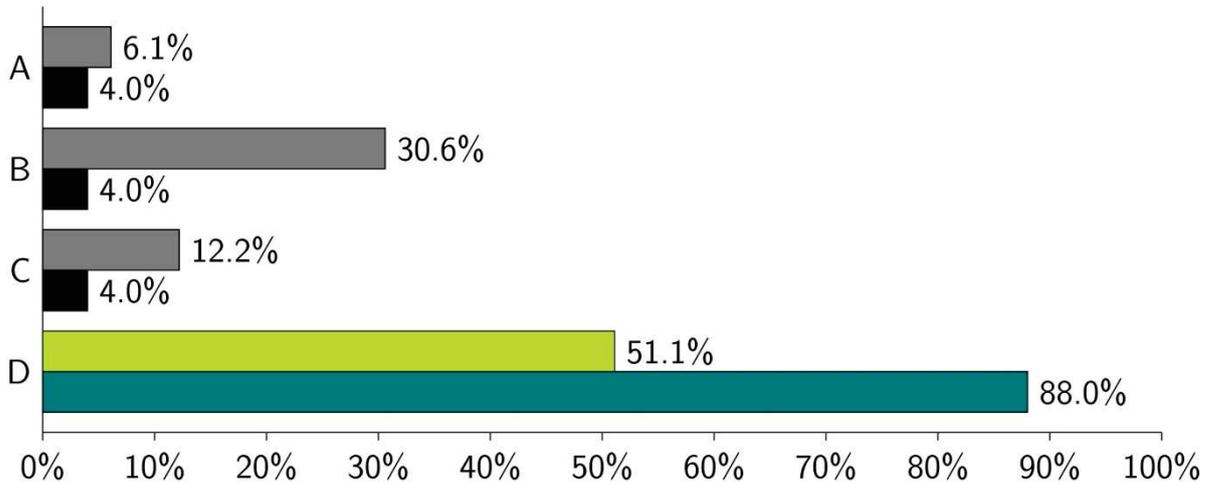
- a) Albert Einstein (1879 – 1955)
- b) Max Planck (1858 – 1947)
- c) Joseph Black (1728 - 1799)
- d) Gustav Kirchhoff (1824 - 1887)



**15) Por que a radiação do corpo negro é importante no campo da astrofísica e da cosmologia?**

- a) Ajuda na produção de fontes de luz artificial.
- b) Explica o comportamento dos buracos negros.
- c) É utilizado no projeto de telescópios espaciais.

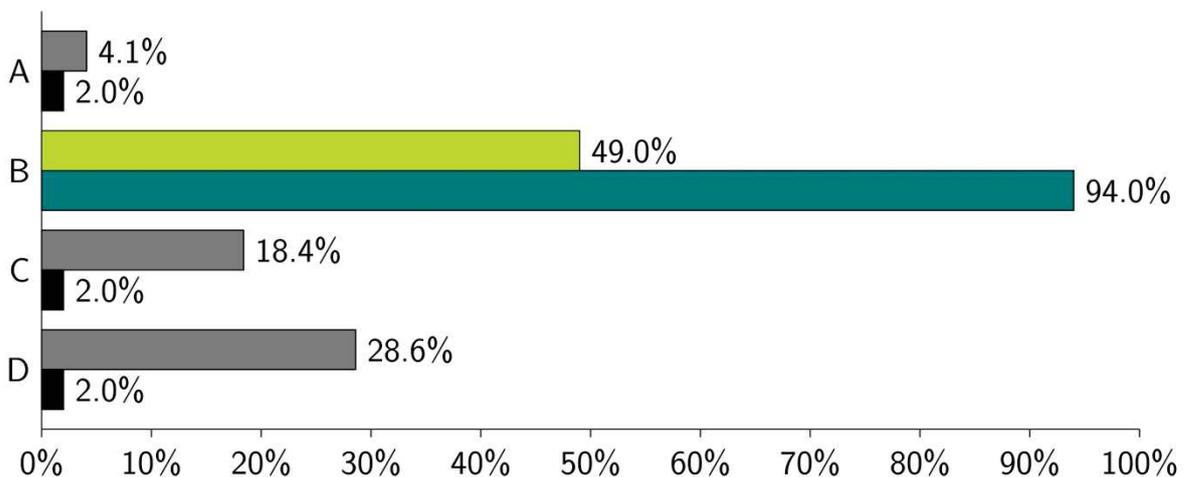
d) Fornece informações sobre a temperatura e composição das estrelas e a radiação cósmica de fundo em micro-ondas.



#### IV. Efeito Fotoelétrico

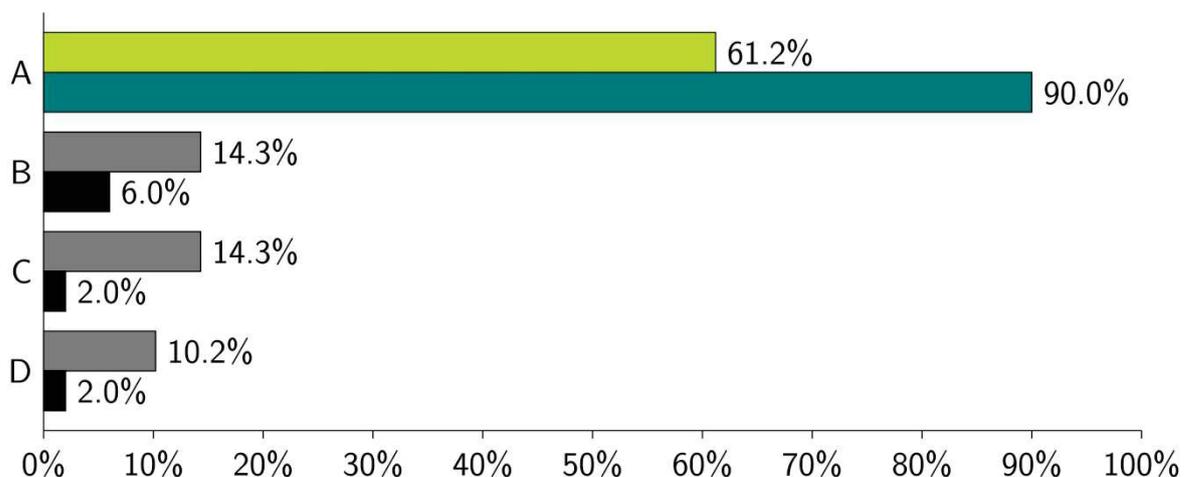
##### **16) O que é o efeito fotoelétrico?**

- a) É o efeito quando os metais submetidos a altas temperaturas adquirem características dielétricas (isolantes).
- b) É a emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando recebe radiação de ondas eletromagnéticas de frequências específicas.
- c) É a absorção de elétrons por determinados materiais quando expostos à luz de qualquer frequência.
- d) É o movimento de elétrons no interior de certos materiais quando exposto à luz de qualquer frequência.



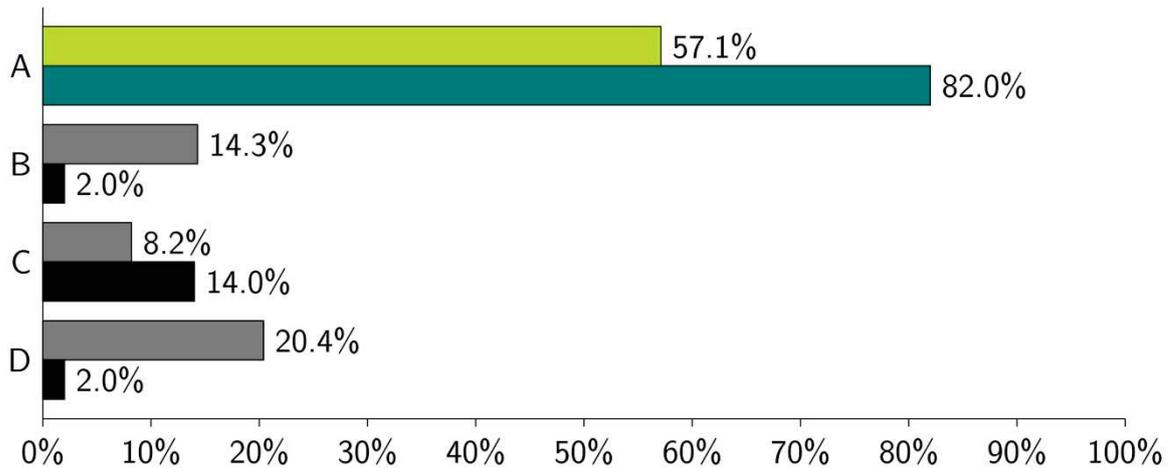
**17) Como Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico usando a teoria quântica da luz?**

- a) Einstein propôs que o feixe de luz incidente sobre um material não é uma onda contínua que se propaga, mas pacotes de ondas discretas (fótons). Elétrons serão emitidos do material se o a "colisão" ocorre com fótons com energia específica (frequência).
- b) A emissão de elétrons de um determinado material, geralmente metais, só acontece quando exposto a alta intensidade luminosa.
- c) Einstein utiliza a equação de Stefan-Boltzmann e conclui que a emissão de elétrons de um determinado material acontecerá se ele for exposto a alguma radiação, mas apenas em temperaturas específicas.
- d) Einstein propôs uma equação que explica a emissão de elétrons dos metais, que depende da massa e da temperatura do material. Nesta equação, a constante e a constante de Boltzmann ganha destaque.



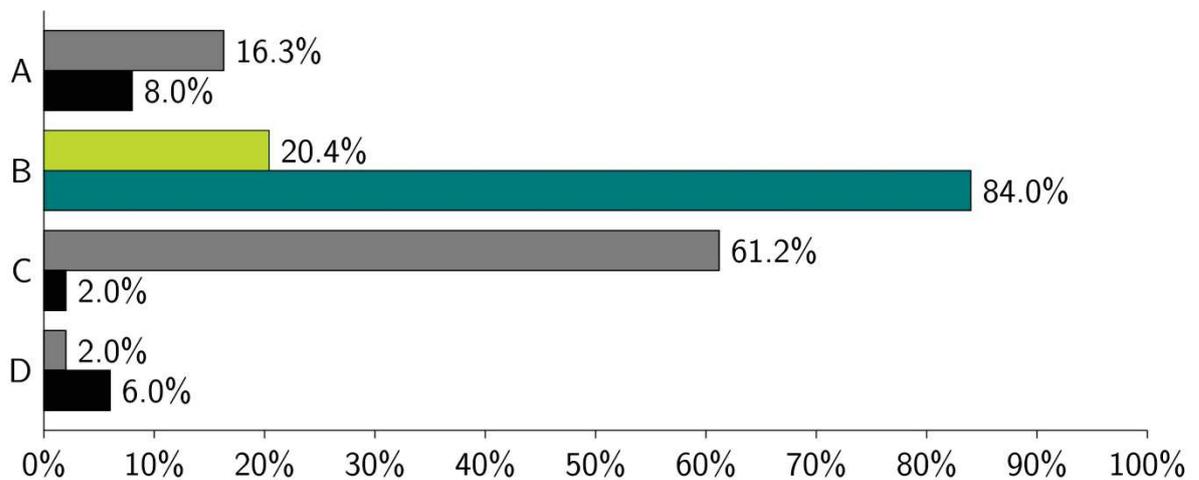
**18) Embora o efeito fotoelétrico tenha sido observado pela primeira vez na segunda metade do século e explicado por Einstein em 1905, quem estabeleceu o termo fóton em 1926?**

- a) Gilbert Lewis
- b) Edmilson Juvêncio
- c) Germán Cano
- d) Paul Dirac



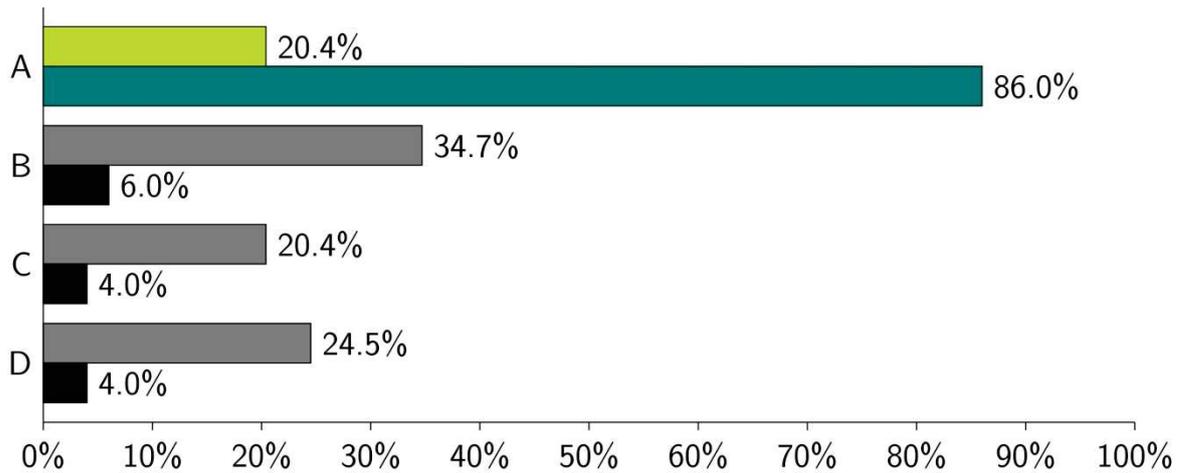
**19) O que é frequência limite no contexto do efeito fotoelétrico?**

- a) A frequência na qual a luz tem a energia mais alta
- b) A frequência mínima de luz necessária para causar o efeito fotoelétrico
- c) A frequência máxima da luz que pode causar o efeito fotoelétrico
- d) A frequência na qual a luz tem a energia mais baixa



**20) Qual é o efeito da intensidade da luz na energia cinética dos elétrons emitidos no efeito fotoelétrico?**

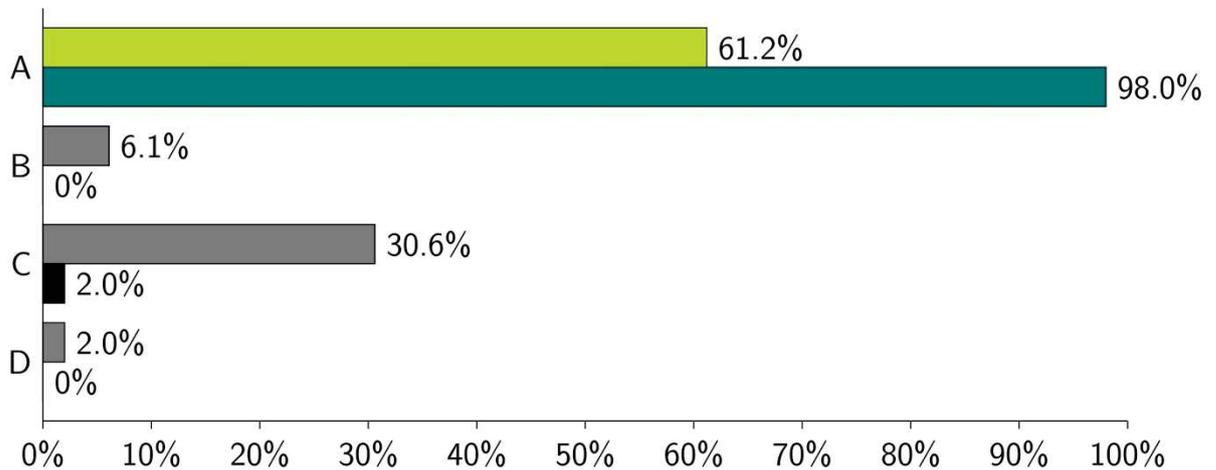
- a) A intensidade da luz não afeta a energia cinética dos elétrons.
- b) Aumentar a intensidade da luz significa aumentar a velocidade dos elétrons.
- c) O aumento da intensidade da luz provoca uma diminuição na velocidade dos elétrons.
- d) Aumentar a intensidade da luz aumenta a frequência dos elétrons emitidos.



#### V. Capacidade Térmica dos sólidos

**21) O calor específico de uma substância pode ser expresso em:**

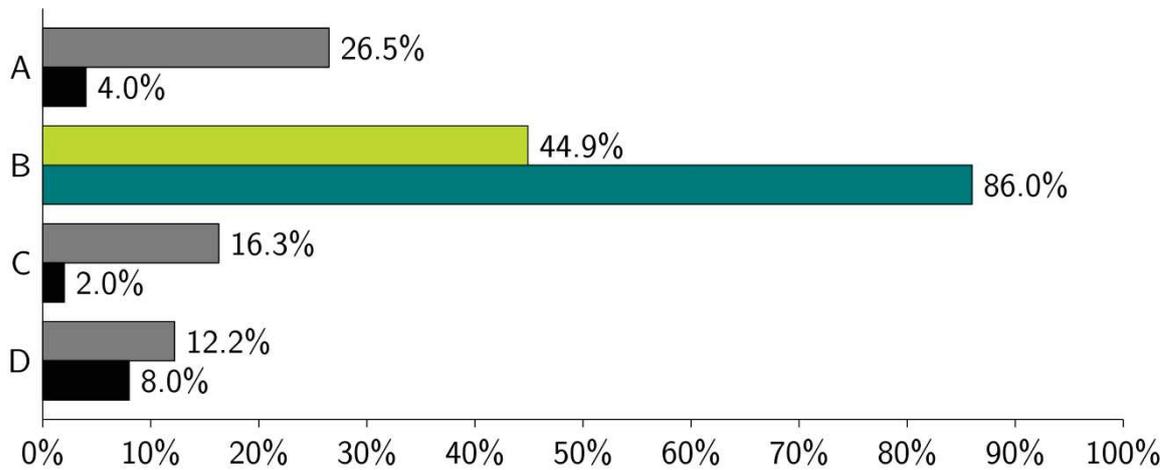
- a) Joules por grama por grau Celsius ( $J/g^{\circ}C$ )
- b) Watts por metro quadrado ( $W/m^2$ )
- c) Calorias por mol ( $cal/mol$ )
- d) Quilogramas por litro ( $kg/L$ )



**22) Se você aquecer igualmente duas substâncias com a mesma massa, mas se uma tiver um calor específico maior que a outra, qual delas sofrerá uma maior mudança de temperatura?**

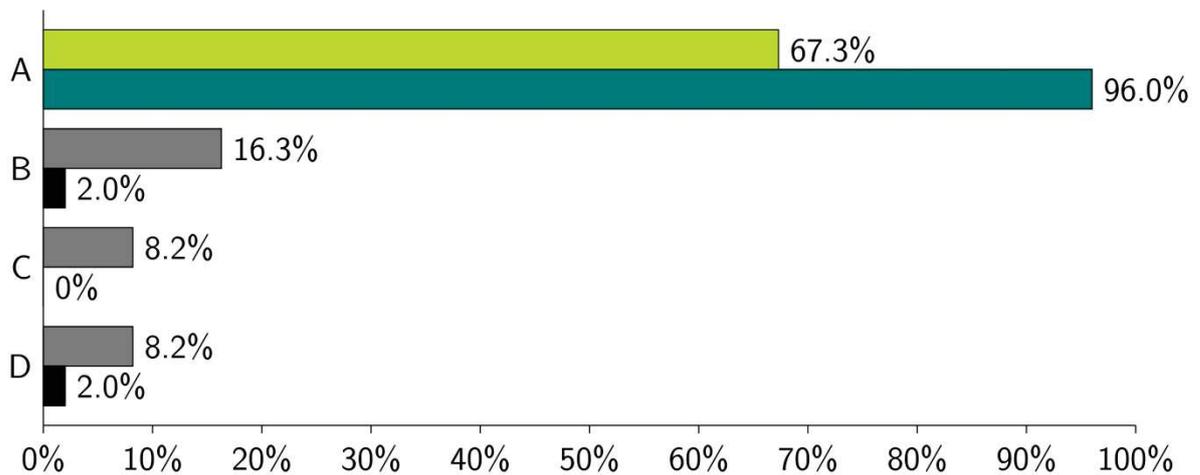
- a) Aquela com maior calor específico
- b) Aquela com menor calor específico

- c) Ambas experimentarão a mesma variação de temperatura  
 d) Depende da temperatura inicial das substâncias



**23) Quando um cubo de gelo a  $-10^{\circ}\text{C}$  é colocado em um copo com água a  $20^{\circ}\text{C}$ , qual substância ganha calor e qual perde calor?**

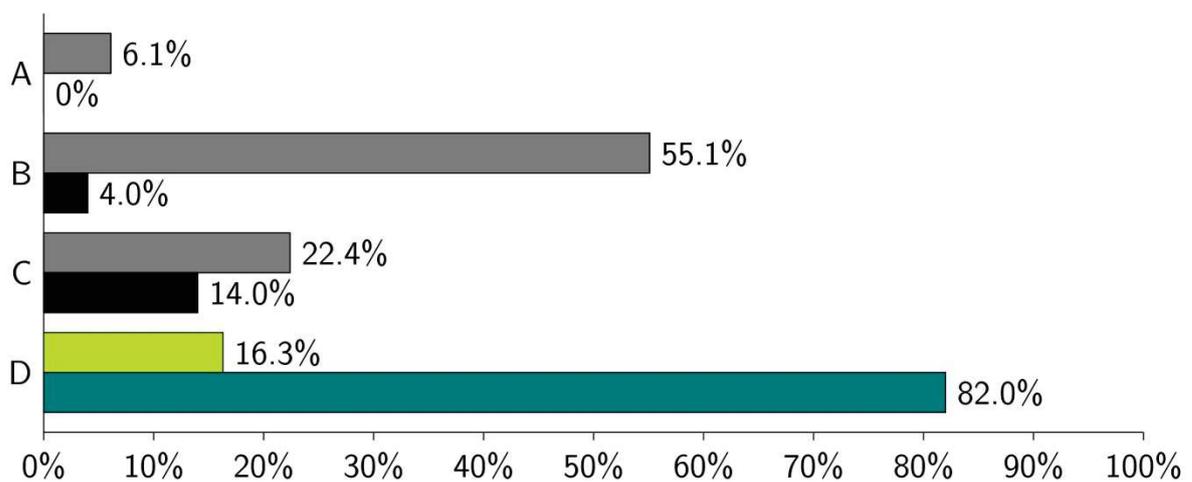
- a) O gelo ganha calor e a água perde calor  
 b) O gelo perde calor e a água ganha calor  
 c) Tanto o gelo quanto a água ganham calor  
 d) Tanto o gelo quanto a água perdem calor



**24) Em 1911, por iniciativa do famoso cientista alemão Walther Nernst (1864-1941) e do apoio financeiro de Ernest Solvay (1838-1922), houve grande encontro que reuniu notáveis acadêmicos na cidade de Bruxelas. Qual foi o**

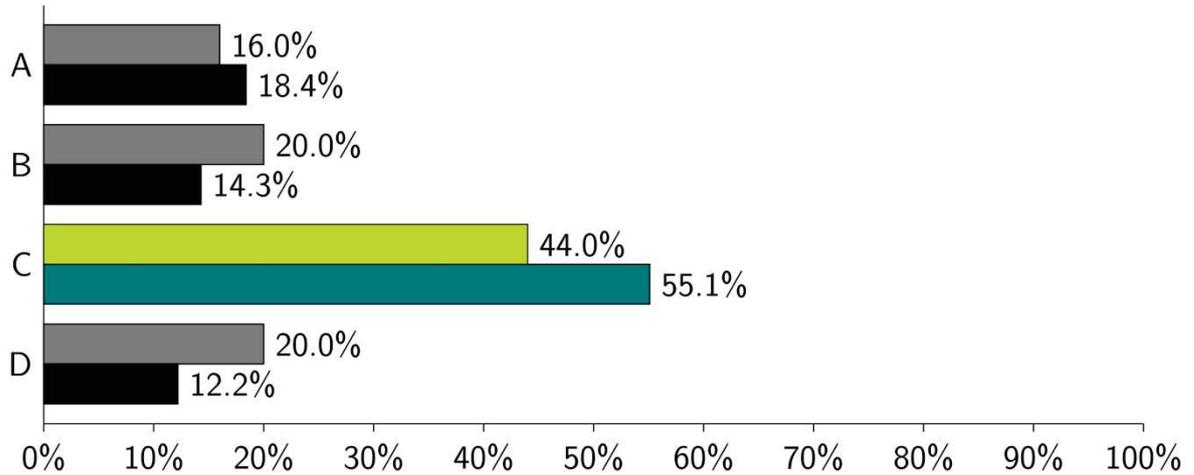
**impacto da apresentação de Einstein neste encontro, chamado de Conferência de Solvay de 1911, para a comunidade científica?**

- a) Ele demonstrou a existência de vida extraterrestre.
- b) Ele propôs a teoria da relatividade restrita e abriu caminho para a teoria da relatividade geral que lhe conferiu o prêmio Nobel de 1921.
- c) Ele trouxe novas idéias sobre a física nuclear e provou quantitativamente que o calor específico dos sólidos é constante para qualquer variação de temperatura.
- d) Ele reforçou a validade da teoria quântica apresentando uma solução para o problema do calor específico dos sólidos.



**25) Qual é o problema do calor específico dos sólidos que foi resolvido por Einstein em 1907?**

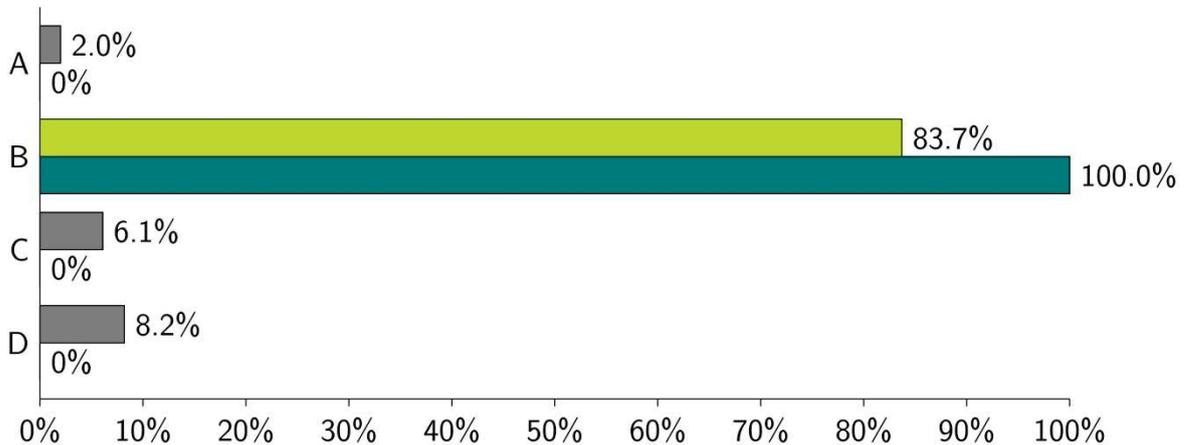
- a) A discrepância entre o calor específico dos sólidos e dos líquidos.
- b) A relação entre a densidade e a condutividade térmica dos sólidos.
- c) A discrepância entre as variações teóricas e experimentais do calor específico dos sólidos.
- d) A relação entre o calor específico e a temperatura dos sólidos.



## VI. Radioatividade

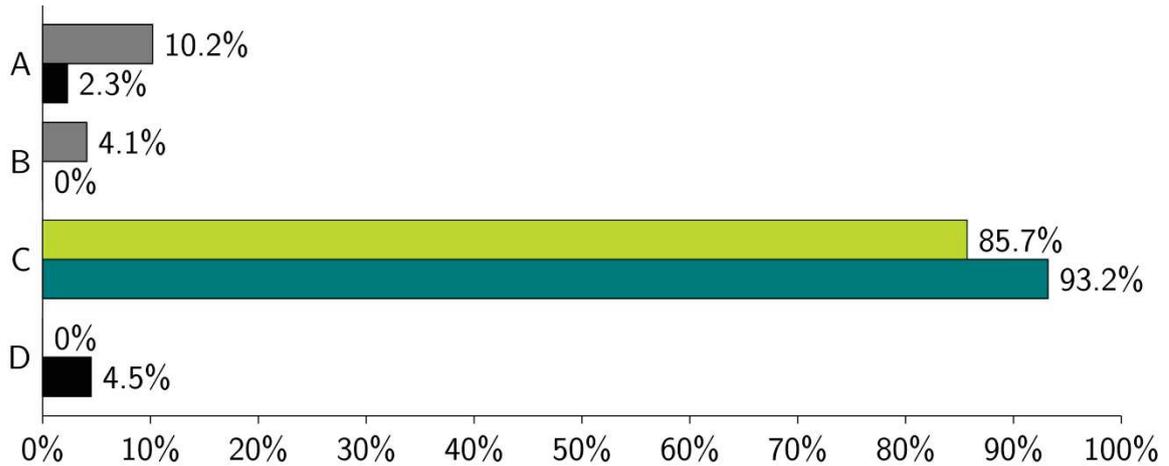
### 26) O que é radioatividade?

- a) A propriedade de qualquer substância de brilhar no escuro.
- b) A propriedade do núcleo de um átomo de emitir partículas ou radiação.
- c) Uma propriedade do átomo de ter alta densidade.
- d) A propriedade de estabilidade de alguns gases monoatômicos.



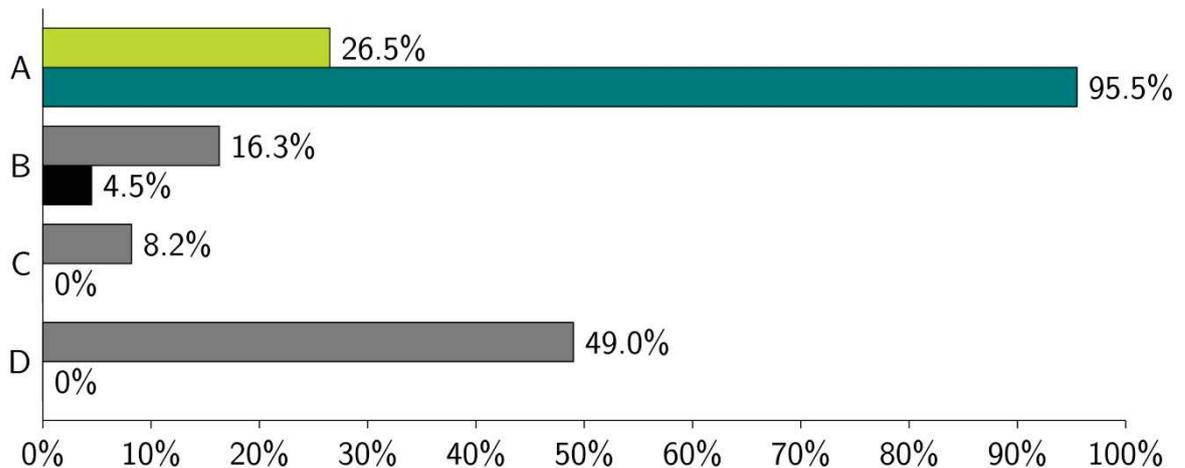
### 27) A meia-vida de um material radioativo é:

- a) O tempo que leva para a radioatividade dobrar.
- b) O tempo que leva para a radioatividade se tornar zero.
- c) O tempo que leva para que a metade de sua massa, por radioatividade, reduza pela metade.
- d) O tempo que leva para a radioatividade aumentar pela metade.



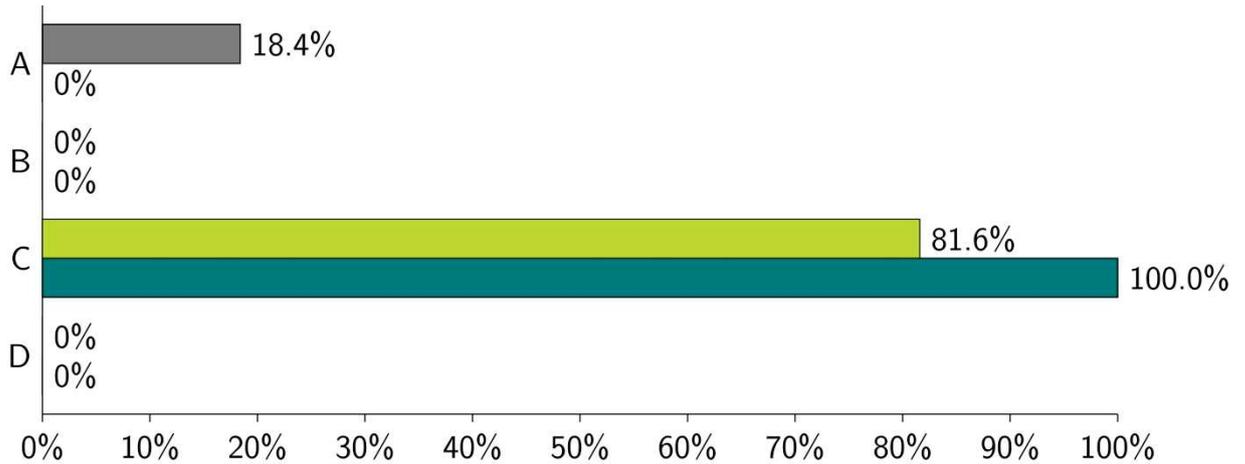
**28) Quem primeiro percebeu a radioatividade em 1896?**

- a) Henri Becquerel (1852-1908)
- b) Wilhelm Rontgen (1845-1923)
- c) Pierre Curie (1859-1906)
- d) Marie Curie (1869-1934)



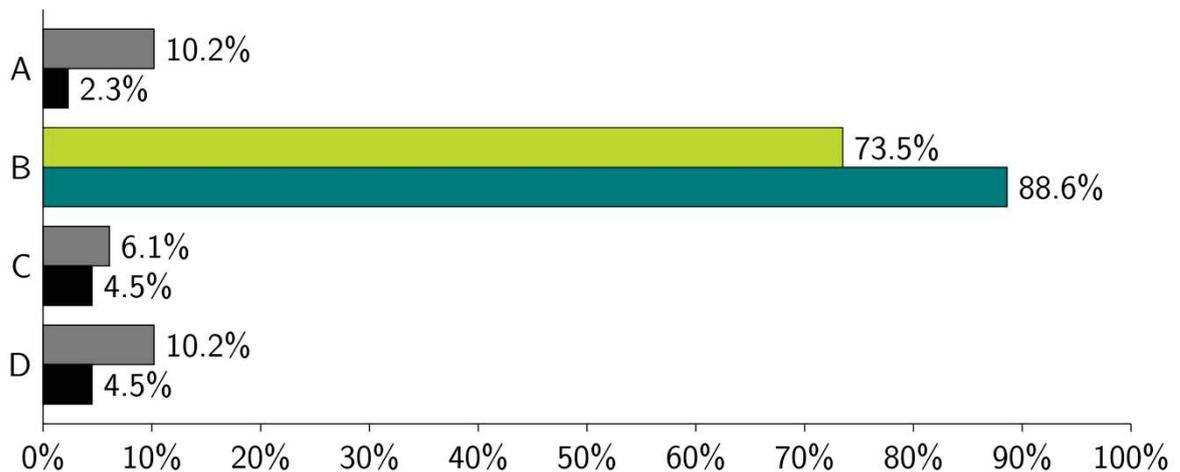
**29) Qual tipo de radiação tem a maior capacidade de penetração e é mais perigosa para os tecidos vivos?**

- a) Radiação alfa
- b) Radiação beta
- c) Radiação gama
- d) Radiação de nêutrons



**30) Como a emissão alfa na radioatividade está relacionada à mecânica quântica?**

- a) A mecânica quântica não está relacionada à emissão alfa.
- b) A mecânica quântica descreve a emissão alfa como o resultado do tunelamento quântico, onde a partícula alfa atravessa uma barreira de potencial.
- c) A mecânica quântica descreve a emissão beta como a emissão de quarks.
- d) A mecânica quântica descreve a emissão alfa como a emissão de fótons.



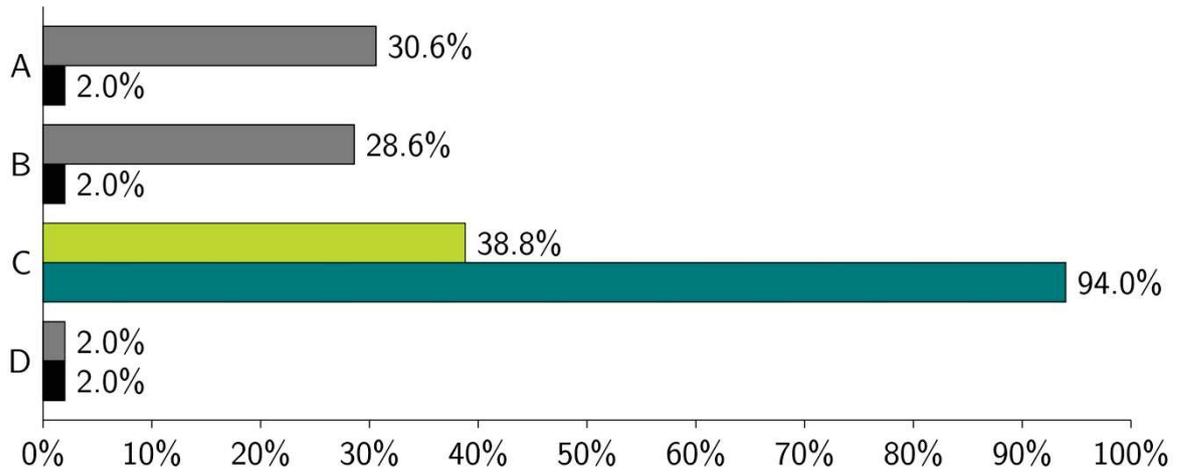
VII. Espectro de Emissão e Absorção

**31) Quem foi o cientista conhecido por seu trabalho sobre espectros atômicos e por criar o primeiro modelo da mecânica quântica do átomo?**

- a) Ernest Rutherford (1871 - 1937)
- b) Max Planck (1858 – 1947)

c) Niels Bohr (1885 – 1962)

d) Albert Einstein (1879 – 1955)



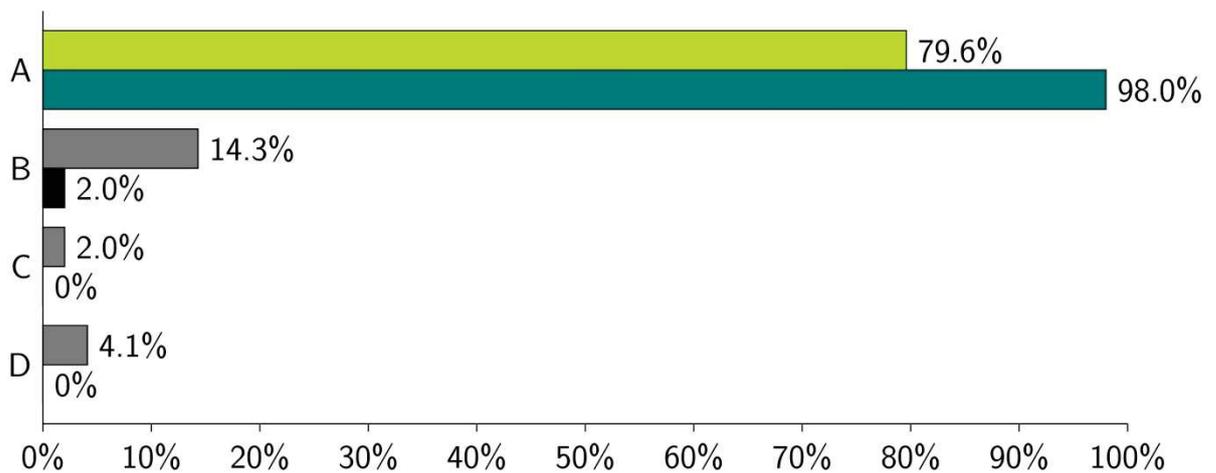
**32) O estudo dos espectros atômicos forneceu evidências valiosas para a compreensão de qual conceito científico?**

a) Mecânica Quântica

b) Indução eletromagnética

c) Relatividade geral

d) Termodinâmica

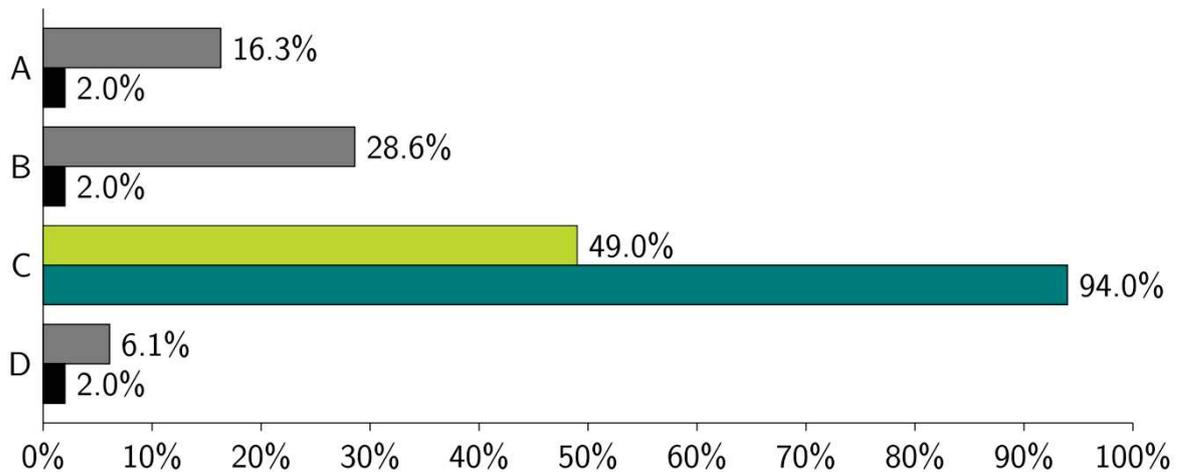


**33) Qual é a principal causa dos espectros de linha observados nos espectros atômicos?**

a) O reflexo da luz

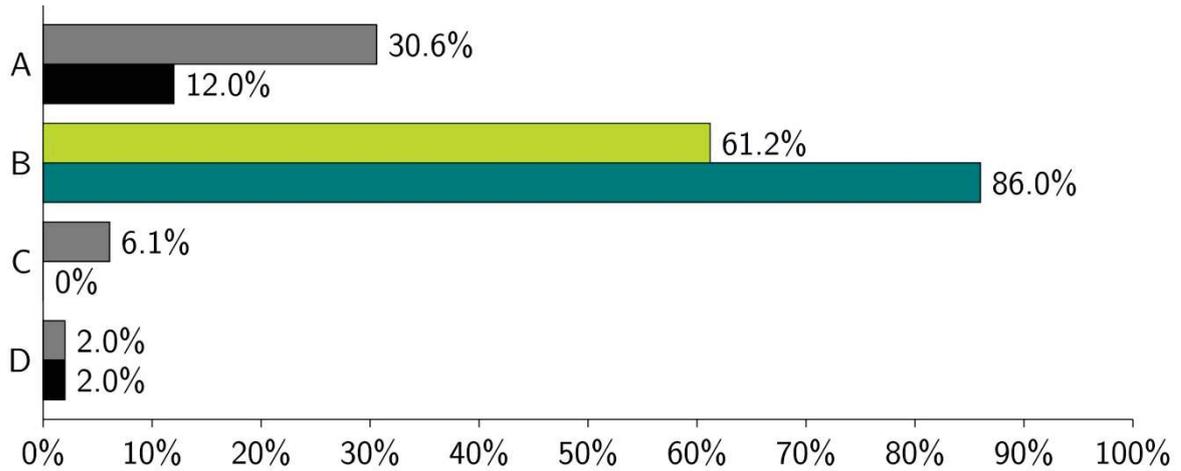
b) A interferência das ondas de luz

- c) A quantização dos níveis de energia no átomo  
 d) O efeito Doppler



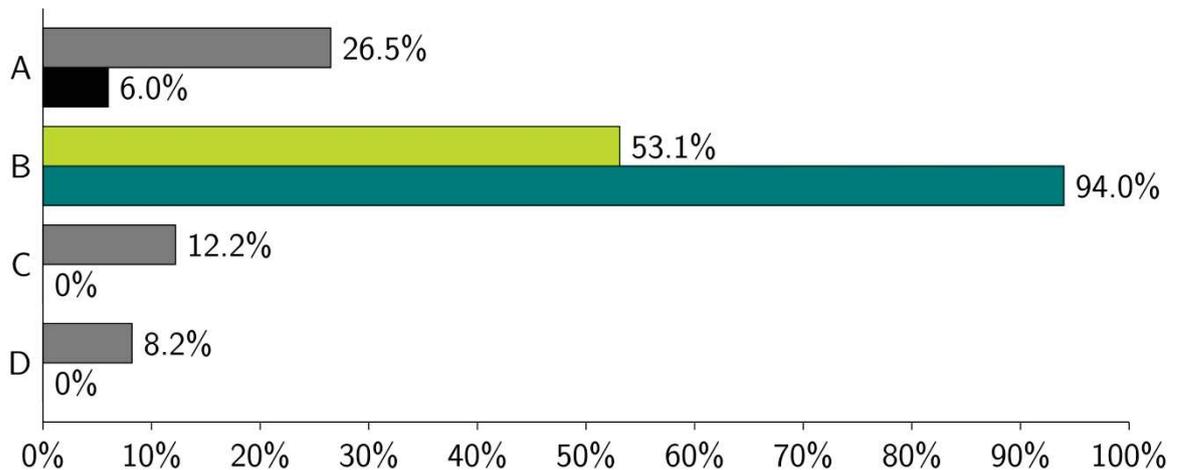
**34) Como o modelo atômico de Bohr difere do modelo clássico de Rutherford?**

- a) O átomo de Rutherford prevê elétrons orbitando em níveis de energia quantizados em torno de um grande núcleo. Bohr estabelece o conceito de átomo que tem seu núcleo orbitado por células aceleradas por elétrons que perdem energia e colapsam neste núcleo
- b) O átomo de Rutherford prevê um pequeno núcleo orbitado por elétrons acelerados que perdem energia e colapsam em espiral com o núcleo. O átomo de Bohr possui elétrons orbitando em níveis quantizados.
- c) A única diferença entre estes dois modelos atômicos é que no átomo de Bohr; o elétron não possui órbita definida, transitando em vários raios orbitais sem alterações energéticas.
- d) Dados os dois modelos atômicos da Física clássica, praticamente não há diferenças. A única diferença evidente é que no modelo de Rutherford o núcleo é maior.



**35) Qual dos seguintes espectros atômicos está associado à transição de elétrons de níveis de energia mais altos para níveis de energia mais baixos?**

- a) Espectro de absorção
- b) Espectro de emissão
- c) Espectro contínuo
- d) Espectro de linha

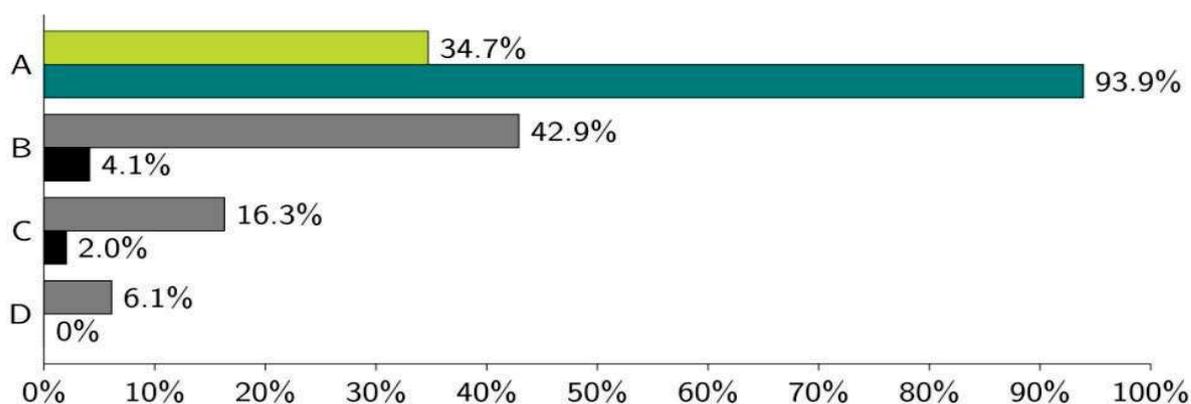


## VIII. A Mecânica Quântica

**36) O que é a dualidade onda-partícula na mecânica quântica?**

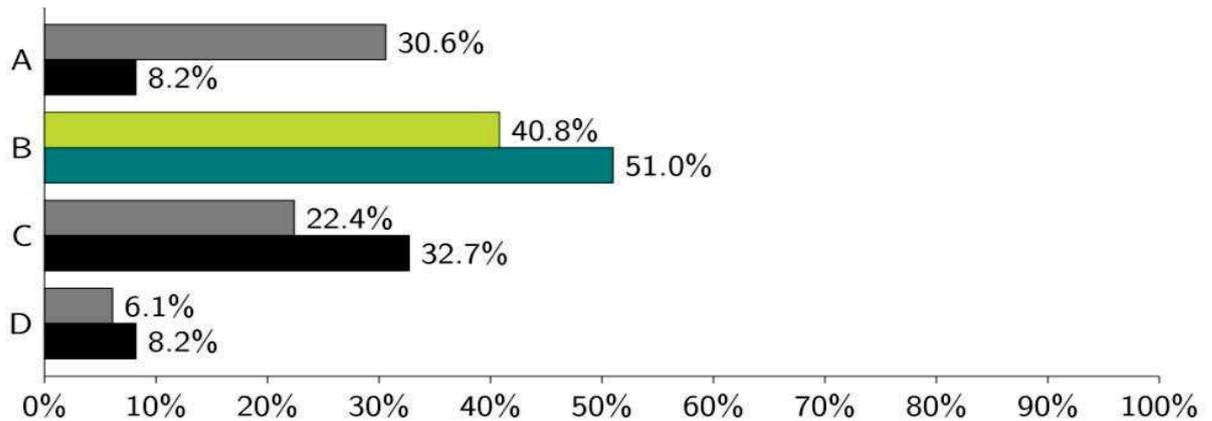
- a) Refere-se à propriedade da luz e dos elétrons de se comportarem ora como partículas, ora como ondas. Esta propriedade foi comprovada com o experimento de difração de elétrons realizado em 1926 por G.P.Thomson.

- b) Disputa sobre a natureza da luz liderada por Newton e Huygens, quando o primeiro afirmou que a luz era uma partícula e o segundo que a luz era uma onda. A experiência de Thomas Young no século 18 resolveu esta dúvida.
- c) Disputa sobre a definição da natureza da luz liderada por Newton e Huygens. O primeiro afirmava que a luz era uma onda e o segundo que a luz era uma partícula. A experiência da dupla fenda de Young no século 18 resolveu a disputa.
- d) É a propriedade física que permite que matéria de qualquer dimensão se comporte visivelmente como uma onda.



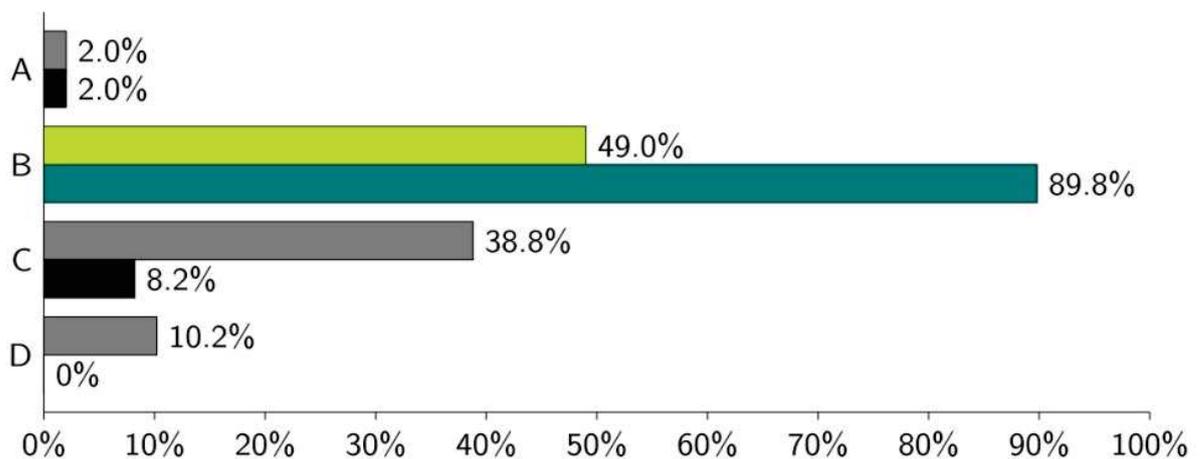
### 37) Qual é a compreensão do determinismo e da previsibilidade na mecânica quântica?

- a) Na mecânica clássica em escala macroscópica e na mecânica quântica em escala microscópica, podemos fazer previsões confiáveis sobre a localização e velocidade das partículas pertencentes a um sistema.
- b) Ao contrário do mundo macro e clássico, no mundo microscópico e quântico, não podemos precisar a localização e a velocidade das partículas.
- c) O Princípio da Incerteza de Heisenberg de 1927 confirma o determinismo e a previsibilidade exatamente como na mecânica clássica.
- d) As equações cinemáticas clássicas podem fazer previsões simultâneas de localização e velocidade dos elétrons.



**38) Qual experimento demonstrou que a luz (radiação eletromagnética) interage com partículas carregadas como elétrons, demonstrando que também pode se comportar como partículas (fótons) apoiando a idéia da dualidade onda-partícula da luz da mecânica quântica?**

- a) Experiência de queda de óleo de Millikan
- b) Experimento de Dispersão Compton
- c) Experimento da Folha de Ouro de Rutherford
- d) Experimento Edmilson-Tiquinho

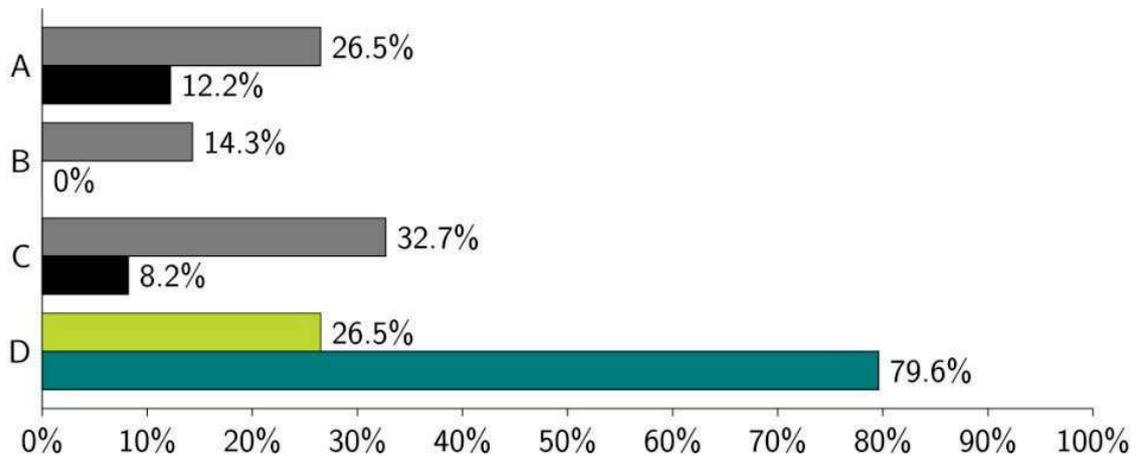


**39) Qual cientista é conhecido por seu trabalho sobre a dualidade onda-partícula dos elétrons, demonstrando que eles exibem comportamento tanto de onda quanto de partícula?**

- a) Max Planck (1858 – 1947)
- b) Albert Einstein (1879 – 1955)

c) Niels Bohr (1885 – 1962)

d) Louis de Broglie (1892 – 1987)



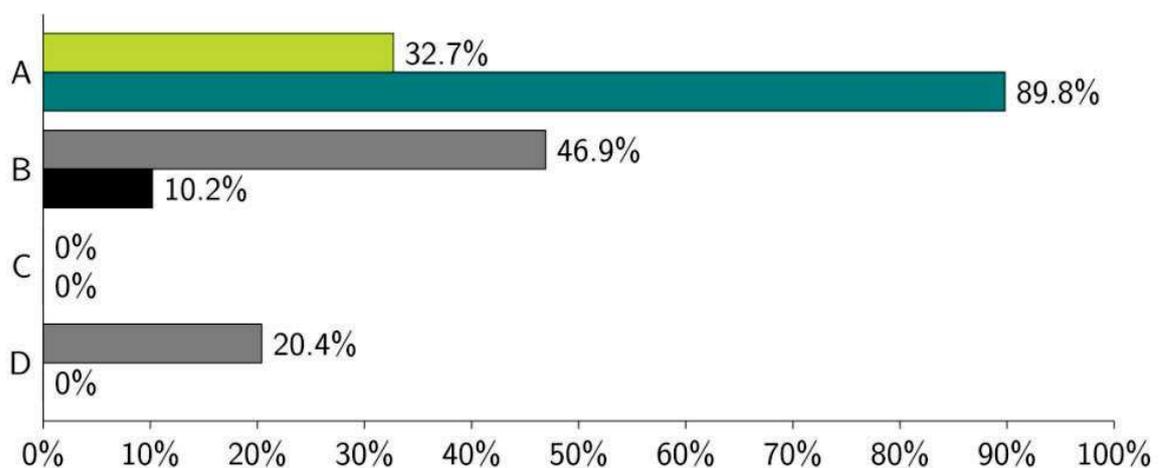
**40) Quais dispositivos tecnológicos ou aplicações abaixo dependem dos princípios da mecânica quântica?**

a) célula fotovoltaica, LED, termômetro de testa, smartphone.

b) laser, ressonância magnética, sensor de presença e telégrafo sem fio.

c) máquina a vapor, chip, leitores ópticos, telescópios

d) microscópios, computadores, equipamentos de raios X e aspiradores de pó.



Com o objetivo de analisar os percentuais de acertos deste questionário, antes e depois da apresentação da Sequência Didática, seguimos as seguintes etapas:

- 1) Calculamos o percentual de respostas corretas para cada pergunta **antes** das aulas. Por exemplo, na primeira pergunta do Quis 0, 24,5% de alunos responderam corretamente.
- 2) Calculamos o percentual de respostas corretas para cada pergunta **depois** das aulas. Por exemplo, na primeira pergunta do Quis 0, 79,2% de alunos responderam corretamente, isto significa que houve uma melhora no entendimento dos alunos ao tópico apresentado na Sequência didática em + 54,7%.
- 3) Este procedimento foi repetido, contemplando as 40 perguntas do Quiz 0, que objetivava a percepção de conhecimentos prévios dos alunos.
- 4) Com estes dados, construímos a tabela 2 abaixo:

Tabela 4 - Evolução nos acertos no primeiro Questionário, antes e depois das aulas

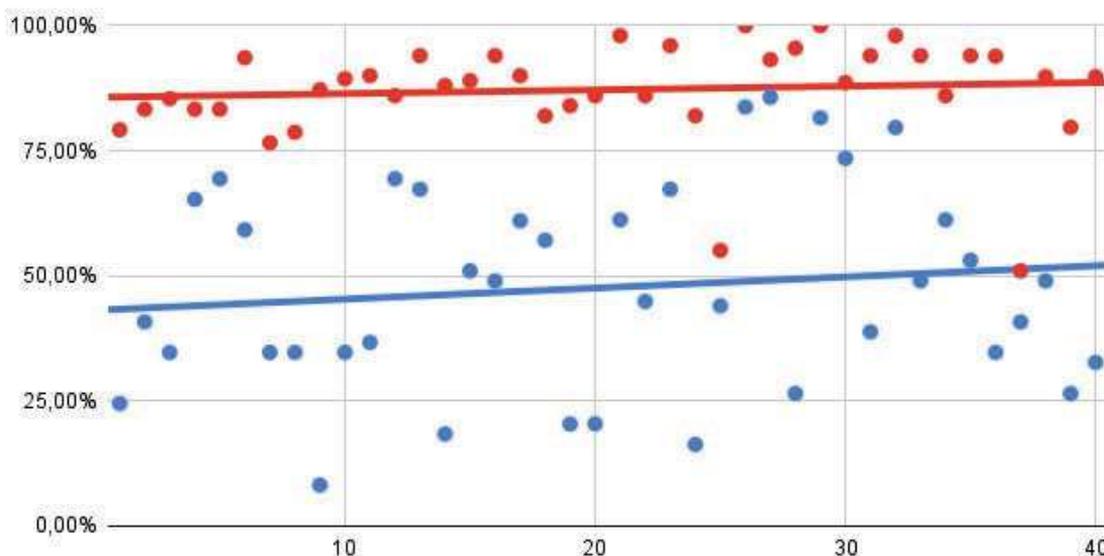
<b>Quiz 0</b>							
<b>Nº de ordem</b>	<b>Acertos antes da aula</b>	<b>Acertos após a aula</b>	<b><math>\Delta\%</math></b>	<b>Nº de ordem</b>	<b>Acertos antes da aula</b>	<b>Acertos após a aula</b>	<b><math>\Delta\%</math></b>
<b>1</b>	24,5%	79,2%	+ 54,7%	<b>21</b>	61,2%	98,0%	+36,8%
<b>2</b>	40,8%	83,3%	+ 42,5%	<b>22</b>	44,9%	86,0%	+ 41,1%
<b>3</b>	34,7%	85,4%	+ 50,7%	<b>23</b>	67,3%	96,0%	+ 28,7%
<b>4</b>	65,3%	83,3%	+18,0%	<b>24</b>	16,3%	82,0%	+ 65,7%
<b>5</b>	69,4%	83,3%	+13,9%	<b>25</b>	44,0%	55,1%	+11,1%
<b>6</b>	59,2%	93,6%	+34,4%	<b>26</b>	83,7%	100,0%	+ 16,3%
<b>7</b>	34,7%	76,6%	+41,9%	<b>27</b>	85,7%	93,2%	+ 7,5%
<b>8</b>	34,7%	78,7%	+44,0%	<b>28</b>	26,5%	95,5%	+ 69,0%

<b>9</b>	8,2%	87,2%	+79,0%	<b>29</b>	81,6%	100,0%	+ 18,4%
<b>10</b>	34,7%	89,4%	+54,7%	<b>30</b>	73,5%	88,6%	+ 15,1%
<b>11</b>	36,7%	90,0%	+53,3%	<b>31</b>	38,8%	94,0%	+ 55,2%
<b>12</b>	69,4%	86,0%	+16,6%	<b>32</b>	79,6%	98,0%	+ 18,4%
<b>13</b>	67,3%	94,0%	+26,7%	<b>33</b>	49,0%	94,0%	+ 45,0%
<b>14</b>	18,4%	88,0%	+69,6%	<b>34</b>	61,2%	86,0%	+ 24,8%
<b>15</b>	51,1%	88,0%	+36,9%	<b>35</b>	53,1%	94,0%	+ 40,9%
<b>16</b>	49,0%	94,0%	+45,0%	<b>36</b>	34,7%	93,9%	+ 59,2%
<b>17</b>	61,2%	90,0%	+28,8%	<b>37</b>	40,8%	51,0%	+ 10,2%
<b>18</b>	57,1%	82,0%	+24,9%	<b>38</b>	49,0%	89,8%	+ 40,8%
<b>19</b>	20,4%	84,0%	+63,6%	<b>39</b>	26,5%	79,6%	+ 53,1%
<b>20</b>	20,4%	86,0%	+65,6%	<b>40</b>	32,7%	89,8%	+ 57,1%

Fonte: O autor

A tabela 4 acima consubstancia a construção do gráfico 13 abaixo, onde os pontos azuis indicam o percentual de acertos dos alunos, antes das aulas e os pontos vermelhos traduzem os acertos depois das aulas. No eixo horizontal temos de 1 a 40, as perguntas efetuadas antes e depois da aplicação da Sequência Didática, na ordem em foram apresentadas aos alunos. No eixo vertical temos percentuais de acertos às perguntas do eixo horizontal. Conclui-se que pelas dispersões e linhas de tendências, azul e vermelha, podemos inferir a ocorrência de aprendizagem dos assuntos propostos na Sequência Didática.

Gráfico 13 - Percentual de acertos antes e depois das aulas



Fonte: O autor

Em um segundo momento, as 40 perguntas não foram colocadas em uma ordem em que foram apresentadas aos alunos, e sim em uma ordem decrescente de melhoria de percentual de acertos, em relação ao antes e depois das aulas ministradas. Assim, foi construída a tabela 3 abaixo:

Tabela 5 - Evolução das melhorias nos percentuais de acertos

<b>Nº de ordem</b>	<b>Nº da pergunta</b>	<b>Percentual de acertos - antes</b>	<b>Percentual de acertos - depois</b>	<b>Diferença no percentual de acertos</b>
<b>1</b>	<b>9</b>	8,20%	87,20%	79,00%
<b>2</b>	<b>14</b>	18,40%	88,05%	69,65%
<b>3</b>	<b>28</b>	26,50%	95,50%	69,00%
<b>4</b>	<b>24</b>	16,30%	82,00%	65,70%
<b>5</b>	<b>20</b>	20,45%	86,00%	65,55%
<b>6</b>	<b>19</b>	20,40%	84,00%	63,60%
<b>7</b>	<b>36</b>	34,70%	93,90%	59,20%
<b>8</b>	<b>40</b>	32,70%	89,80%	57,10%
<b>9</b>	<b>31</b>	38,80%	94,00%	55,20%
<b>10</b>	<b>1</b>	24,50%	79,20%	54,70%
<b>11</b>	<b>10</b>	34,70%	89,40%	54,70%
<b>12</b>	<b>11</b>	36,70%	90,00%	53,30%

13	39	26,50%	79,69%	53,19%
14	3	34,70%	85,40%	50,70%
15	16	49,00%	94,00%	45,00%
16	33	49,00%	94,00%	45,00%
17	8	34,70%	78,70%	44,00%
18	2	40,80%	83,30%	42,50%
19	7	34,70%	76,60%	41,90%
20	22	44,90%	86,00%	41,10%
21	35	53,10%	94,00%	40,90%
22	38	49,00%	89,80%	40,80%
23	15	51,00%	89,00%	38,00%
24	21	61,20%	98,00%	36,80%
25	6	59,20%	93,60%	34,40%
26	17	61,00%	90,00%	29,00%
27	23	67,30%	96,00%	28,70%
28	13	67,30%	94,00%	26,70%
29	18	57,10%	82,00%	24,90%
30	34	61,20%	86,00%	24,80%
31	29	81,60%	100,00%	18,40%
32	32	79,65%	98,00%	18,35%
33	4	65,30%	83,30%	18,00%
34	12	69,40%	86,00%	16,60%
35	26	83,75%	100,00%	16,25%
36	30	73,50%	88,60%	15,10%
37	5	69,40%	83,30%	13,90%
38	25	<b>44,00%</b>	<b>55,10%</b>	11,10%
39	37	<b>40,80%</b>	<b>51,00%</b>	10,20%
40	27	85,70%	93,20%	7,50%

Fonte: O autor

Continuando a seguir a sequência de etapas, temos:

5) Para se construir o segundo gráfico, primeiramente colocamos os percentuais de acertos **antes de aula**, em ordem crescente. Isto vai proporcionar uma linha de tendência crescente. Todos os pontos que representam as respostas antes da aula

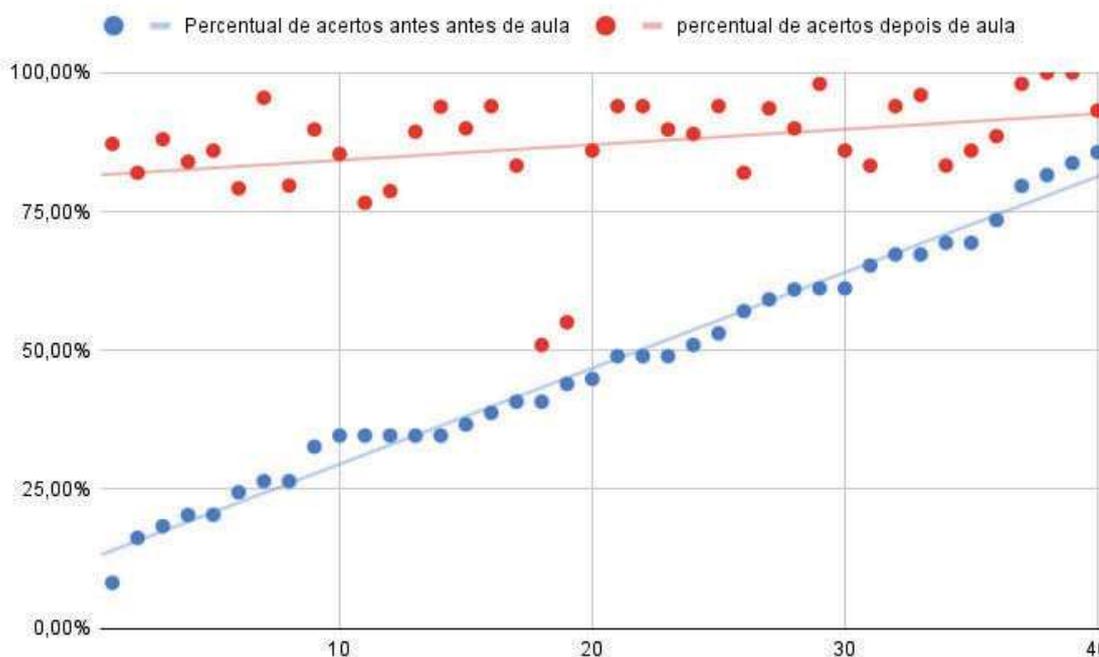
apresentadas, estão na cor azul. Por exemplo, o primeiro ponto registrado no gráfico equivale à pergunta 9 que possui o menor percentual de acerto das 40 perguntas do Quis 0, ou seja, 8,20%. O último ponto, que equivale à pergunta 27, corresponde à 85,70%, que.

6) Plotamos percentuais de acertos dos alunos **depois da aula**, para as perguntas na mesma ordem apresentada na etapa cinco. Todos os pontos que representam as respostas depois das aulas apresentadas estão na cor vermelha. Por exemplo, o primeiro ponto que correspondente à pergunta 9, tem o percentual de acertos de 87,20% após a aula com melhora de **79,00%** em relação ao percentual antes da aula, que fora 8,20%. O último ponto, que corresponde à pergunta 27, teve 93,20% de acertos depois da respectiva aula, mas em face do percentual de acertos antes ter sido de 85,70%, houve um crescimento de apenas **7, 50%**.

7) Assim, verificamos que o espectro de melhora de percentuais de acertos tem o limite inferior de 7,50% equivalente a pergunta 9 e o limite superior de 79,0%, equivalente à pergunta 27.

8) Quando colocamos as perguntas do mesmo Quiz 0, não na ordem em que foram apresentadas e sim em ordem decrescente de melhora de percentual de acertos, antes e depois das oito aulas ministradas, temos o gráfico xx abaixo:

Gráfico 14 - Gráfico da distribuição da melhoria nos percentuais de acertos



Fonte: O autor

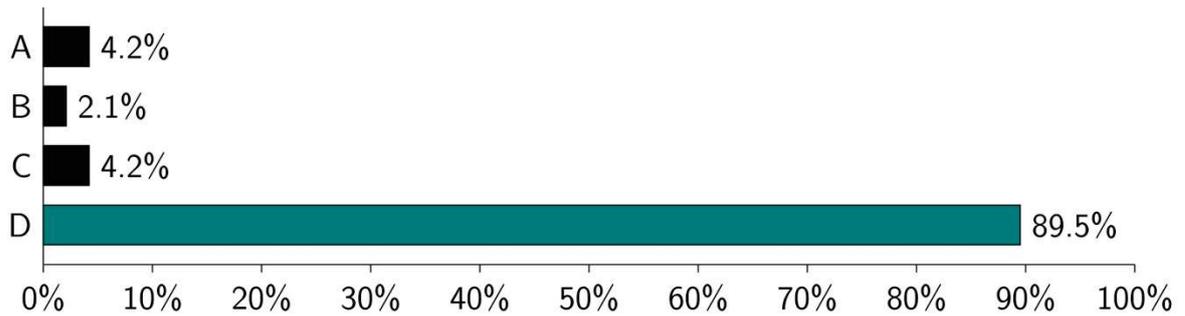
Do exposto nas tabelas e gráficos, pode-se concluir que nestas primeiras 40 perguntas, houve êxito na quando da apresentação dos conteúdos da Sequência Didática presente no segundo segmento do Produto Educacional.

Agora segue uma apresentação dos resultados de outras 40 perguntas, 5 de cada aula, todas aplicadas somente depois da Sequência Didática ministrada aos alunos. Ao final é apresentada uma tabela com todos os percentuais de acertos obtidos pelos mesmos.

### Quiz 1- Contexto Histórico da Física Quântica (perguntas 1 a 5 estão no Quiz 0)

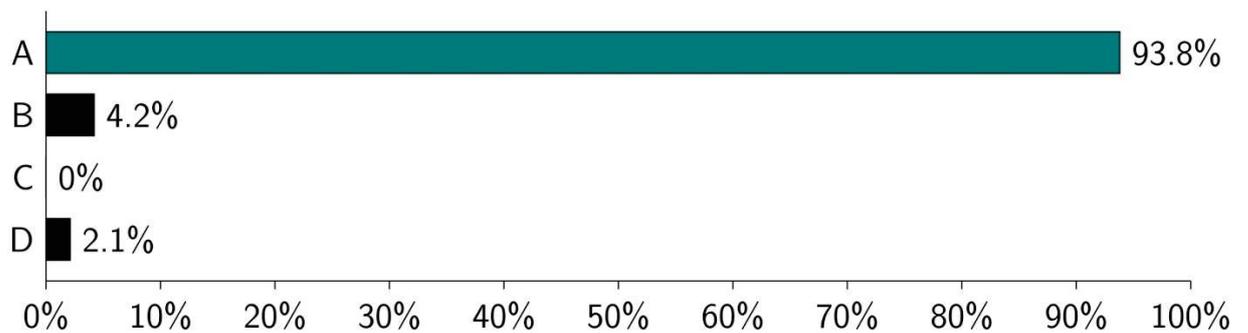
#### 6) Quem é o cientista considerado o pai da mecânica quântica?

- a) Isaac Newton (1642 – 1727)
- b) Albert Einstein (1879 – 1955)
- c) Ludwig Boltzmann (1844 – 1906)
- d) Max Planck (1858 – 1947)



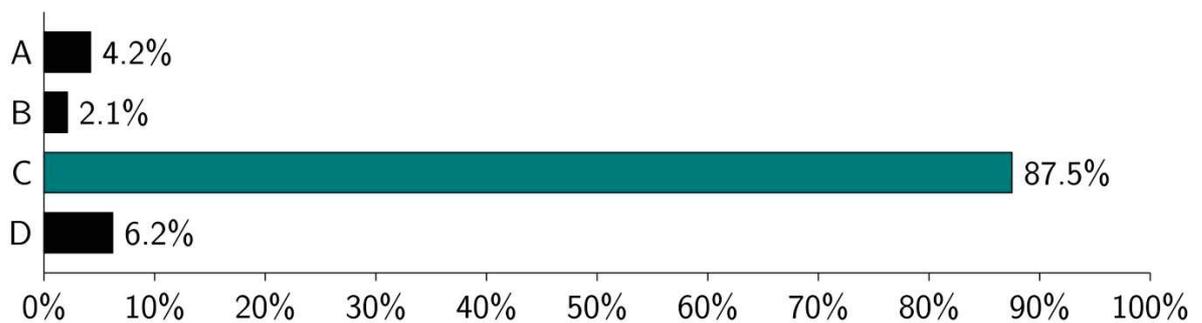
**7) A quem é atribuída a descoberta dos raios catódicos?**

- a) Julius Plücker (1801 – 1868)
- b) J.J. Thompson (1856 – 1940)
- c) Wilhelm Roentgen (1845 -1923)
- d) Robert Millikan (1868 – 1953)



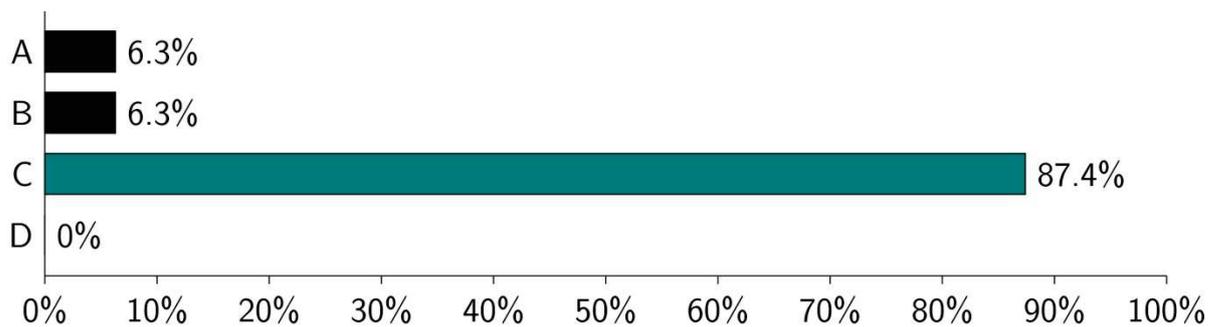
**8) Qual é a carga de um elétron?**

- a) Positivo
- b) Neutro
- c) Negativo
- d) Variável



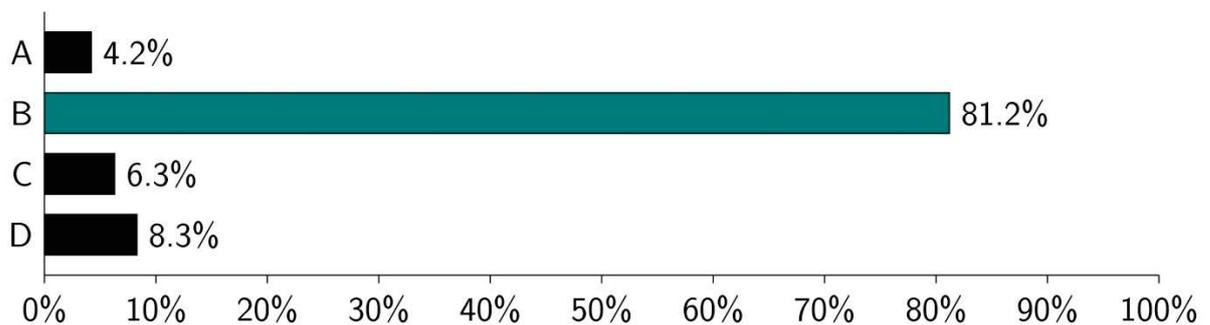
**9) Qual partícula subatômica foi descoberta por J.J. Thomson usando raios catódicos?**

- a) Próton
- b) Nêutron
- c) Elétron
- d) Núcleo



**10) O que Wilhelm Roentgen descobriu em 1895?**

- a) Elétrons
- b) Raios X
- c) Raios catódicos
- d) Raios gama



**Quiz 2 - O Sistema Internacional de Unidades e as Constantes Fundamentais**  
(perguntas 1 a 5 estão no Quiz 0)

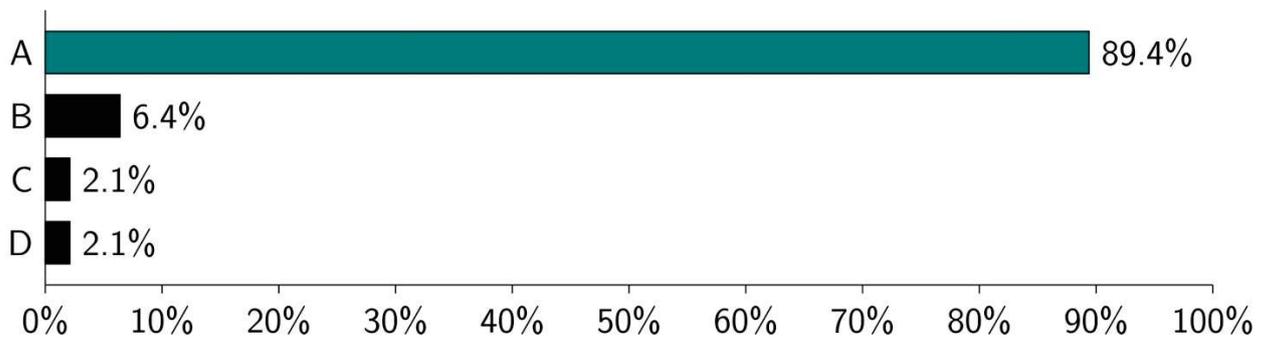
**6) O metro é uma unidade SI fundamental usada para medir comprimento. Em que se baseia a definição recente da medida?**

- a) Um cilindro de platina-irídio
- b) O comprimento de onda de uma transição atômica específica
- c) A circunferência da Terra
- d) O comprimento do pé de um rei



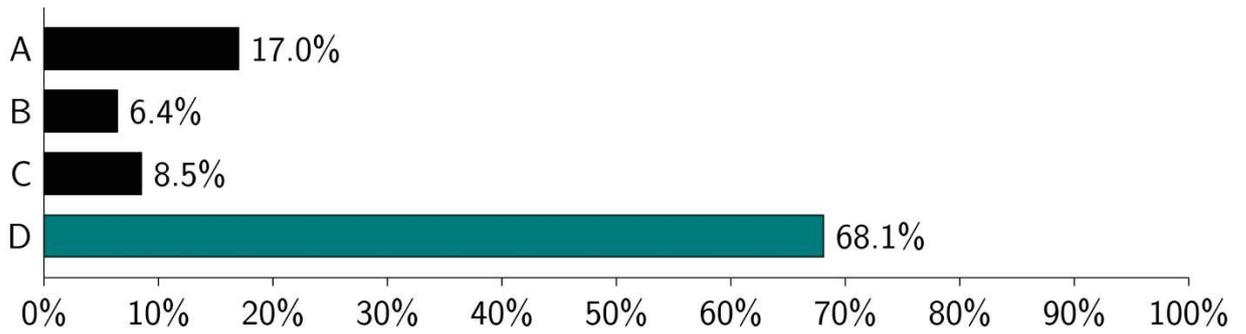
**7) Qual constante fundamental da natureza é usada para definir o quilograma (massa) em unidades SI?**

- a) Constante de Planck
- b) Velocidade da luz no vácuo
- c) Constante de Boltzmann
- d) Número de Avogadro



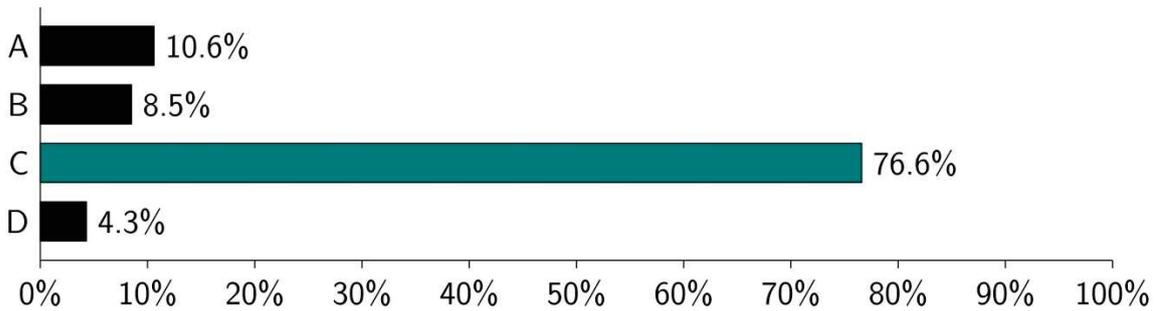
**8) O Kelvin é a unidade SI para temperatura. Em que se baseia a definição recente de Kelvin?**

- a) A temperatura do zero absoluto
- b) O ponto de ebulição da água
- c) A velocidade da luz no vácuo
- d) A constante de Boltzmann



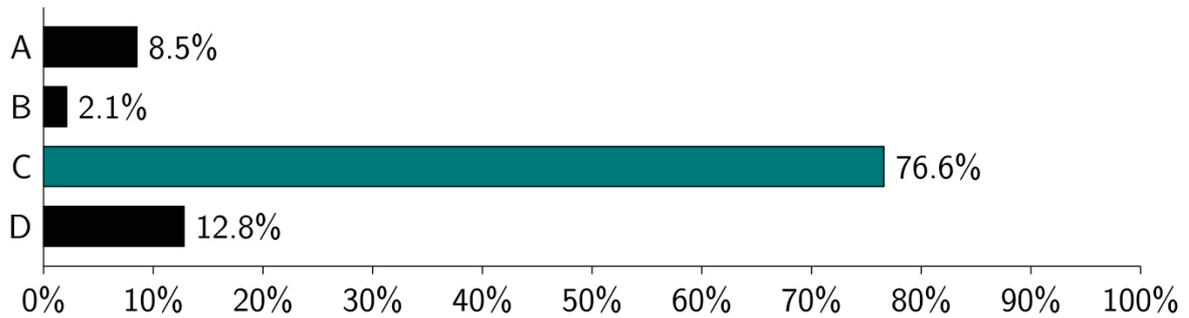
**9) A candela é a unidade SI para medir a intensidade luminosa. Em que se baseia a definição recente de candela?**

- a) A luz emitida por uma vela específica
- b) O brilho de uma lâmpada
- c) A constante de Planck e velocidade da luz no vácuo
- d) Constante solar



**10) Qual é o nome da constante não usada para definir as novas unidades do SI?**

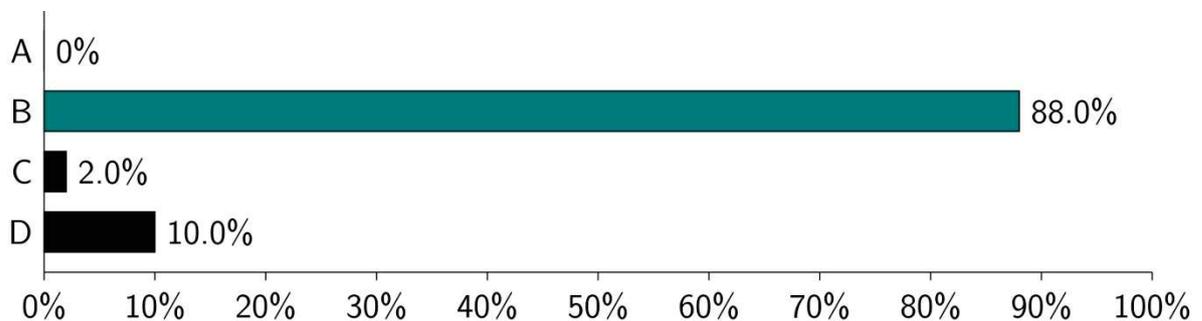
- a) A constante de Boltzmann
- b) A constante de Planck
- c) A constante de Newton
- d) A constante de velocidade de luz



### Quiz 3 - Radiação do corpo negro (perguntas 1 a 5 estão no Quiz 0)

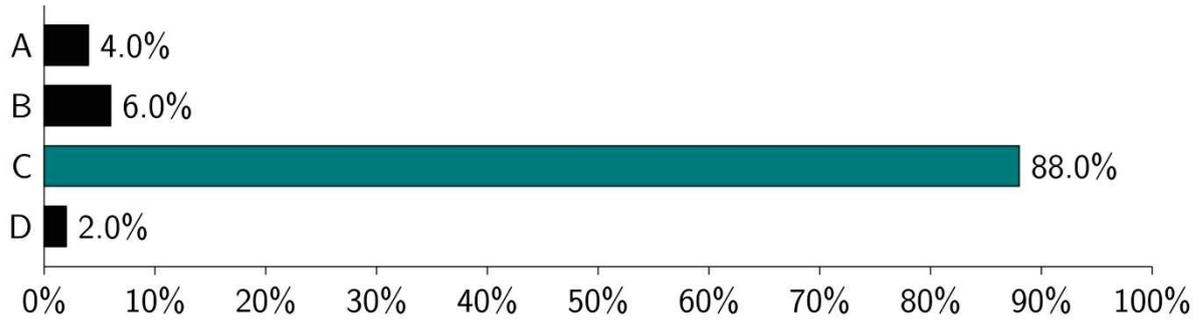
#### 6) O que é um corpo negro no contexto da radiação do corpo negro?

- a) Um corpo completamente preto
- b) Um objeto teórico que absorve toda a radiação incidente e emite radiação
- c) Um corpo extremamente quente
- d) Um corpo que não emite radiação



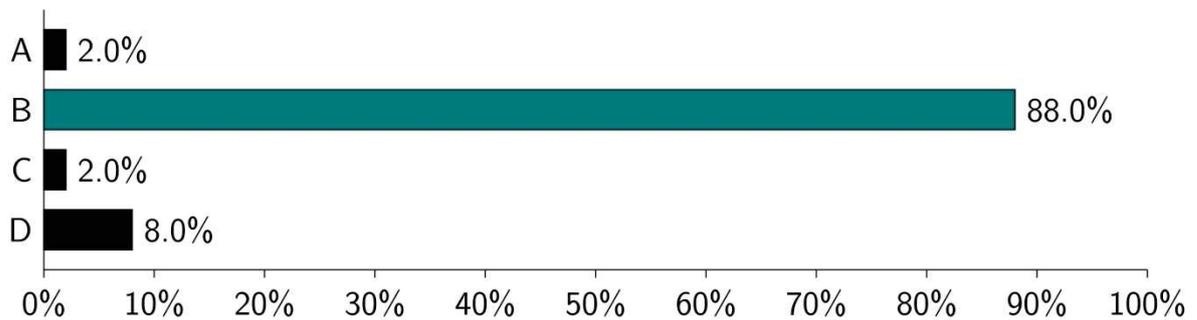
#### 7) Qual é o nome do fenômeno que ocorre quando objetos quentes emitem radiação?

- a) Efeito Fotoelétrico
- b) Capacidade térmica específica
- c) Radiação de Corpo Negro
- d) Radioatividade



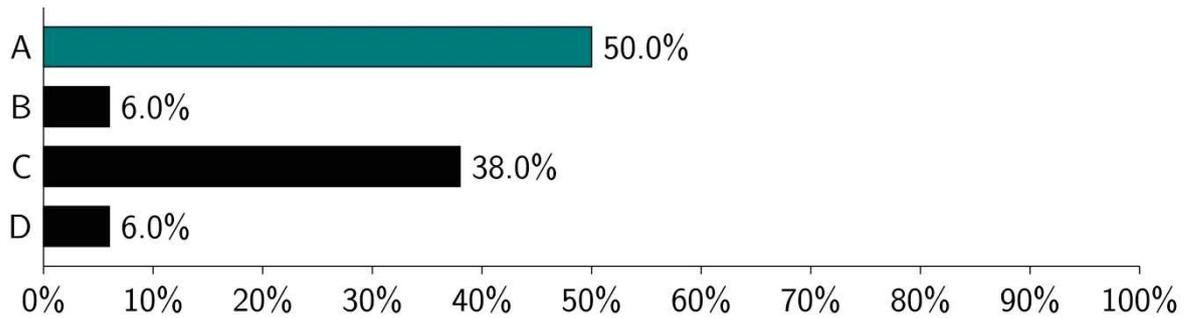
**8) Qual é a relação entre a temperatura de um corpo negro e o comprimento de onda máximo da sua radiação, conforme descrito pela Lei do Deslocamento de Wien?**

- a) O comprimento de onda do pico é diretamente proporcional à temperatura.
- b) O comprimento de onda do pico é inversamente proporcional à temperatura.
- c) O comprimento de onda do pico não está relacionado com a temperatura.
- d) O comprimento de onda do pico é igual à temperatura.



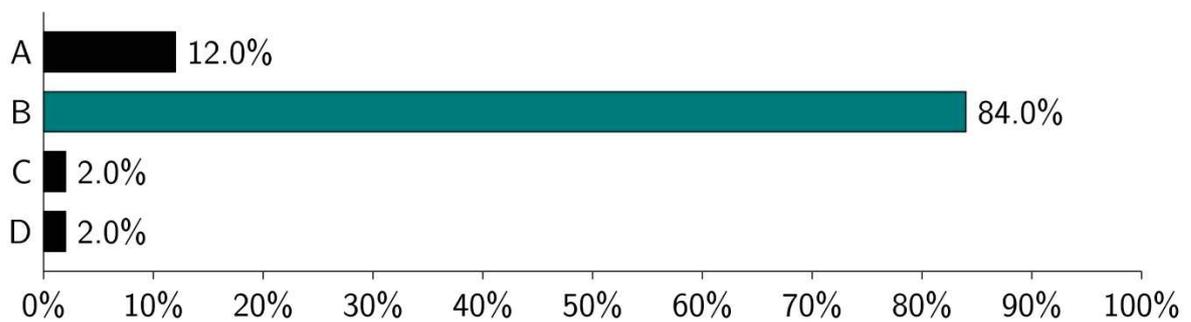
**9) De acordo com a lei de Planck, como a energia irradiada por um corpo negro é distribuída em diferentes comprimentos de onda?**

- a) Teremos um pico de intensidade de energia em determinado comprimento de onda, que dependera da temperatura do corpo negro.
- b) Está distribuído uniformemente em todos os comprimentos de onda.
- c) Está concentrado em comprimentos de onda mais curtos.
- d) Está concentrado em comprimentos de onda mais longos.



**10) De acordo com a equação de Planck,  $E = hf$ , o que “E” representa?**

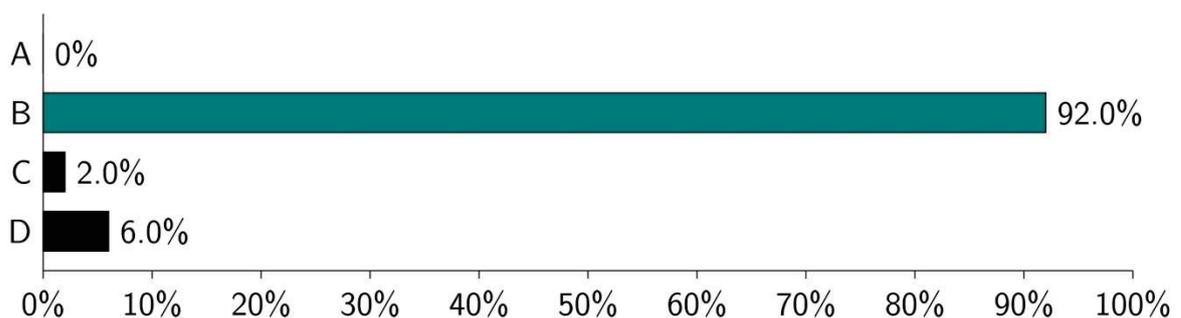
- a) Energia do elétron
- b) Energia da luz
- c) Velocidade da luz
- d) Constante de Planck



**Quiz 4 - Efeito fotoelétrico** (perguntas 1 a 5 estão no Quiz 0)

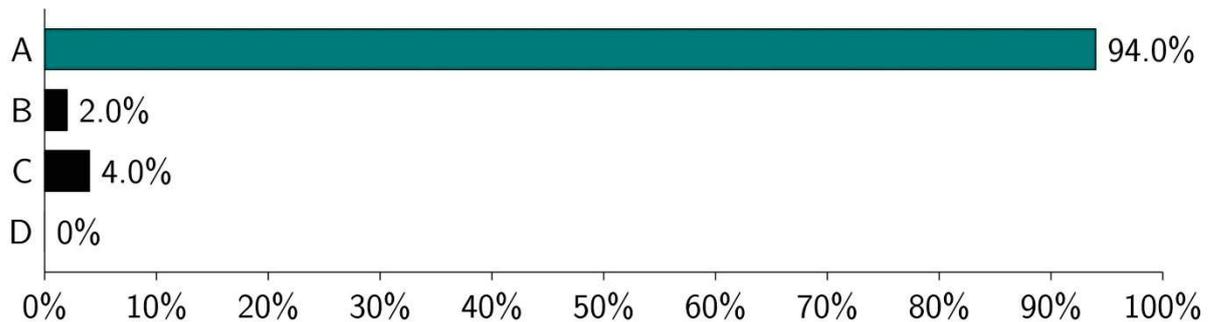
**6) Qual a constante fundamental relacionada ao efeito fotoelétrico?**

- a) Constante de Avogadro
- b) Constante de Planck
- c) Constante de Gravitação Universal
- d) Constante de Coulomb



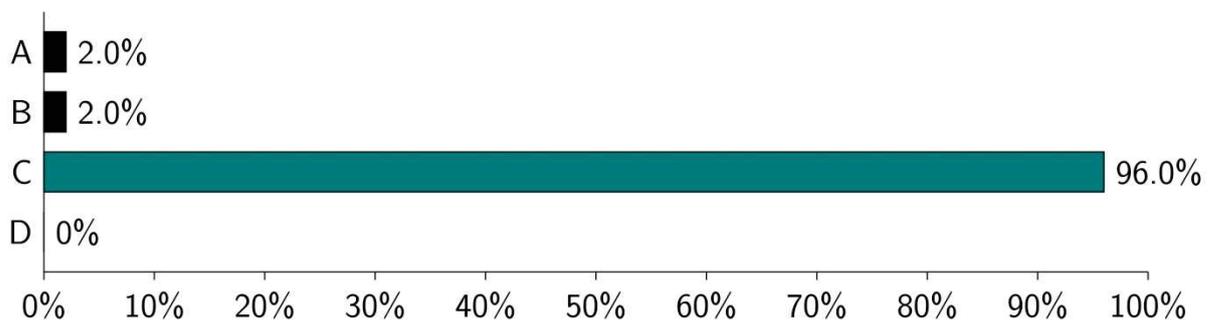
**7) Quem foi o cientista que ganhou o Prêmio Nobel de Física em 1921 por suas contribuições ao estudo do efeito fotoelétrico?**

- a) Albert Einstein (1879 – 1955)
- b) Max Planck (1858 -1947)
- c) Thomas Edison (1848 – 1931)
- d) Henrich Rudolf Hertz (1857 – 1894)



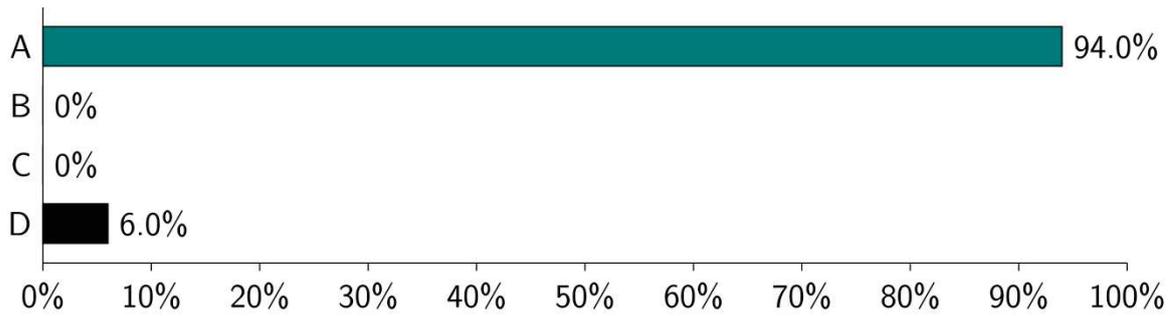
**8) O que é necessário para que ocorra o efeito fotoelétrico?**

- a) Luz de alta intensidade.
- b) Luz com baixa intensidade.
- c) Luz com frequência acima de um valor limite.
- d) Qualquer luz visível.



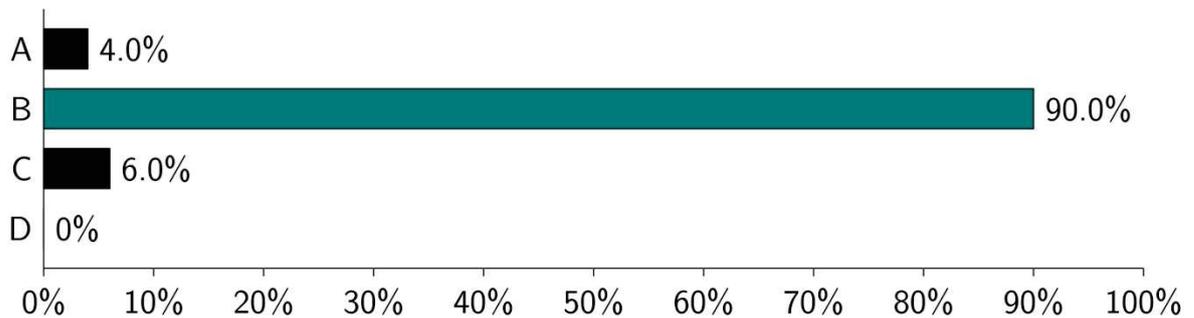
**9) Que tipo de partículas são emitidas durante o efeito fotoelétrico?**

- a) Elétrons
- b) Prótons
- c) Nêutrons
- d) Fótons



**10) Qual propriedade da luz determina se o efeito fotoelétrico ocorre ou não?**

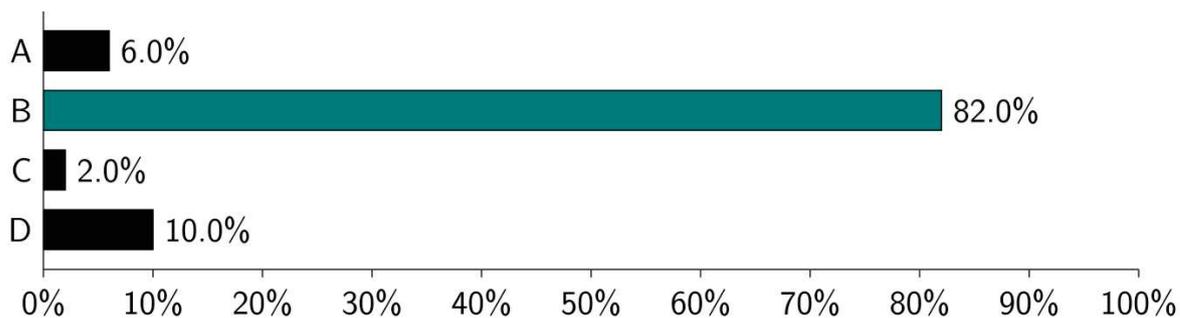
- a) Comprimento de onda
- b) Freqüência
- c) Amplitude
- d) Velocidade



**Quiz 5 - Calor específico** (perguntas 1 a 5 estão no Quiz 0)

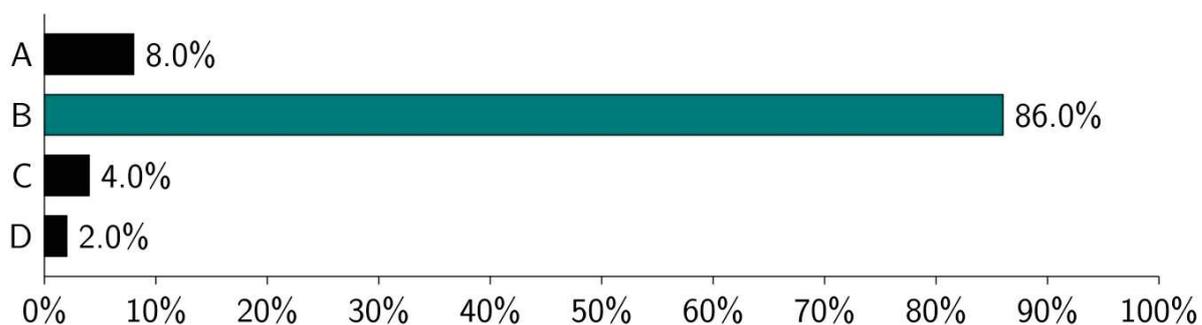
**6) Qual teoria foi fundamental para a compreensão do calor específico de sólidos, levando à solução proposta por Albert Einstein?**

- a) Teoria da Relatividade Especial
- b) Mecânica Quântica
- c) Teoria da Gravitação de Newton
- d) Teoria da Termodinâmica



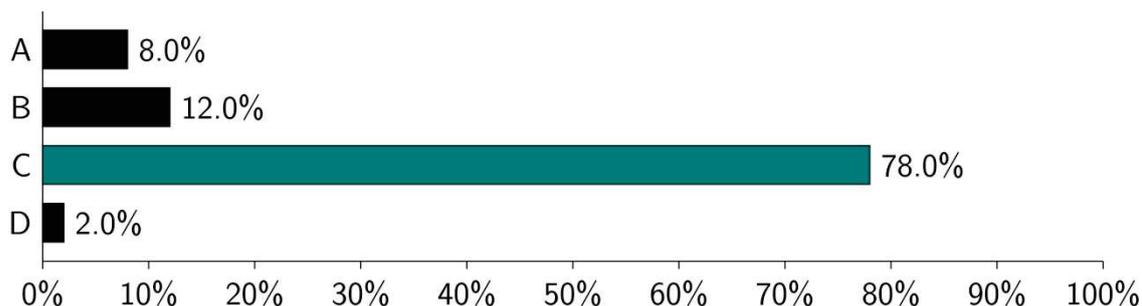
**7) Qual material, quando aquecido, teria o aumento de temperatura mais lento devido à sua alta capacidade de calor específico?**

- a) Cobre
- b) Madeira
- c) Mercúrio
- d) Etanol



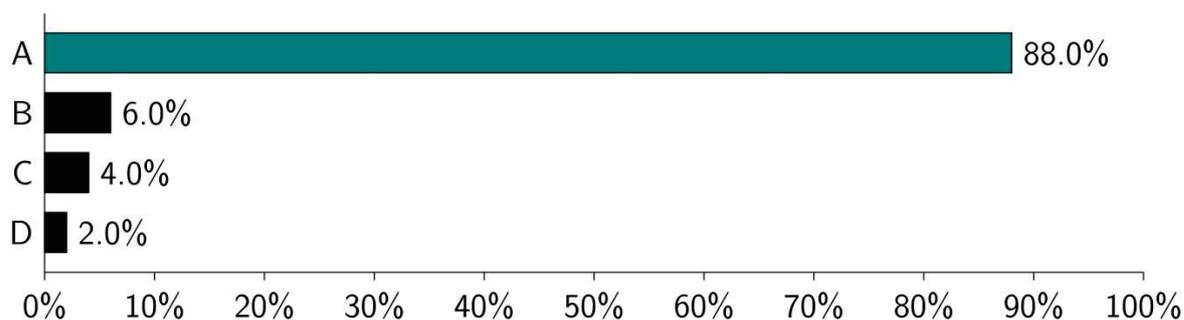
**8) Qual afirmação é verdadeira sobre a relação entre a capacidade térmica específica dos sólidos e mudança de temperatura?**

- a) O valor da capacidade térmica específica diminui à medida que a temperatura aumenta.
- b) O valor da capacidade térmica específica é inversamente proporcional à mudança de temperatura.
- c) O valor da capacidade térmica específica vale zero quando a temperatura é zero absoluto e aumenta com o aumento da temperatura até um valor limite.
- d) O valor da capacidade térmica específica não está relacionada com a mudança de temperatura.



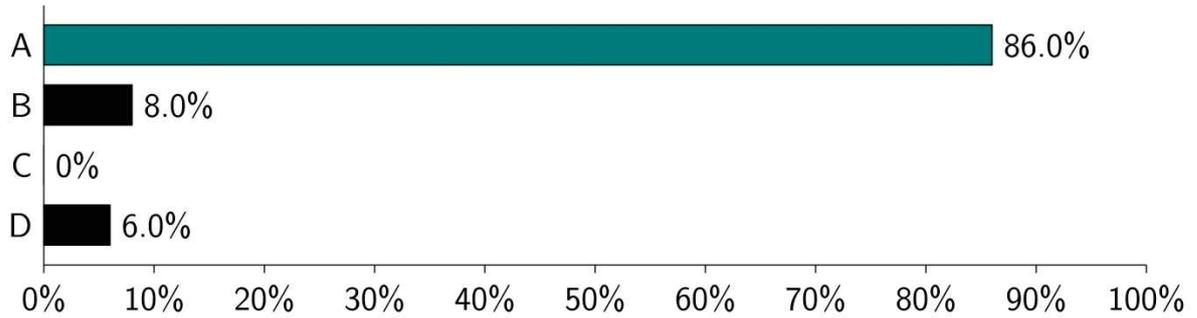
**9) Qual das alternativas a seguir tem a maior capacidade de calor específico?**

- a) água
- b) Ferro
- c) Alumínio
- e) Vidro



**10) O que é capacidade térmica?**

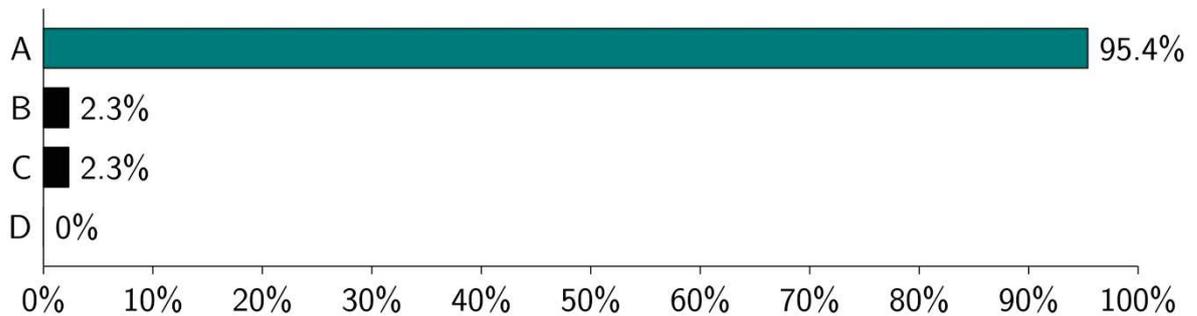
- a) A quantidade de calor fornecida para aumentar a temperatura de uma substância em 1°C
- b) A quantidade de calor fornecida para baixar a temperatura de uma substância em 1°C
- c) A quantidade de calor necessária para transformar uma substância de sólida em líquida.
- d) A quantidade de calor necessária para transformar uma substância de líquido em gasoso.



**Quiz 6 - Radioatividade** (perguntas 1 a 5 estão no Quiz 0)

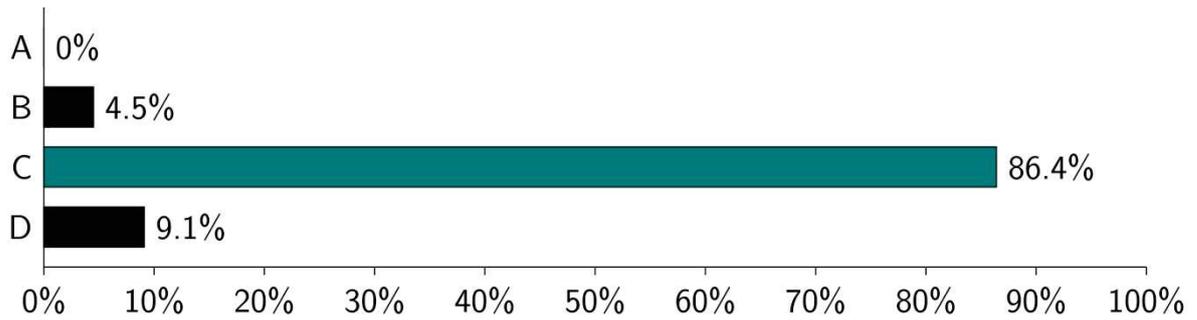
**6) A quem é atribuída a descoberta da radioatividade?**

- a) Henry Becquerel (1852 – 1908)
- b) Albert Einstein (1879 – 1955)
- c) Max Planck (1858 – 1947)
- e) Isaac Newton (1642 – 1727)



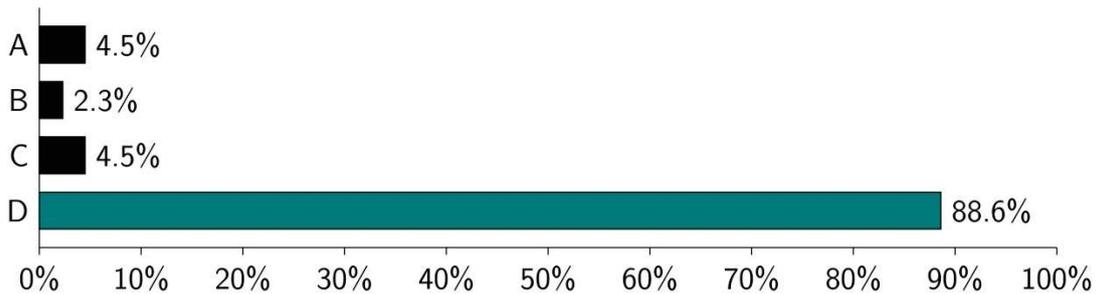
**7) Qual dos seguintes materiais é comumente usado para proteger contra partículas alfa?**

- a) Chumbo
- b) Concreto
- c) Papel
- d) Plástico



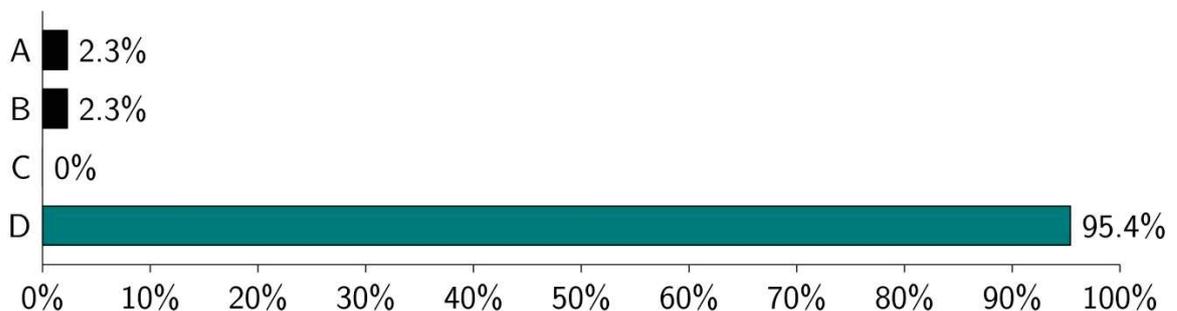
**8) O que acontece com o núcleo de um átomo durante o decaimento radioativo?**

- a) Permanece inalterado
- b) Absorve mais prótons
- c) Torna-se mais instável
- d) Sofre uma transformação, emitindo partículas e/ou energia



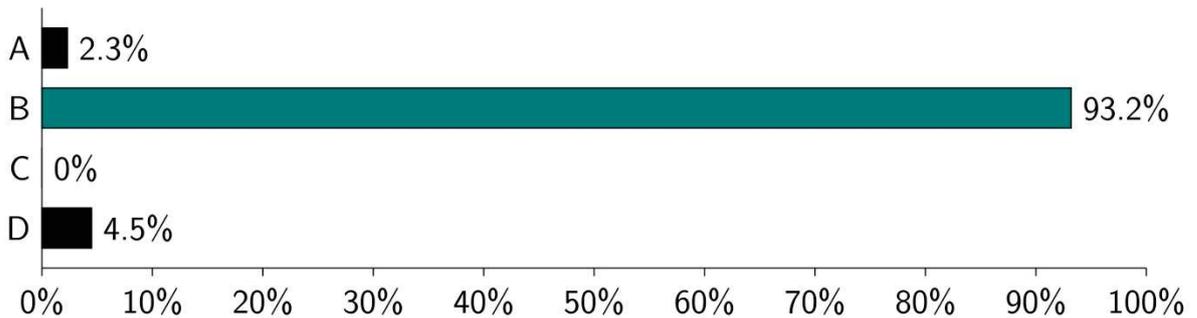
**9) Qual das alternativas a seguir não é um tipo de decaimento radioativo?**

- a) Decaimento alfa
- b) Decaimento beta
- c) Decaimento gama
- d) Decaimento magnético



**10) Qual isótopo radioativo é comumente usado na datação por carbono para determinar a idade de materiais orgânicos antigos?**

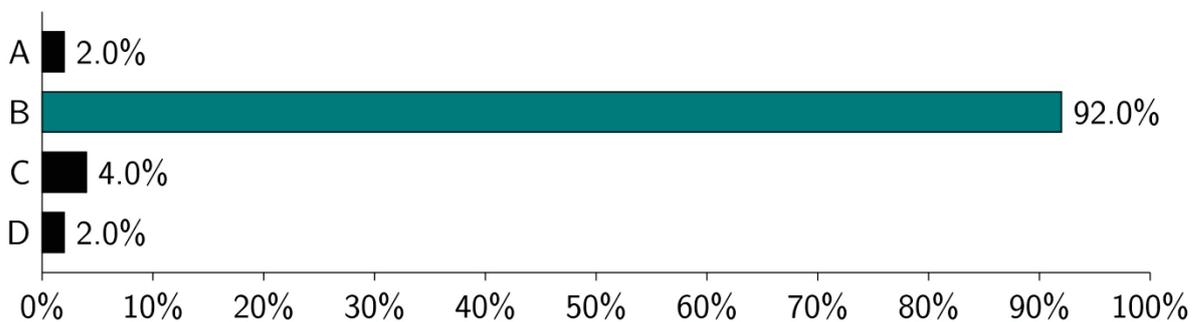
- a) Urânio-235
- b) Carbono-14
- c) Radônio-222
- d) Plutônio-239



**Quiz 7 - Espectro Atômico** (perguntas 1 a 5 estão no Quiz 0)

**6) O que é um espectro atômico?**

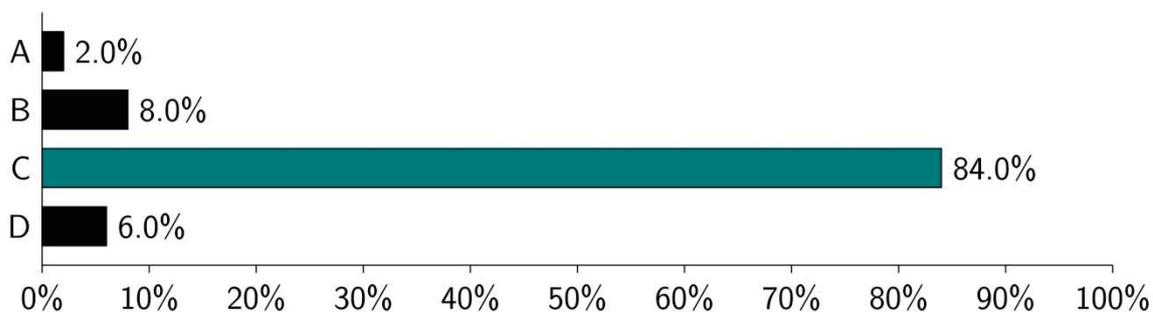
- a) Uma exibição colorida de fogos de artifício
- b) Um padrão único de luz emitida ou absorvida pelos átomos
- c) Um tipo de decaimento radioativo
- d) A estrutura do núcleo do átomo



**7) Que tipo de espectro atômico consiste em linhas brilhantes e discretas sobre um fundo escuro?**

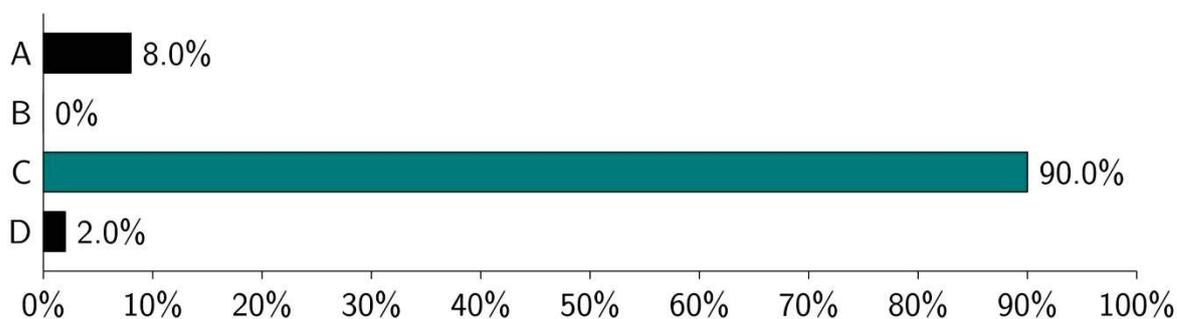
- a) Espectro contínuo

- b) Espectro de absorção
- c) Espectro de emissão
- d) Espectro de linha



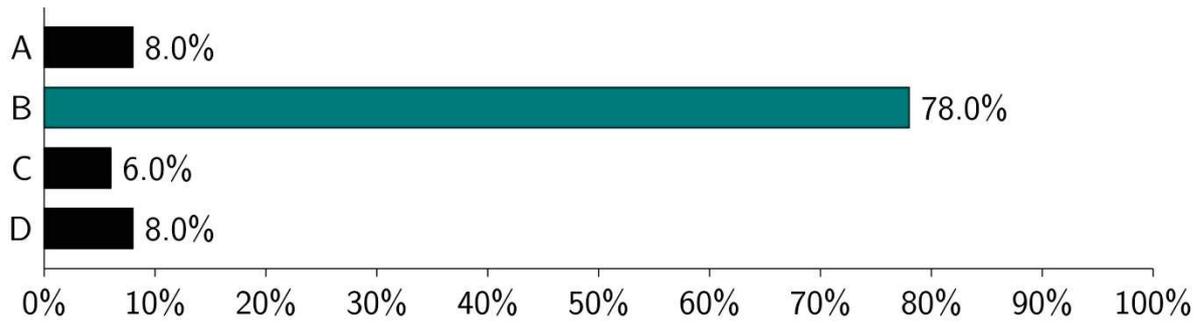
**8) No modelo de Bohr, o que representam os diferentes níveis em um átomo?**

- a) O número de elétrons no átomo.
- b) As órbitas dos elétrons no átomo.
- c) As diferentes energias do elétron.
- d) A probabilidade de captura de elétrons.



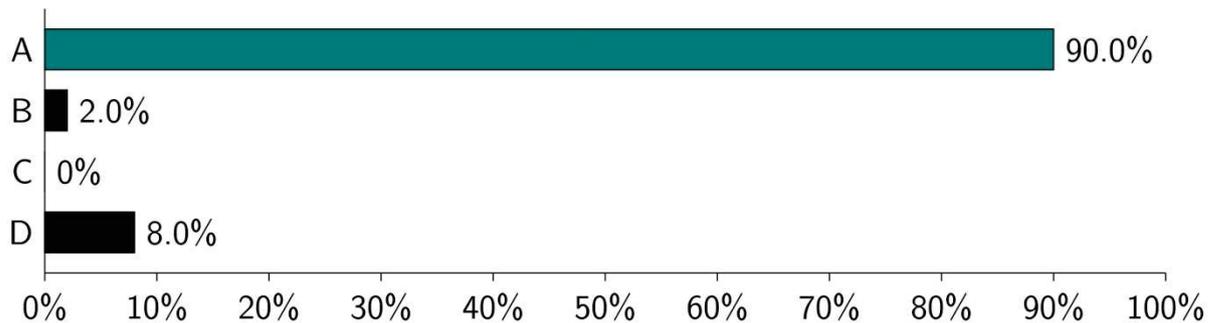
**9) Num espectro de emissão, o que cada linha representa?**

- a) A absorção de comprimentos de onda específicos de luz
- b) Os comprimentos de onda da luz emitida por elétrons excitados que retornam a níveis de energia mais baixos
- c) Os comprimentos de onda da luz que são transmitidos através de um material
- d) Os comprimentos de onda da luz refletida por uma superfície



**10) O que acontece quando os elétrons em um átomo absorvem energia e passam para níveis de energia mais elevados?**

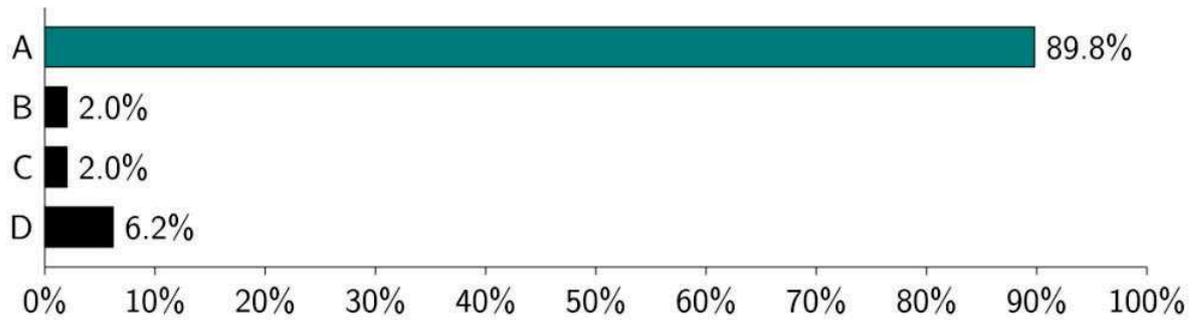
- a) Os elétrons retornam ao nível mais estável, emitindo luz
- b) O átomo esfria
- c) O átomo se contrai em tamanho
- d) O átomo perde elétrons



**Quiz 8 - Mecânica Quântica** (perguntas 1 a 5 estão no Quiz 0)

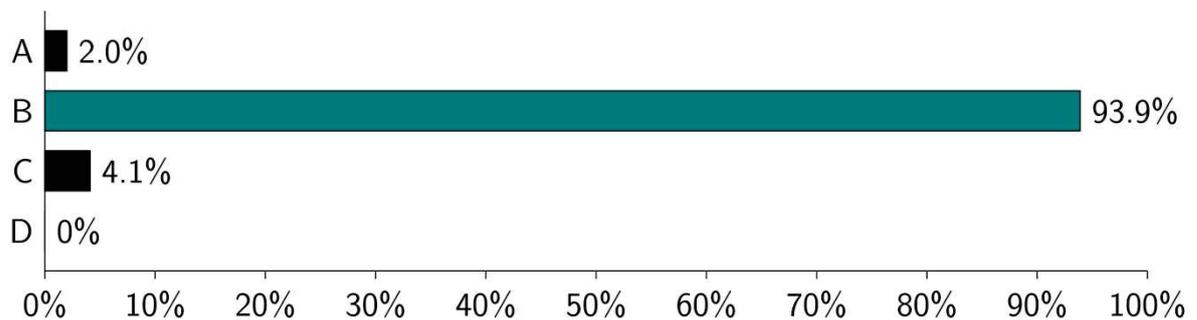
**6) No contexto da mecânica quântica, o que afirma o Princípio da Incerteza de Heisenberg?**

- a) Quanto mais você sabe sobre a posição de uma partícula, menos você sabe sobre seu momento.
- b) A posição e a velocidade de uma partícula podem ser conhecidas com absoluta certeza.
- c) Os elétrons só podem existir em níveis de energia discretos.
- d) A mecânica quântica é determinística e previsível.



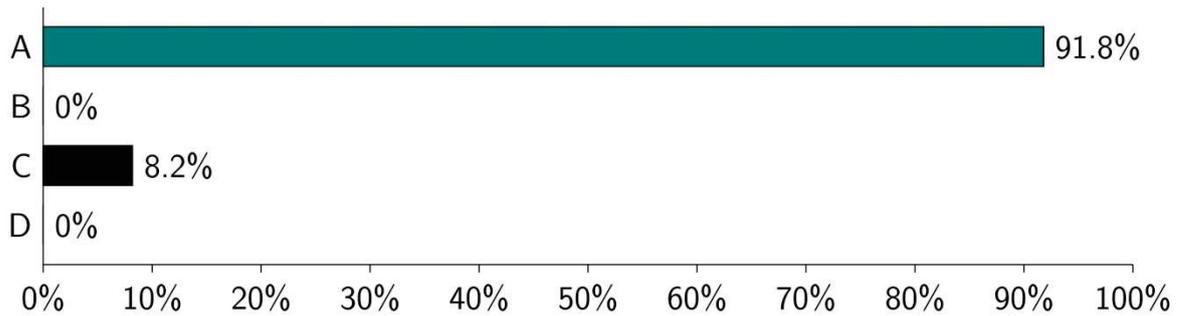
**7) Qual cientista é conhecido por sua equação de onda, fundamental para a mecânica quântica e que descreve o comportamento dos elétrons nos átomos?**

- a) Max Planck (1858-1947)
- b) Erwin Schrodinger (1887-1961)
- c) Niels Bohr (1885-1962)
- d) Paul Dirac (1902-1984)



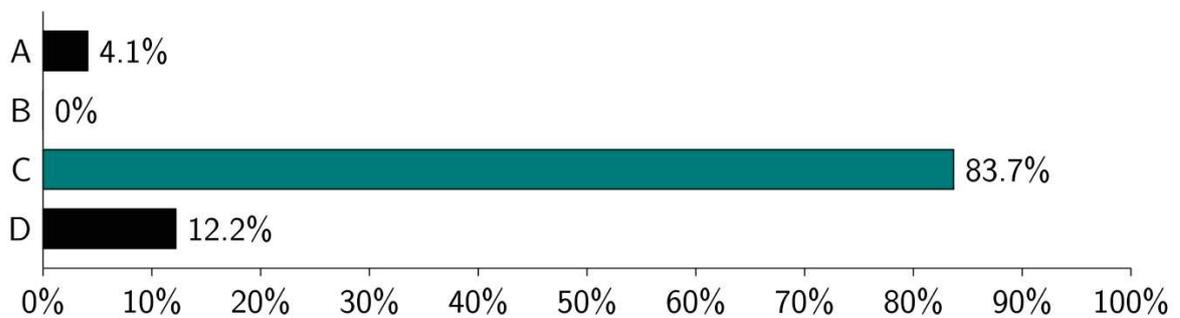
**8) Qual é o nome do princípio da mecânica quântica que afirma que dois elétrons em um átomo não podem ter o mesmo conjunto de números quânticos?**

- a) Princípio de Exclusão de Pauli
- b) Princípio de Bohr
- c) Princípio de Schrödinger
- d) Princípio de Heisenberg



**9) De acordo com a Física Quântica, as partículas em movimento comportam-se como ondas, de modo que podemos associar-lhes um comprimento de onda. Quem descobriu este importante princípio quântico?**

- a) J. J. Thomson (1856-1940)
- b) Robert Millikan (1868-1953)
- c) Luis de Broglie (1892-1987)
- d) Erwin Schrodinger (1887-1961)



**10) Todas as partículas fundamentais possuem uma propriedade quântica chamada spin. Em 2012, os cientistas descobriram a única partícula fundamental conhecida sem spin. Qual é o nome desta partícula?**

- a) Méson de Yukawa
- b) Bóson de Higgs
- c) Férmion de Dirac
- b) Gráviton de Edmilson

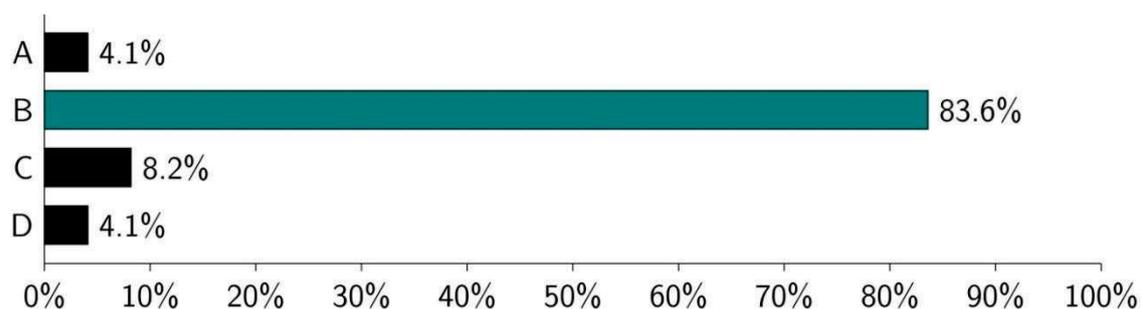


Tabela 6 - Percentual de acertos após cada aula

Quiz 1		Quiz 2		Quiz 3		Quiz 4	
nº	acertos	nº	acertos	nº	acertos	nº	acertos
6	89,6 %	6	91,5 %	6	88,0 %	6	92,0 %
7	93,8 %	7	89,4 %	7	88,0 %	7	94,0 %
8	87,5 %	8	68,1 %	8	88,0 %	8	96,0 %
9	87,5 %	9	76,6 %	9	50,0 %	9	94,0 %
10	81,3 %	10	76,6 %	10	84,0 %	10	90,0 %
<b>Média</b>	87,7%	<b>Média</b>	80,4%	<b>Média</b>	79,6%	<b>Média</b>	93,2%
Quiz 5		Quiz 6		Quiz 7		Quiz 8	
nº	acertos	nº	acertos	nº	acertos	nº	acertos
6	82,0 %	6	95,0 %	6	92,0 %	6	89,8 %
7	86,0 %	7	86,4 %	7	84,0 %	7	93,9 %
8	78,0 %	8	88,6 %	8	90,0 %	8	91,8 %
9	88,0 %	9	95,5 %	9	78,0 %	9	83,7 %
10	86,0 %	10	93,2 %	10	90,0 %	10	83,7 %
<b>Média</b>	84,0 %	<b>Média</b>	91,7 %	<b>Média</b>	86,8 %	<b>Média</b>	88,6 %
<b>Média total de acertos</b>				<b>86,5%</b>			

Fonte: O autor

Pode-se também concluir neste novo grupo de 40 perguntas, que houve significativo êxito da apresentação do conteúdo contido na Sequência Didática do Produto Educacional desta Dissertação.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A promoção de uma Alfabetização Científica foi desde o início o farol deste trabalho, pois segundo Sasseron e Carvalho (2011), nossos estudantes necessitam ter um Ensino de Ciências capaz de promover uma educação cidadã que os capacitem a viver em simbiose com os conhecimentos científicos atuais, dando-lhes autonomia nas diferentes esferas de vida. Neste diapasão, foi estabelecida uma pedra fundamental de construção, que podemos chamá-la de pergunta de pesquisa: “Como o estudo de temas da Mecânica Quântica, dando a devida relevância ao contexto histórico, pode contribuir para a promoção do Letramento/Alfabetização Científica do aluno?”

O tema escolhido se mostrou muito sedutor para os alunos, pois a Teoria Quântica está cotidianamente presente nas tecnologias em que somos usufrutuários e é diuturnamente citada por cientistas, curiosos e místicos. Assim, não foi difícil formular uma hipótese de previsível confirmação, a deque **os alunos possuem uma motivação prévia e latente para a busca de conhecimentos ligados a Mecânica Quântica e estão à espera de uma ação docente para despertá-los.**

Tínhamos então um bom tema e para garantirmos o sucesso na apreensão desses conteúdos, dobramos os meios para tal, quando nos amparamos na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel (1918-2008) e Joseph Novak (1932-2023).

O êxito desta Teoria está calcado em dois pilares. O primeiro é que o objeto a ser estudado seja, de acordo com Moreira (2019), potencialmente significativo, ou seja, tenha alguma correlação com sua estrutura cognitiva, o que é evidenciado com o convívio do aluno com tais avanços tecnológicos e a sua curiosidade. O segundo é que haja o ato volitivo do aluno, ou seja, que o estudante manifeste sua vontade de aprender, o que pode ser fomentada por aquela citada curiosidade comum aos jovens e aprendizes. Cabe ressaltar também, que tópicos da Teoria Quântica têm sido contemplados em alguns certames que objetivam o ingresso no Ensino Superior, o que pode ser considerado um incremento motivacional.

Coube a este professor-pesquisador, munido de um bom tema e tendo a atenção de alunos motivados, ações no sentido de valorizar seus conhecimentos prévios e usar de criatividade ao diversificar as estratégias de ensino.

Então, concebemos um Produto Educacional que coaduna com uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), descrito por Moreira (2011).

Foi explícita a entrega da maioria dos alunos, na aplicação do Produto Educacional, diante da sedução que o assunto naturalmente despertou. Pois, em nosso mundo de dimensões visíveis, uma visão clássica da ciência foi ao longo do tempo, sedimentada com previsões concretas, fruto de observações lógicas, que incutiram um pensamento determinista nos pensadores e produtores de ciência com regras simples e seguras. A partir do início do século XX, penetramos em um universo de escalas subatômicas da estrutura da matéria, onde as certezas desapareceram e a realidade desafiou o senso comum. Entramos no fascinante mundo da Mecânica Quântica, quando a cada descoberta deste probabilístico e pequeno mundo, surgiram fantásticas aplicações.

Em face dessa importância e dimensão do tema deste trabalho sob o título Prelúdio do Quantum: As Cinco Rachaduras na Física Clássica que levaram à Teoria Quântica; este professor-pesquisador segmentou este Produto Educacional em três partes.

A primeira parte sob a forma de *e-book* foi destinada ao professor-leitor, descrevendo de maneira qualitativa e quantitativa o supracitado tema. Na segunda parte foi proposta uma Sequência Didática voltada para alunos do Ensino Médio com links das oito aulas desenvolvidas, além de links de vídeos tutoriais das mesmas aulas elaboradas pelo professor-pesquisador, para o professor-leitor. Na terceira parte reservamos uma sintética teoria de semicondutores e uma prática experimental em laboratório didático de Física, quando foi calculada a constante de Planck utilizando-se LEDs e um aplicativo de telefone celular.

O conteúdo de Física apresentado neste trabalho estava inserido em uma atmosfera em que a Filosofia e a História da Ciência eram componentes, pois sabemos do potencial destes conhecimentos em atrair até os mais indiferentes. Tornam a aula mais sedutora, mais alcançável, pulverizando o medo da equação mais complexa. Diminuem a frieza dos modelos matemáticos e aproximam o incauto aluno das grandezas físicas do cotidiano, antes obscuras ou invisíveis.

Foi extremamente gratificante ouvir, após a apresentação das aulas e a realização da atividade experimental, declarações de alunos relatando que a partir daquele momento, iriam estudar Física para tê-la como profissão. Isto denotou o melhor termômetro do mundo e a certeza que o potencial se converteu em sucesso, o que pode ser comprovado com os altíssimos percentuais de acertos em avaliações posteriores às aulas, conforme tabelas anexadas a este trabalho.

Este professor também se considera um agraciado pelas conseqüências que a pesquisa proporcionou. O conhecimento produzido em alguns momentos sensibilizou este velho professor de Ensino Médio, que parafraseando o Lord Kelvin em 1900, não esperava nada mais a ser descoberto.

Espero que esta motivação dê mais frutos, pois pretendemos continuar a pesquisa, aperfeiçoando o tema Prelúdio do Quantum: as cinco rachaduras na Física Clássica que levaram à Teoria Quântica, presente na primeira parte do Produto Educacional, levando-o quem sabe ao status de livro publicado.

## REFERÊNCIAS

- ALARCÃO, I. **Escola reflexiva e nova racionalidade**. Porto Alegre: Artmed, 2001.
- ANGELO, M. S. **George Gamow: O Universo Primordial**. 2016. Disponível em: <http://lilith.fisica.ufmg.br/~dsoares/ensino/1-07/mateus-gamow.htm>. Acesso em: 16 set. 2023.
- ARTHURY, L. H. M. Avaliação de dois Documentários sobre Física Quântica e seu Possível uso no Ensino Médio. **Revista do Professor de Física**, v. 7, n. 1, p. 1-19, Brasília, 2023.
- ÁTOMO de Bohr: Níveis de Energia. Produzido por Jorge Sá Martins. [s.l. s.n.], 5 mar. 2014. 1 vídeo (14 min). Publicado no Canal: Física Moderna UFF. Disponível em: [https://youtu.be/Kc3\\_GZJliV4?si=yWwAi6NTP7CJp2hm](https://youtu.be/Kc3_GZJliV4?si=yWwAi6NTP7CJp2hm). Acesso em: 18 out. 2023.
- AURANI, K. M.; As idéias iniciais de Clausius sobre entropia e suas possíveis contribuições à formação de professores. **Revista Brasileira de História de Ciências**, v. 11, n.1,p 155-163, 2018.
- AUSUBEL, D. P. **Algunos aspectos psicológicos de La estructura del conocimiento**. Buenos Aires: El Ateneo, 1973.
- AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J.; HANESIAN, H. **Psicologia Educacional**. Rio de Janeiro: Editora Interamericana, 1980.
- BASSALO, J. M. F. **Curiosidades da Física. Aspectos Curiosos do Trabalho Científico entre Gamow e Bohr**. 2019. Disponível em: <https://seara.ufc.br/wp-content/uploads/2019/03/folclore472.pdf>. Acesso em 16 set. 2023
- BAYER, A.; NUNES, C. S.; MANASSI, N. P. Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) para o Ensino de Estatística na Educação Básica. **XIV CIAEM-IACME**, Chiapas, México, 2015.
- BLACK Body Radiation - Understanding the black body spectra using classical and quantum physics. Produzido por Edouard Reny. [s.l. s.n.], 7 mar.2021. 1 vídeo (10 min) Publicado no canal: PhysicsMadeEasy. Disponível em: <https://youtu.be/ugsvADj1wts?si=2pxtBFVlhZAXuLaR>. Acesso em: 4 maio 2023.
- BLACKBODY Radiation: The Laws Of Stefan, Wien and Planck. Produzido por Pierre-Marie Robitaille. [s.l. s.n.], 8 ago. 2017. 1 vídeo (8 min) Publicado pelo Canal: Sky Scholar. Disponível em: <https://youtu.be/h5jOAw57OXM?si=mOjHelitVulvKOE>. Acesso em: 6 maio 2023.
- BORBA, M.C; ALMEIDA, H. R. F. L; GRACIAS, T. A. S. **Pesquisa em ensino e sala de aula: Diferentes vozes em uma investigação**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Autêntica Editora, 2020.

BOYA, L. J.; The Thermal Radiation Formula of Planck arXiv:physics/0402064 [physics.hist-ph] **Rev. Academia de Ciencias**, Zaragoza. 58 (2003) 91-114

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria dos Circuitos** 11ª Ed. São Paulo: Pearson Educations do Brasil, 2013

BRAGA, J. P. O colapso da equi-partição da energia. **Química Nova**, v. 24, n. 5, p. 693-699, 2001.

CACAIS, F. A. L; LOAYZA, V. M. **Cadernos de Metrologia – Especial SI/2019** Adoção Mundial da Redefinição do Quilograma em 2019. Disponível em :<http://www.inmetro.gov.br/imprensa/releases/cadernos-de-metrologia.pdf>. Acesso em 10 out. 2023.

**Cadernos de Metrologia – Especial SI/2019.** Disponível em :<http://www.inmetro.gov.br/imprensa/releases/cadernos-de-metrologia.pdf>. Acesso em 10 out. 2023.

CAVALCANTI, P. J. M. **Fundamentos de eletrotécnica.** 22ª Ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos Editora, 2012.

CHIBENI, S.S. **O surgimento da Física Quântica.** Disponível em: <https://www.unicamp.br/~chibeni/textosdidaticos/fisquantica.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.

COELHO, H. T.; FERREIRA, R.; *Annus Mirabilis* de Einstein: artigos que revolucionaram a Física. **Gazeta de Matemática**, n. 150, p. 29-39, 2006.

COMO FUNCIONA um LED. Produzido por Kellen Skol. [s.l. s.n.], 5 jan. de 2021. 1 vídeo (11 min) Publicado no canal: Skola de Física. Disponível em: <https://youtu.be/alZLyWTik4w?si=bej27FcKtHKPktmI>. Acesso em: 9 dez. 2023

**Conferência Geral de Pesos e Medidas – CGPM, 2023.** Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/metrologia-cientifica/foruns-comites-e-redes/cgpm>. Acesso em 14 set 2023.

CONNOR, N. **O que é a teoria do decaimento alfa – tunelamento quântico – definição.** Disponível em: <https://www.radiation-dosimetry.org/pt-br/o-que-e-a-teoria-do-decaimento-alfa-tunelamento-quantico-definicao>. Acesso em 14 set. 2023.

**Constantes fundamentais da Física.** Disponível em <https://www.blogs.unicamp.br/universofisico/2009/01/02/estudo-esclarece-constantas-fundamentais-da-fisica>. Acesso em: 17 maio 2023.

CORRÊA, C. Modelo atômico de Rutherford. **Revista de Ciência Elementar**, v.2, n. 2, Porto, 2014.

DAHMEN, S. R. R.; Ludwig Boltzmann: vida e obra. **Gazeta de Física**, v. 30, fascículo 2, p. 16-22, 2007.

DE PLANCK a Rayleigh-Jeans- Catástrofe do Ultravioleta. Produzido por Virgílio P. Siqueira. [s.l. s.n.], 20 jan. 2022. 1 vídeo (9 min) Publicado no canal: ABF

AstroBioFísica. Disponível em: <https://youtu.be/3l3XildxaTc>. Acesso em: Acesso em 30 dez. 2022.

DE PLANCK a Wien. Produzido por Virgílio P. Siqueira. [s.l.;s.n.], 21 jan.2022. 1 vídeo (23 min) Publicado no canal: ABF AstroBioFísica. Disponível em: <https://youtu.be/01oaLNCLVEc> . Acesso em: Acesso em 30 dez. 2022.

DUFF, M. J.; OKUN, L. B.; VENEZIANO, G. **Trílogo sobre o número de constantes fundamentais**, 2002.Disponível em <https://doi.org/10.48550/arXiv.physics/0110060>. Acesso em 12 maio 2023.

EFEITO Fotoelétrico: Postulados de Einstein. Produzido por Jorge Sá Martins. [s.l. s.n.], 9 ago. 2011. 1 vídeo (13 min). Publicado no Canal: FísicaModernaUFF. Disponível em: [https://youtu.be/gYTUfq5\\_z7M?si=BwlzIAF8APcJVyV7](https://youtu.be/gYTUfq5_z7M?si=BwlzIAF8APcJVyV7). Acesso em: 25 ago. 2023.

EINSTEIN, A. A. A teoria da radiação de Planck e a teoria do calor específico, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.27, n.1, p. 63-67, 2005.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**.29. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1979.

ESPECTROS Atômicos e Fórmula de Balmer-Rydberg. Produzido por Jorge Sá Martins. [s.l. s.n.], 23 mai. 2011. 1 vídeo (15 min). Publicado no Canal: FísicaModernaUFF. Disponível em: [https://youtu.be/lrZrVappmUs?si=XN9na4\\_eeRuoMJ\\_q](https://youtu.be/lrZrVappmUs?si=XN9na4_eeRuoMJ_q). Acesso em: 18 out. 2023.

FAYNGOLD, M; FAYNGOLD V. **Quantum Mechanics and Quantum Information-The Failure of Classical Physics**. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.

FELDENS, B.; DIAS, P. M. C.; SANTOS, W. M. S. E assim se fez o quantum. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 2, p. 1-11, 2010.

FEYNMAN, R. P; LEIGHTON, R.B; SANDS, M. **Lições de física de Feynman**, vol 2 p.430, Porto Alegre : Bookman, 2008.

**Física Moderna IF-UFRGS**. O Ano Miraculoso de Albert Einstein. Disponível em: [https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m\\_s03.html](https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m_s03.html). Acesso em 30 abr. 2023.

FREIRE, P. Pedagogia da autonomia – saberes necessários à prática educativa” 1ª ed. São Paulo:Editora Paz e Terra,1996.

FREIRE, P. Pedagogia do Oprimido. 12ª ed.,São Paulo:Editora Paz e Terra,1983.

FUNÇÃO Trabalho. Produzido por Jorge Sá Martins. [s.l.;s.n.],9 ago. 2011. 1 vídeo(8 min). Publicado no Canal: FísicaModernaUFF. Disponível em:<https://youtu.be/n-jOh0Qr2tQ?si=lsQL80Z7DrYiPcrF>. Acesso em: 25 ago. 2023.

GEIGER, H; MARSDEN, E.On a Diffuse Reflection of the  $\alpha$ -Particles. **The Royal Society**, vol. 82, n. 557, p. 495-500, 1909.

GERHARD, T.E; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C.; **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7ª Ed. Barueri: Atlas, 2023.

GILLIES, G. T. The Newtonian gravitational constant: recent measurements and related studies. Reports on Progress in Physics - **IOP Publishing**, 1996. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/60/2/001/pdf>. Acesso em: 14 dez. 2023.

GONTIJO, L. A.; RODRIGUES, C. G.; Radiação Térmica e a fórmula de Planck. **Química Nova**, v. 45, n. 10, p.1303-1314, 2022. <https://youtu.be/ueqVVa4iA24>. Acesso em: 22 abr. 2023.

GONZALEZ, J. P. D. Datas e personagens na História da Espectroscopia. **Universidade de São Paulo Instituto de Física de São Carlos – IFSC**, 2013. Disponível em: <https://www.ifsc.usp.br/~donoso/espectroscopia/Historia.pdf>. Acesso em: 16 jan 2024.

GRIFFITHS, D. J. **Mecânica Quântica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

GUPTA, S. V. **Units of Measurement- History, Fundamentals and Redefining the SI Base Units** 2ª Ed. New Delhi: Springer, 2020.

HARPER, E. Getting a Bang Out of Gamow. **GW Magazine**, p. 14, 2000.

HASTENREITER, R. S. C.*et al.* Discussões a respeito da natureza da ciência em atividades experimentais – A “materialidade” das linhas de campo elétrico e das superfícies equipotenciais. **Enseñanza de las ciencias**, nº extraordinário, p. 1197-1202, 2017.

HENTSCHEL, K; GREENBERGER, D; WEINERT, F. **Compendium of Quantum Physics: Concepts, Experiments, History and Philosophy**. 1ª Ed. Berlin, 2009

HODSON, H. Experiments in science and science teaching. **Educational Philosophy and Theory**, v. 20, p.53-66, 1988.

HOW the 3rd Law of Thermodynamics Made Einstein Famous. Produzido por Kathy Joseph. [s.l.;s.n.], 10 jul. 2019. 1 vídeo (18 min). Publicado no Canal: Kathy LovesPhysics&History. Disponível em: <https://youtu.be/ueqVVa4iA24?si=B0C01ZgB53ibMWDk>. Acesso em: 3 mai. 2023.

JUNIOR, O. P. **Outros caminhos relacionados com a Física Quântica**, 2021. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7683302/mod\\_resource/content/1/HFQ-03.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7683302/mod_resource/content/1/HFQ-03.pdf). Acesso em 25 out. 2023.

KERR, A. S. **Espalhamento de Luz na Atmosfera**, 2006. Disponível em: [http://www.fap.if.usp.br/~akerr/texto\\_luz.pdf](http://www.fap.if.usp.br/~akerr/texto_luz.pdf). Acesso em: 22 out. 2023

KRUGER, C. G.*et al.*Anarquismo Metodológico de Paul Feyerabend: abordagens na Ciência. **Revista Thema**, v. 15 n. 2 p. 539-552, 2018.

LANDIM, R. P; CARVALHO, H. R. **Cadernos de Metrologia – Especial SI/2019**. O Novo SI e Seu Impacto na Metrologia Elétrica no Brasil. Disponível em:

<http://www.inmetro.gov.br/imprensa/releases/cadernos-de-metrologia.pdf>. Acesso em 10 out. 2023.

LANDSMAN, K. **Foundations of Quantum Theory**– From Classical Concepts to Operator Algebras 1ª Ed. Cham: Springer, 2017.

**LED, Díodo emissor de luz.** Disponível em: [https://www.electronica-pt.com/led#google\\_vignette](https://www.electronica-pt.com/led#google_vignette). Acesso em 23 dez 2023.

LEDERMAN, N. G. **Concepções de alunos e professores sobre a natureza da ciência: uma revisão da pesquisa**, 1992. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tea.3660290404>. Acesso em 25 out 2023.

LEI DE DULONG-Petit e a equação de Einstein para as capacidades caloríficas. Produzido por Thiago. [s.l. s.n.], 27 mar. 2020. 1 vídeo (16 min). Publicado no Canal: Professor Thiago. Disponível em: <https://youtu.be/tlcMN0n2C5Y?si=cIRI5yJtlfHLzud>. Acesso em: 3 out. 0223.

LOPES, C. V. M.; MARTINS, R. A. **Uma lacuna na história dos modelos atômicos em livros didáticos: John William Nicholson e a astroquímica**, 2007. Disponível em: <https://fep.if.usp.br/~profis/arquivos/vienpec/CR2/p951.pdf>. Acesso em 13 jan 2024

LOPES, C. V. M; MARTINS, R. A. Hans Geiger e Ernest Marsden em Manchester (1909-1910): 100 anos dos “experimentos de Rutherford” com partículas  $\alpha$ . **Sociedade Brasileira de Química**, 2010. Disponível em: <http://sec.s bq.org.br/cdrom/33ra/resumos/T1680-1.pdf>. Acesso em: 13 set. 2023.

LORENZ, K.; MARQUES, J. G.; MONTEIRO, T. Diodos emissores de luz e iluminação. **Gazeta de Física. Sociedade Portuguesa de Física**, v. 39, n. 1 e 2, p.50-54, 2016.

LOVEJOV. B. Quinze fatos curiosos na História da Radiação. **Revista Despertar Científico** - Democratizando a Ciência, 2020. Disponível em: <https://revistadespertarcientifico.wordpress.com/2020/07/13/15-fatos-curiosos-na-historia-da-radiacao/>. Acesso em 24 jan. 2024

MARTINS, R. A. A descoberta dos raios X: O primeiro comunicado de Rontgen. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 20, n.4, 1998

MARTINS, R. A. Como Becquerel não descobriu a radioatividade. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. v. 7, p.27-45, 1990.

MATOS, M.; MORAIS, A. M. **Trabalho experimental na aula de ciências físico-químicas do 3º ciclo do ensino básico: Teorias e práticas dos professores**. Revista de Educação, 12(2), 75-93. 2004

MATTHEWS, M. R. "História, filosofia e ensino de ciências: a abordagem atual. **Revista de Pesquisa e Experiências de Ensino**, 1994, v.12, n.2, pp. 255-277.

MAX Planck Biography with Depth and Humor. Produzido por Kathy Joseph. [s.l.;s.n.], 7 mar. 2020. 1 vídeo (17 min). Publicado no Canal: Kathy LovesPhysics&History. Disponível em: <https://youtu.be/9hzw622nMIs?si=pLiyaX6TV2KxMoO4>. Acesso em: 30 abr. 2023.

MAX Planck Quantum Theory. Produzido por Kathy Joseph. [s.l.;s.n.], 21 fev. 2019. 1 vídeo (12 min). Publicado no Canal: Kathy LovesPhysics&History. Disponível em: [https://youtu.be/uMUi3o78qqQ?si=\\_eb56akBdcsvvy32](https://youtu.be/uMUi3o78qqQ?si=_eb56akBdcsvvy32) Acesso em: 30 abr. 2023.

MILYUKOV, V. Newtonian Gravitation Constant: History of Measurement and New Results. **International Conference on Precision Physics and Fundamental Physical Constants**, 2019. Disponível em: [https://indico.cern.ch/event/643043/contributions/3437463/attachments/1862313/3061059/Milyukov\\_FFK-2019.pdf](https://indico.cern.ch/event/643043/contributions/3437463/attachments/1862313/3061059/Milyukov_FFK-2019.pdf). Acesso em: 14 dez. 2023.

MODELO de Bohr para Espectros Atômicos. Produzido por Jorge Sá Martins. [s.l. s.n.], 7 jun 2011. 1 vídeo (8 min). Publicado no Canal: FísicaModernaUFF. Disponível em: [https://youtu.be/20drXpikjFA?si=iuh3e1NBKcQP\\_H7G](https://youtu.be/20drXpikjFA?si=iuh3e1NBKcQP_H7G). Acesso em: 18 out 2023.

MOREIRA, I. C. 1905: Um ano miraculoso, **Revista Ciência Hoje**, 2005. Disponível em: <https://cienciahoje.org.br/artigo/1905-um-ano-miraculoso/>. Acesso em 8 jun 2023.

MOREIRA, M. A. Unidades de ensino potencialmente significativas - UEPS. Aprendizagem Significativa em Revista, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 43-63, 2011. Disponível em: [http://www.if.ufrgs.br/asr/artigos/Artigo\\_ID10/v1\\_n2\\_a2011.pdf](http://www.if.ufrgs.br/asr/artigos/Artigo_ID10/v1_n2_a2011.pdf). Acesso em: 25 maio 2022.

MOREIRA, M. A. MANSINI, E. F. S. Aprendizagem Significativa: a teoria de David Ausubel. 2. Ed. São Paulo: Centauro, 2006.

MOREIRA, M. A. **Teorias de Aprendizagem**. 2ª Ed ampl., São Paulo: EPU. 2019.

MOREIRA, M. A. Partículas e Interações. **Física na Escola**, v. 5, n. 2, 2004.

MORRIS, M. **Uma Breve História do Infinito**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed, 1997.

MORTIMER, E. F. **Construtivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: Para onde vamos?** 1995. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/public/ensino/N1/2artigo.htm>. Acesso em 18 mar 2024.

MOURA, B. A. O que é natureza da Ciência e qual sua relação com a História e Filosofia da Ciência? **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 7, n. 1, p.32-46, 2014.

MUKUNDA, N. Max Planck – Founder of Quantum Theory. **Resonance**, p. 103-105, feb. 2008.

NAHAS, A. R. **Biologia Quântica**. Joinville: Clube de Autores, 2022.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: Ótica, Relatividade, Física Quântica**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1998.

O MILENAR caminho da luz - Da Luz ao Fóton, do Fóton à Mecânica Quântica. Produzido por José Abdalla Helayël-Neto. [s.l. s.n.], 24 out. 2021. 1 vídeo (81 min). Publicado no Canal: Professor Global. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=eT8gJBG\\_sK0&list=PL117KmmwT24ifF6qV2enXZh9leEyH3rwY&index=5](https://www.youtube.com/watch?v=eT8gJBG_sK0&list=PL117KmmwT24ifF6qV2enXZh9leEyH3rwY&index=5). Acesso em: 30 dez. 2022.

**O novo Sistema Internacional de Unidades.** SBM e SBF, 2019. Disponível em: [https://metrologia.org.br/wpsite/wpcontent/uploads/2019/07/Cartilha\\_O\\_novo\\_SI\\_29.06.2029.pdf](https://metrologia.org.br/wpsite/wpcontent/uploads/2019/07/Cartilha_O_novo_SI_29.06.2029.pdf) Acesso em 17 abr. 2023.

O Sistema Internacional de Unidades – Tradução Luso-Brasileira da 9ª Edição. **Inmetro e IPQ**, 2021. Disponível em: [https://www.gov.br/inmetro/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos-tecnicos-em-metrologia/si\\_versao\\_final.pdf](https://www.gov.br/inmetro/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos-tecnicos-em-metrologia/si_versao_final.pdf). Acesso em: 25 jan 2024

O'MARA, M. **The code** – Silicon Valey and the Remaking of America. New York: Penguin Press, 2019

OLIVEIRA, U. L. Abordagem da radioatividade nos livros didáticos de Química do PNLN 2015-2018, Campina Grande, 2019. Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática, UEPB.

OUDET, X. The Black Body and the Dulong and Petit Law, **Annales de la Fondation Louis de Broglie**, V. 30, no 1, 2005 P.97-107, 2005.

PARKHOMENKO, A.; SOBICZEWSKI, A. **Phenomenological formula for alpha-decay half-lives of heaviest nuclei**. Acta physica polonica B, v. 36, p. 3095, 2005.

PEREZ. S. **Mecânica Quântica**: Um curso para professores da Educação Básica. São Paulo: Editora Livraria de Física, 2016.

PERUZZO, J. **Experimentos de física básica: Eletromagnetismo, Física moderna e Ciências espaciais**. São Paulo: LF Editorial, 2013. P 278 a 281

PIEIDADE, M. **Raios catódicos**-Museu Faraday, 2023. Disponível em [https://museu.faraday.ist.utl.pt/Hist\\_Tecnology/Raios%20Cat%C3%B3dicos.pdf](https://museu.faraday.ist.utl.pt/Hist_Tecnology/Raios%20Cat%C3%B3dicos.pdf). Acesso em 24 jan 2024

PLANAS, O. Modelo atômico de Nagaoka, definição e características. **Energia Nuclear**, 2021. Disponível em: <https://pt.energia-nuclear.net/atomo/modelos-atomicos/nagaoka>. Acesso em 16 jan 2024

POSTULADOS de Einstein. Produzido por Jorge Sá Martins. [s.l.;s.n.], 9 ago 2011. 1 vídeo (13 min). Publicado no Canal: FísicaModernaUFF. Disponível em: [https://youtu.be/gYTUfq5\\_z7M](https://youtu.be/gYTUfq5_z7M). Acesso em 18 out 2023.

PRASS, A. R. **A origem da palavra fóton**. Disponível em: <https://fisica.net/mecanica-quantica/mecanica-quantica-a-origem-da-palavra-foton.php>. Acesso em 26 abr. 2023.

RADIAÇÃO de Corpo Negro, Lei da Radiação de Planck. Produzido por Vanderlei Salvador Bagnato [São Carlos: s.n.], 7 mai. 2016. 1 vídeo (43 min). Publicado no Canal CePOF-IFSC/USP Disponível em: <https://youtu.be/I9FyckUlid0?si=cGGwNWRTm44RQJKz>. Acesso em 12 set. 2023.

**Radioatividade – Departamento de física Nuclear – Instituto de física da USP.** Disponível em: <https://portal.if.usp.br/fnc/pt-br/p%C3%A1gina-de-livro/radioatividade>. Acesso em 12 set. 2023.

RESSURREIÇÃO, S. S. **Contribuições de John William Nicholson para o átomo de Bohr: O papel epistêmico do erro científico e suas implicações para o ensino de ciências**, Salvador, 2020. Dissertação de Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências, p.67, UFBA.

RIBEIRO, D., Johan Jacob Balmer, **Revista de Ciência Elementar**, v2(02):295, 2014.

RIBEIRO, D., Ludwig Boltzmann, **Revista de Ciência Elementar**, v1(1):084, 2013.

RIBEIRO, P. Ernst Mach. **Revista Ciência Elementar**, v. 2, n. 2, p. 185, 2014

ROCHA, J. F. *et al.* **Origens e evolução das idéias da física** 2ª Ed. Salvador: EDUFBA, 2015.

ROMANOWSKI, J. P.; VOSGERAU, D. S. R.. Estudos de revisão: implicações conceituais e metodológicas. **Revista Diálogo Educacional**, v. 14, n. 41, p. 165-189, 2014.

RONAN, C. A. **História ilustrada da ciência** – Universidade de Cambridge, vol IV. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1987.

RUTHERFORD, E ; SODDY, F. Radioactive Substances and Their Radiations. **Chemical Society Transactions** .Disponível em: <https://archive.org/details/radioactivesubst00ruthuoft>. Acesso em 13 set. 2023.

RUTHERFORD, E. The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and the Structure of the Atom. **Philosophical Magazine** .1911.Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1910.0038>. Acesso em: 13 set. 2023.

SANCHEZ, J. N. G. Dificuldades de aprendizagem e intervenção psicopedagógica. Porto Alegre: Artmed, 2004.

SARAIVA, M. F. S; FILHO, K. S. O; MULLER, A. M. **Espectroscopia**, 2014. Disponível em <https://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/Aula17-132.pdf>. Acesso em 04 set. 2023

SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. Alfabetização científica: Uma revisão bibliográfica. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 16, p. 59-77, 2011.

SCHULZ, P. A. Duas nuvens ainda fazem sombra na reputação de Lorde Kelvin **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, p. 509-512, 2007.

SEMICONDUTORES. Produzido por Gabriel Vinicios Silva Maganha. [s.l. s.n.], 8 fev. 2014. 1 vídeo (12 min). Publicado no canal: GV ensino. Disponível em: <https://youtu.be/snLCgz7W22Y?si=X18Lr3nIjmexfjYB>. Acesso em: 9 dez. 2023.

SHURKIN, J. N. Broken Genius: The Rise and Fall of William Shockley, Creator of the Electronic Age. London: Palgrave MacMillan, 2006.

SILVA, D. B; JUNIOR, F. F. B. Decaimento alpha: uma abordagem por tunelamento quântico. **Revista Princípios**, n. 46, 2019.

SILVA, S. C. R.; SCHIRLO, A. C. Teoria da aprendizagem significativa de Ausubel: Reflexões para o ensino de física ante a nova realidade social. **Imagens da Educação**, v.4(1), p. 36-42, 2014.

**Sistema Internacional de Unidades – INMETRO 2012**. Disponível em: [http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/si\\_versao\\_final.pdf](http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/si_versao_final.pdf). Acesso em: 10 set. 2023.

SOLOMON, J. **Teaching children in the laboratory**. London: Croom Helm, 1980.

SPECTROSCOPY Transformed Astronomy, Chemistry and Physics. Produzido por Kathy Joseph. [s.l.;s.n.], 29 jan. 2019. 1 vídeo (12 min). Publicado no Canal: Kathy LovesPhysics&History. Disponível em: <https://youtu.be/TFP55200MPY?si=OoviMGUEU9B06tNL1>. Acesso em: 30 abr. 2023.

TEIXEIRA, E. S.; JUNIOR, O. F.; EL-HANI, C. N. A influência de uma abordagem contextual sobre as concepções acerca da natureza da ciência de estudantes de física. **Ciência e Educação**, v. 15, n.3, p. 529-556, 2009.

TEIXEIRA, O.; PINHEIRO, N. A. M.; BRANDALISE, M. A. T. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) e o processo de avaliação das aprendizagens: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Meta: Avaliação**: Rio de Janeiro, v. 49, p. 710-736, 2023.

TERMODINÂMICA de um gás e Lei de Dulong-Petit. Produzido por Vanderlei Salvador Bagnato [São Carlos: s.n.], 27 mai. 2020. 1 vídeo (24 min). Publicado no Canal CePOF-IFSC/USP Disponível em: <https://youtu.be/EKDnqZXcFAs?si=F--m7fa9cbmDmw3Y>. Acesso em 12 set. 2023.

TIPLER, P. A. **Física**: para cientistas e engenheiros, vol 4, 3ª Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1995.

TUNELAMENTO de Barreira. Produzido por Jorge Sá Martins. [s.l. s.n.], 4 mar. 2014. 1 vídeo (7 min). Publicado no Canal: Física Moderna UFF. Disponível em: <https://youtu.be/DAFD9UZixhQ?si=8Kow6zCA6wVQDeuw>. Acesso em: 25 ago. 2023.

ZANATTA, A. R.; COBO M. F. **Constante de Planck**, 2013. Disponível em: [https://www.ifsc.usp.br/~lavfis/lavfiswp/wp-content/uploads/2017/06/CtePlanck\\_1.pdf](https://www.ifsc.usp.br/~lavfis/lavfiswp/wp-content/uploads/2017/06/CtePlanck_1.pdf). Acesso em 17 out 2023.

## **APÊNDICE A – Produto Educacional**

O Apêndice a seguir apresenta o PRODUTO EDUCACIONAL de forma independente desta Dissertação de Mestrado. O objetivo é facilitar seu manuseio, bem como atender as normas do Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF) da Sociedade Brasileira de Física (SBF).



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO  
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA  
POLO 30

**CHARLES CORDEIRO DA SILVA**

**PRODUTO EDUCACIONAL**

PRELÚDIO DO QUANTUM:  
AS CINCO RACHADURAS NA FÍSICA CLÁSSICA QUE LEVARAM À TEORIA  
QUÂNTICA

Rio de Janeiro  
2024

Charles Cordeiro da Silva

PRELÚDIO DO QUANTUM:  
AS CINCO RACHADURAS NA FÍSICA CLÁSSICA QUE LEVARAM À TEORIA  
QUÂNTICA

Este produto educacional é parte integrante da dissertação: PRELÚDIO DO QUANTUM: AS CINCO RACHADURAS NA FÍSICA CLÁSSICA QUE LEVARAM À TEORIA QUÂNTICA, desenvolvida no âmbito do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 30 – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:  
Prof. Dr. Satheeshkumar Veerahanumakkanapalya Honnappa

Rio de Janeiro  
2024

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha esposa Jaciara, pelo suporte a este trabalho e pela compreensão diante dos difíceis momentos, o que proporcionou a calma e a motivação imprescindíveis.

À minha filha Pâmella, pela paciência ante minhas inquietações e o bom humor, combustível para esta missão.

Ao meu filho Paulo Victor, que apesar de sua juventude, foi meu modelo de resiliência e serenidade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Satheeshkumar Veerahanumakkanapalya Honnappa por acreditar na proposta deste trabalho e conduzir o processo de elaboração com extrema maestria.

Ao meu grande amigo Gilvan, pelo experiente e acolhedor auxílio em algumas fases de produção deste Produto Educacional.

À equipe de Física e à Direção do Campus Niterói-RJ do Colégio Pedro II, pelo apoio e suporte.

Ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF, à Sociedade Brasileira de Física - SBF e à Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – UNIRIO, que tornaram este projeto possível.

A toda equipe de professores do MNPEF do pólo 30, pelos ensinamentos e contribuições para a presente proposta.

Ao Prof. Dr. Eduardo Lima Rodrigues pela Coordenação do MNPEF no pólo 30, abrigo deste projeto.

Aos meus colegas do Mestrado pelos excelentes momentos, que seguramente me incentivaram a continuar nesta caminhada de maneira segura.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Relógio Astronômico de Praga .....	211
Figura 2 - Membros da CIPM de 1894 e 26ª CGPM/2018 e Marselles .....	218
Figura 3 - Escritório Geral de Pesos e Medidas - BIPM .....	218
Figura 4 - Organograma da Convenção do Metro .....	219
Figura 5 - As mudanças no Sistema Internacional de Unidades .....	223
Figura 6 - A Radiação do Corpo Negro .....	224
Figura 7 - Os problemas não solucionados pela Teoria Clássica.....	227
Figura 8 - O Efeito Fotoelétrico .....	243
Figura 9 - Esquema experimental de Hertz .....	247
Figura 10 - Esquema experimental de Phillip Lenard.....	251
Figura 11 - Capacidade Térmica dos sólidos .....	258
Figura 12 - A Conferência de Solvay de 1911.....	266
Figura 13 - O calor específico para Einstein .....	268
Figura 14 - O espectro visível do sol .....	270
Figura 15 - Espectro de absorção e emissão.....	271
Figura 16 - Espectro de absorção e emissão do Hidrogênio.....	273
Figura 17 - Tabela Periódica com linhas espectrais de emissão dos elementos ...	284
Figura 18 - Abstração do mundo em escalas atômicas.....	285
Figura 19 - Penetrabilidade das radiações.....	293
Figura 20 - Mapa Conceitual das das Interações Fundamentais .....	295
Figura 21 - Modelo Padrão das Partículas Elementares .....	296
Figura 22 - Compton, Heisenberg, Dirac e Hund em Chicago (1929).....	297
Figura 23 - 7ª Conferência de Solvay.....	299
Figura 24 - Uma abstração quântica .....	316
Figura 25 - Relógio Astronômico de Praga .....	322
Figura 26 - A Radiação do Corpo Negro .....	327
Figura 27 - O Efeito Fotoelétrico .....	333
Figura 28 - Capacidade Térmica dos sólidos .....	338
Figura 29 - Abstração do mundo em escalas atômicas.....	343
Figura 30 - O espectro visível do sol .....	348
Figura 31 - A segunda Revolução Científica .....	354
Figura 32 - Cristal semiconductor puro de Silício.....	362
Figura 33 - Cristal de Silício dopado com Arsênio.....	363

Figura 34 - Cristal de Silício dopado com Boro .....	363
Figura 35 - Polarização reversa de um diodo.....	364
Figura 36 - Polarização direta de um diodo.....	365
Figura 37 - Tabela com características de LEDs.....	366
Figura 38 - Zona de funcionamento do LED.....	367
Figura 39 - Aparato experimental para o LED vermelho .....	371
Figura 40 - Aparato experimental para o LED laranja .....	373
Figura 41 - Aparato experimental para o LED verde .....	376
Figura 42 - Aparato experimental para o LED azul .....	378
Figura 43 - Aplicativo para obtenção do comprimento de onda .....	382
Figura 44 - Esquema do Circuito Elérico .....	384

### LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação de massa das cópias do IPK .....	221
Gráfico 2 - Lei de Rayleigh-Jeans .....	233
Gráfico 3 - Lei de Wien.....	234
Gráfico 4 - Lei dodeslocamento de Wien .....	240
Gráfico 5 - Gráfico $i \times V$ para dois valores de intensidade de luz .....	253
Gráfico 6 - Dados obtidos por Millikan para Potencial de corte vesus frequência...257	
Gráfico 7 - Dados de Weber (1872) para a capacidade térmica do diamante.....260	
Gráfico 8 - Capacidade térmica admensional dividida por 3 em função da temperatura segundo modelos de Einstein, Debye e Dulong-Petit .....	263
Gráfico 9 - Espectros do átomo de Hidrogênio.....	275
Gráfico 10 - Diagrama de níveis de Energia do átomo de Hidrogênio .....	282
Gráfico 11 - Penetração em barreiras .....	300
Gráfico 12 - Barreira de Coulomb.....	301
Gráfico 13 - Primeira tomada de dados do LED vermelho .....	370
Gráfico 14 - Segunda tomada de dados do LED vermelho .....	370
Gráfico 15 - Primeira tomada de dados do LED laranja .....	372
Gráfico 16 - Segunda tomada de dados do LED laranja .....	373
Gráfico 17 - Primeira tomada de dados do LED verde.....	375
Gráfico 18 - Primeira tomada de dados do LED verde.....	375

Gráfico 19 - Primeira tomada de dados do LED azul .....	377
Gráfico 20 - Segunda tomada de dados do LED azul .....	378
Gráfico 21 - Potencial elétrico versus intensidade de corrente elétrica .....	380
Gráfico 22 - Potencial elétrico versus intensidade de corrente.....	380
Gráfico 23 - Potencial de corte em função da frequência.....	381

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução nos acerto no Quiz 0 após as aulas .....	206
Tabela 2 - Percentual de acertos após cada aula .....	207
Tabela 3 - Constantes definidoras das unidades básicas do SI.....	214
Tabela 4 - Dados originais de Dulong e Petit : Capacidade calorífica em J/K.mol ..	260
Tabela 5 e 6 - Dados referentes ao LED vermelho .....	369
Tabela 7 e 8 - Dados referentes ao LED laranja .....	372
Tabela 9 e 10 - Dados referentes ao LED verde .....	374
Tabela 11 e 12 - Dados referentes ao LED azul .....	377
Tabela 13 - Erros percentuais da constante de Planck .....	379
Tabela 14 - Potencial de corte em função da frequência .....	381

## SUMÁRIO GERAL

<b>1. APRESENTAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL.....</b>	<b>194</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>197</b>
<b>2.1 CORRENTES FILOSÓFICAS E TEORIAS DE APRENDIZAGEM .....</b>	<b>198</b>
<b>2.2 UNIDADES DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVAS – UEPS ..</b>	<b>202</b>
<b>3. O PRODUTO EDUCACIONAL .....</b>	<b>208</b>
<b>Capítulo 1 - As constantes Fundamentais da Natureza e o Sistema Internacional de Unidades.....</b>	<b>211</b>
<b>1.1 - AS CONSTANTES DA NATUREZA .....</b>	<b>212</b>
1.1.1 - AS CONSTANTES FUNDAMENTAIS DA NATUREZA .....	212
<b>1.2 - O ENSINO DE FÍSICA, A METROLOGIA E O QUANTUM .....</b>	<b>215</b>
<b>1.3 - O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.....</b>	<b>217</b>
<b>1.4 - AS MUDANÇAS NO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES .....</b>	<b>220</b>
1.4.1 - O QUILOGRAMA.....	220
1.4.2 - O AMPERE .....	221
1.4.3 - O KELVIN .....	221
1.4.4 - O MOL .....	222
1.4.5 - O SEGUNDO .....	222
1.4.6 - O METRO .....	222
1.4.7 - A CANDELA.....	223
<b>Capítulo 2 - Radiação do corpo negro: A quebra da continuidade e a origem da Energia Quântica.....</b>	<b>224</b>
<b>2.1 O QUANTUM E A SOLUÇÃO DE FALHAS NA TEORIA CLÁSSICA.....</b>	<b>225</b>
<b>2.2 A LEI DE RAYLEIGH – JEANS .....</b>	<b>232</b>
<b>2.3 A LEI DE WIEN .....</b>	<b>233</b>
<b>2.4 A SOLUÇÃO TEÓRICA DE PLANCK PARA ADEQUAÇÃO AOS DADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>235</b>
<b>2.5 DE PLANCK A RAYLEIGH – JEANS .....</b>	<b>238</b>
<b>2.6 LEI DO DESLOCAMENTO DE WIEN A PARTIR DE PLANCK .....</b>	<b>239</b>
<b>2.7 A VISITA DE RUBENS, O CHÁ DA TARDE DE DOMINGO E OS QUANTA .....</b>	<b>240</b>
<b>Capítulo 3 - Efeito fotoelétrico: A inadequação ao Eletromagnetismo Clássico e o nascimento do Fóton.....</b>	<b>243</b>
<b>3.1 O ANNUS MIRABILIS DE 1905 .....</b>	<b>244</b>
<b>3.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS .....</b>	<b>245</b>
<b>3.3 DISPERSÃO DE RAYLEIGH .....</b>	<b>249</b>
<b>3.4 A EXPERIÊNCIA DE LENARD .....</b>	<b>251</b>

<b>3.5 OS POSTULADOS DE EINSTEIN E A EQUAÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO.....</b>	<b>254</b>
<b><i>Capítulo 4 - Capacidade Térmica dos sólidos e a Lei de Dulong – Petit: A rachadura oculta na Termodinâmica e os primórdios da Física da Matéria Condensada.....</i></b>	<b>258</b>
<b>4.1 A LEI DE DULONG - PETIT .....</b>	<b>259</b>
<b>4.2 CAPACIDADE TÉRMICA.....</b>	<b>261</b>
<b>4.3 A SOLUÇÃO DE ENSTEIN.....</b>	<b>262</b>
<b>4.4 WALTHER NERNST TORNA EINSTEIN FAMOSO .....</b>	<b>265</b>
<b><i>Capítulo 5 - Espectros de Emissão e Absorção do Hidrogênio: A falha da Óptica Clássica e a detecção de impressões digitais quânticas .....</i></b>	<b>270</b>
<b>5.1 ESPECTROS DE EMISSÃO E ABSORÇÃO .....</b>	<b>270</b>
<b>5.2 AS LINHAS DE BALMER .....</b>	<b>272</b>
<b>5.3 A ESPECTROSCOPIA E OS MODELOS ATÔMICOS DE THOMSON, NAGAOKA, JESSUP E NICHOLSON .....</b>	<b>275</b>
<b>5.4 O ÁTOMO DE RUTHERFORD.....</b>	<b>279</b>
<b>5.5 O ÁTOMO DE BOHR E A EXPLICAÇÃO PARA AS LINHAS .....</b>	<b>280</b>
<b><i>Capítulo 6 - Radioatividade: A deterioração do determinismo e a descoberta da Física Nuclear .....</i></b>	<b>285</b>
<b>6.1 OS RAIOS CATÓDICOS.....</b>	<b>286</b>
<b>6.2 OS RAIOS X.....</b>	<b>287</b>
<b>6.3 A ORIGEM DA RADIOATIVIDADE.....</b>	<b>288</b>
<b>6.4 TUNELAMENTO QUÂNTICO E O DECAIMENTO ALFA.....</b>	<b>296</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b><i>Produto Educacional - Segunda parte .....</i></b>	<b>302</b>
<b>1. OBJETIVOS.....</b>	<b>303</b>
<b>2. QUESTIONÁRIO INTRODUTÓRIO .....</b>	<b>304</b>
<b><i>Aula 1 - Contexto histórico – Cinco problemas solucionados pela Mecânica Quântica.....</i></b>	<b>316</b>
<b><i>Aula 2 - O Sistema Internacional de Unidades e as Constantes Fundamentais da Natureza .....</i></b>	<b>322</b>
<b><i>Aula 3 - Radiação do Corpo Negro .....</i></b>	<b>327</b>
<b><i>Aula 4 - Efeito Fotoelétrico.....</i></b>	<b>333</b>
<b><i>Aula 5 - Capacidade Térmica dos sólidos.....</i></b>	<b>338</b>
<b><i>Aula 6- Radioatividade.....</i></b>	<b>343</b>
<b><i>Aula 7 - Espectros de Emissão e Absorção.....</i></b>	<b>348</b>
<b><i>Aula 8 - A Mecânica Quântica .....</i></b>	<b>354</b>
<b><i>Produto Educacional - Terceira parte.....</i></b>	<b>360</b>

<b>1. FUNDAMENTOS .....</b>	<b>361</b>
<b>2. OBTENÇÃO DA CONSTANTE DE PLANCK ATRAVÉS DE EXPERIMENTO UTILIZANDO LED .....</b>	<b>368</b>
2.1 LED vermelho.....	369
2.2 LED Laranja.....	372
2.3 LED Verde.....	374
2.4 LED Azul .....	377
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAS SOBRE O EXPERIMENTO .....	379
<b>3. ROTEIRO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>383</b>
3.1 Objetivos: .....	383
3.2 Materiais .....	383
3.3 Montagem:.....	383
3.4 Medida do Comprimento de Onda do LED .....	384
3.5 Calculando as freqüências das ondas:.....	384
3.6 Tomando as medidas: .....	385
3.7 Traçando os gráficos utilizando o Excel da Microsoft: .....	385
3.8 Calculando a Constante de Planck: .....	386
3.9 Erro experimental .....	386
3.10 Montando o gráfico Potencial de Corte em função da Freqüência, utilizando o Excel da Microsoft: .....	387
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>387</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>389</b>

## 1. APRESENTAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Olá, caríssimos professores.

Apresentamos aqui nosso Produto Educacional, fruto de intenso trabalho e zelo, porém, leve por ter sido conduzido com muito carinho. Nossa proposta foi a concepção de um Produto apresentado em três partes perfeitamente conectadas, dado o grau de importância que o tema nos manifestou.

Nosso objetivo foi conceber um material que abordasse a importantíssima Teoria Quântica, tendo o Ensino Médio como alvo, contemplando tanto os alunos quanto os docentes.

Para a implementação deste Produto Educacional, ficou evidenciado que não há necessidade de grandes recursos. Assim, para ministrar as aulas da Sequência Didática, precisamos de um local para exposição com o devido equipamento de projeção e para o experimento da constante de Planck, alguns conectores, dois multímetros, pilhas e quatro LEDs. Ressaltamos também, que a falta de um Laboratório didático de Física não inviabiliza o experimento, que poderá ser realizado em sala de aula convencional.

O enigmático termo Mecânica Quântica atrai estudiosos, curiosos, místicos, e também atraiu este velho professor que há mais de trinta anos colabora com entusiasmo, na formação de parte de nossa sociedade.

A primeira parte do Produto Educacional se trata de um e-book de título: **“Prelúdio do Quantum: As Cinco Rachaduras na Física Clássica que levaram à Teoria Quântica”**. Neste livro abordamos cinco problemas sem embasamento teórico na Teoria Clássica e sem respostas até o final do século XIX, que só foram solucionados com o surgimento da Mecânica Quântica. Assim, discorreremos sobre a Radiação do Corpo Negro, Efeito Fotoelétrico, Linhas espectrais de emissão e absorção, Capacidade Térmica de sólidos a volume constante e Radioatividade. Ressaltemos que o título do e-book acima citado, é também, título da Dissertação e do conjunto das três partes do Produto Educacional.

Este primeiro segmento do Produto tem como destino o professor, mesclando recortes de História da Ciência e em alguns momentos, incrementos quantitativos.

Nos outros dois segmentos, o alvo final é o aluno, então, esforços pedagógicos são envidados nestas duas frações do Produto Educacional, para que o professor esteja apto para a importante tarefa educacional introdutória à Mecânica Quântica.

A segunda parte do Produto Educacional é uma Seqüência Didática “**O surgimento da Mecânica Quântica: Recursos pedagógicos para a sala de aula**”. Aqui nossa proposta foi apresentar o nascimento da Teoria Quântica sob uma óptica qualitativa, com linguagem adequada e atrativa. Nosso objetivo é convidar o aluno para um universo diferente do seu mundo real de dimensões visíveis, onde a física se baseia em observações lógicas com previsões concretas. Neste segundo momento do Produto, apresentamos aos alunos, as escalas subatômicas da matéria, onde as certezas desaparecem e a realidade desafia o senso comum. Abordaremos em uma Seqüência Didática de oito aulas em PowerPoint, os cinco problemas citados no e-book, além de tópicos de metrologia e conceitos básicos da Teoria Quântica.

Para cada aula são disponibilizados dois links. O primeiro conduz o professor-leitor ao conjunto de slides que compõem o assunto. O segundo link direciona o leitor a um vídeo produzido pelo autor, que apresenta a respectiva aula disponibilizando dicas, ideias que fomentaram a construção dos slides, além de curiosidades históricas que ilustram a aula.

Ainda neste segundo segmento do Produto Educacional, são apresentados nove questionários. O primeiro de caráter investigativo, composto de quarenta questões, cinco de cada assunto, visa obter concepções prévias de nossos alunos. Este primeiro questionário é aplicado antes das oito aulas. Os demais questionários são aplicados após cada aula com dez perguntas cada, cinco repetidas e cinco inéditas. Com a comparação das respostas dos alunos às cinco perguntas repetidas de cada um dos oito assuntos, antes e depois de ministrar cada aula, constatamos que houve uma apreensão significativa do conteúdo da Seqüência Didática.

A terceira parte do Produto Educacional promove um coroamento da apresentação deste importante tópico de Física Moderna no Ensino Médio: a Mecânica Quântica. Trata-se de uma prática em laboratório didático: “**A Constante de Planck em um contexto pedagógico: Atividade experimental introdutória à Mecânica Quântica**”. Nesta última seção, apresentamos uma atividade testada com alunos do terceiro ano do Ensino Médio, que objetiva calcular o valor da constante

de Planck em laboratório, utilizando LED de várias cores. O aplicativo de celular Spectrometer, em sua versão gratuita, foi utilizado para se obter com boa precisão, as frequências das cores emitidas por cada LED.

Um pequeno embasamento teórico sobre semicondutores foi também disponibilizado neste terceiro momento do Produto, conduzindo ao entendimento do funcionamento do LED por fundamentos quânticos.

Apesar das três partes do Produto estarem conectadas pelo mesmo tema, sem descontinuidade entre eles, cada fração do Produto Educacional possui sumário e referências bibliográficas próprias. Porém as referências bibliográficas sobre o referencial teórico metodológico de Ensino-Aprendizagem encontram-se no final do corpo deste Produto Educacional.

Durante nossa pesquisa, corroboramos a importância que o assunto objeto desta Dissertação nos intuía, desde sua concepção e na fase de projeto. Ou seja, a robusta comprovação experimental consubstanciada nas aplicações da Mecânica Quântica que convivemos e que somos cotidianamente usufrutuários, sustentam a justificativa para o nosso Produto Educacional e para toda a Dissertação, que dá alternativa à limitação de estudar no Ensino Médio, a física concebida até o final do século XIX.

Esperamos que nosso objetivo tenha sido alcançado e desejamos um bom uso destes materiais por parte de professores e alunos por todo o Brasil. Estaremos à disposição para quaisquer esclarecimentos, através do e-mail [:prof.cordeiro@bol.com.br](mailto:prof.cordeiro@bol.com.br).

Cordialmente

Charles Cordeiro da Silva

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção registramos, na perspectiva de um leitor-docente, duas vertentes da fundamentação teórica: os pressupostos teóricos da Física com sua evolução conceitual e o sustentáculo pedagógico para a aplicação deste Produto Educacional.

O primeiro arcabouço teórico em relação à Física estará presente de forma mais contundente na primeira parte deste trabalho, essência deste Produto Educacional, o “Prelúdio do quantum: as cinco rachaduras na Física Clássica que levaram à Teoria Quântica”. Isto não significa que não teremos tópicos de Física abordados nas outras partes do Produto Educacional. Pelo contrário, na segunda parte, O surgimento da Mecânica Quântica: Recursos pedagógicos para a sala de aula; temos um arrazoado teórico de Física em todas as oito aulas da Seqüência Didática. O terceiro segmento do Produto Educacional, A Constante de Planck em um contexto pedagógico: Atividade experimental introdutória à Mecânica Quântica, também possui uma fundamentação teórica sobre semicondutores, diodos e especialmente sobre o LED.

A segunda vertente da fundamentação teórica, atinente aos aspectos pedagógicos deste trabalho, será apresentada abaixo.

O momento histórico na segunda metade do século XIX era incomum. Segundo Rocha *et al.* (2015), a Mecânica newtoniana reinava absoluta desde o século XVIII. Ela fora aprimorada por Kant (1724-1804), Lagrange (1736-1813), Laplace (1749-1827), e Hamilton (1805-1865) entre outros, e explicava os movimentos de todos os corpos neste planeta e fora dele. E ainda, segundo Gontijo e Rodrigues (2022), o ano de 1865 foi emblemático, quando baseados nos trabalhos empíricos de Michael Faraday (1791-1867), James Clerk Maxwell (1831-1879) unificou e equacionou os fenômenos elétricos e magnéticos, estabelecendo conexões elegantes entre as duas teorias. Registra-se também, a eclética e prodigiosa participação de Boltzmann, denotado nos seus trabalhos empíricos no eletromagnetismo, no seu protagonismo no surgimento da mecânica estatística, na organização da termodinâmica e na defesa inglória da existência de partículas menores na constituição da matéria. Estava estabelecida a Física Clássica e para alguns da comunidade científica da época, não existia nada mais a ser descoberto.

Mesmo com tantos avanços, cinco problemas não resolvidos pela Teoria Clássica e colocados aqui em ordem cronológica, intrigavam o meio acadêmico, a saber: o calor específico, segundo Rocha *et al* (2015), instituído em 1784 por Johan Gadolin (1760-1852) apresentava para os sólidos, valores discrepantes em baixas temperaturas (Lei empírica de Dulong-Petit 1819); o conflito da teoria com os dados empíricos da radiação do corpo negro (Kirchhoff 1860); a falta de uma explicação física para o espectro de emissão e absorção dos gases (Balmer 1885); a inexistência de um alicerce conceitual para o efeito fotoelétrico (1887- Hertz), e finalmente a radioatividade (1896 – Bequerel) que não encontrava sustentação teórica para a emissão de partículas alfa do núcleo atômico.

A busca por essas explicações fomentou uma forte mudança de paradigmas, que culminará na substituição do mundo determinístico da teoria clássica pelo universo probabilístico da mecânica quântica.

Em 1900, Planck resolve, segundo Rocha *et al* (2015), a discordância teórico-experimental da radiação do corpo negro, instituindo mesmo sem convicção própria, a quantização da energia. Einstein em 1905 e 1907, corroborando e encorajando Planck na introdução conceitual do quantum, descortina soluções para o efeito fotoelétrico, conforme Gontijo e Rodrigues (2022) e para o comportamento do calor específico a volume constante para sólidos, de acordo com Einstein (2005) e Oudet (2005), respectivamente, resolvendo duas das cinco questões.

Conforme acima descrito apresentaremos, fruto dos trabalhos de investigação em ensino de Física, alguns pressupostos teóricos que nortearam toda a nossa metodologia de trabalho e deram um sustentáculo pedagógico à Seqüência Didática a ser apresentada na segunda parte deste Produto Educacional.

## **2.1 CORRENTES FILOSÓFICAS E TEORIAS DE APRENDIZAGEM**

Este trabalho tem por principal mister, a apresentação de tópicos de Física Moderna para o Ensino Médio, parte integrante deste Produto Educacional, que se utilizará de estratégias que objetivam à aquisição plena de um determinado conhecimento, enriquecendo a estrutura cognitiva do nosso alvo: o aluno.

Neste diapasão, vemos a necessidade de conhecer com razoável profundidade, este terreno pedagógico como as correntes filosóficas e as teorias da

aprendizagem. Assim, após pesquisa sobre este importante e necessário campo, podemos estabelecer uma corrente e a teoria que se adequam ao tópico educacional Mecânica Quântica no Ensino Médio, objeto deste trabalho.

Moreira (2019) afirma que, uma teoria é uma sistematização de uma área do conhecimento, visando facilitar seu entendimento e nesse sentido, o mesmo autor especifica que uma teoria da aprendizagem é uma tentativa de organizar os conhecimentos relativos à aprendizagem. Assim, o uso de uma coerente Teoria da Aprendizagem ou Corrente Filosófica expõe o ponto de vista do professor sobre uma melhor abordagem, estabelece quais as variáveis relevantes a serem investigadas e quais as perguntas mais significativas desencadeadoras de um eficaz processo ensino-aprendizagem.

Com relação às várias Teorias da Aprendizagem (TA), capitaneadas por célebres autores; elas podem ser aglutinadas em três Correntes Filosóficas (CF), a saber: a Comportamentalista, a Cognitivista e a Humanista. Cabe ressaltar que nem sempre enquadramos uma TA em apenas uma CF. Segundo Moreira (2019), existem teorias ou autores “fronteiriços” como Hull (1884-195) e Hebb (1904-1985) que transitam entre a corrente Comportamentalista (Behaviorista) e a Cognitivista e ainda o próprio Freire (1921-1997) e Ausubel (1908-2008) que orbitam entre o Cognitívismo e o Humanismo. Faremos um breve relato sobre as principais Correntes Filosóficas, de acordo com Moreira (2019)

O Comportamentalismo (Behaviorismo) está calcado na observação das respostas dos alunos em face dos estímulos externos e as respectivas conseqüências, positivas ou negativas. Existe uma hierarquia entre professor e aluno e a aprendizagem se dá em sentido único. A avaliação consiste em verificar se ao final da intervenção do instrutor, o instruído adquiriu o devido comportamento esperado. Caso positivo, ocorreu a aprendizagem. Podemos citar como exemplo dessa corrente, Pavlov (1849-1936), Watson (1878-1958) e Thorndike (1874-1949).

O Cognitívismo enfatiza o ato de conhecer. Tem seu surgimento contemporâneo e em oposição ao behaviorismo. O foco está na atividade mental do aluno. Entre o estímulo e resposta está a conduta do aluno, influenciada por variáveis intervenientes como hábitos, crença, motivação, decisão e compreensão. A aquisição do conhecimento está no ato de pensar, pois os dois, aluno e conhecimento estão no mesmo patamar, tendo o professor como facilitador desta

aquisição. Como representantes desta corrente filosófica, temos mentores de teorias como Piaget (1896-1980), Bruner (1915-2016) e Vigotsky (1896-1934).

No Humanismo a ênfase do ensino é centrada no aprendiz, que no mesmo patamar do professor e junto dele, buscam o conhecimento. A auto-realização do aluno é primordial e na busca desse crescimento pessoal, são relevantes além do intelecto, seus sentimentos, pensamentos e ações. Kelly (1905-1967) e Rogers (1902-1987) são bons exemplos desta corrente.

Assim, ressalto que antes da execução deste trabalho, foi imprescindível a análise das características das principais Teorias de Aprendizagem e das Correntes Filosóficas. Porém os teóricos que, na visão deste professor/pesquisador, mais coadunam com assunto Mecânica Quântica no Ensino Médio, são autores que transitam em entre o Humanismo e o Cognitívismo, falamos da Aprendizagem Significativa idealizada por Ausubel (1908-2008) e Novak (1932- ).

No entanto, temos que dar vozes à multiplicidade de realidades encontradas pelos professores. Este espectro se manifesta nos indicadores coletivos e individuais dos alunos, nas regionalidades de nosso país, nas diferentes estruturas escolares e na individualidade do próprio docente em sua prática. Assim, o sustentáculo teórico da aplicação deste Produto Educacional, estruturados com a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e Novak, não supera o status de sugestão, bem porque, Moreira (2019) estabelece didaticamente, um rol de teorias de Aprendizagem e Correntes Filosóficas, onde o professor-leitor terá liberdade de escolha de embasamentos, em face daquelas peculiaridades.

A aprendizagem pode ser categorizada por aprendizagem cognitiva, afetiva e psicomotora. A primeira se estabelece pelo armazenamento organizado de informações na memória do aprendiz, enriquecendo a citada estrutura cognitiva. Focaliza a cognição, ou o ato de conhecer. A segunda categoria valoriza experiências como prazer, dor, satisfação, ansiedade, que evidentemente influenciam a aprendizagem. A terceira está relacionada às respostas musculares nas ações físicas de treino e prática.

A aprendizagem significativa apregoada por Ausubel (1918-2008) que prepondera neste trabalho, só pode ocorrer segundo Moreira (2019), se o aprendiz possui algum conhecimento prévio e, principalmente, se houver uma predisposição do mesmo para tal. Em outras palavras, é preponderante na aprendizagem, aquilo

que o aluno já sabe, cabendo ao professor aprimorar ou modificar tais concepções prévias.

Moreira (2019) faz uma distinção entre a Aprendizagem Significativa e, o ele que intitula Aprendizagem Mecânica. Na Significativa, o conteúdo apreendido ancora-se nos subsunçores que têm relação lógica com a nova informação. Na Mecânica, a aprendizagem nova tem pouca ou nenhuma interação com conceitos relevantes existentes na Estrutura Cognitiva e não se ligam a subsunçores, determinando um conhecimento sem longevidade. A Aprendizagem Significativa, de acordo com Silva e Schirlo (2014), é o processo pelo qual uma nova informação relaciona-se com um aspecto relevante existente na Estrutura Cognitiva do indivíduo, ou seja, nos Subsunçores. A Estrutura Cognitiva é uma estrutura hierárquica de conceitos que são representações de experiências sensoriais.

Podemos resumir que, para Ausubel, de acordo com Moreira (2019), existem condições para que ocorra a Aprendizagem Significativa. A primeira que o material a ser apreendido deve ser relacionável à Estrutura Cognitiva do aprendiz, ou seja, deve ser potencialmente significativo. A segunda que o aluno deve manifestar disposição para relacionar de maneira substantiva e não arbitrária o novo material, potencialmente significativo. E ainda, os chamados Organizadores Prévios, servem de âncoras iniciais para a nova aprendizagem e levam ao desenvolvimento de subsunçores que facilitem a aprendizagem subsequente. São materiais introdutórios utilizados antes do material principal, fazendo o papel de ponte cognitiva, ou, segundo Silva e Schirlo (2014), ativadores de subsunçores. Como exemplo de organizadores prévios temos fotos, filmes, questionários e experimentos.

Uma eficiente adoção deste Produto Educacional em sala de aula do Ensino Médio, pode se sustentar em nossa sugestão de escolha fronteiriça, entre o Cognitivismo e o Humanismo. Assim, além de Ausubel, cabe registrar mais um importante habitante dessa fronteira, Paulo Freire.

Freire (1983) define Educação Bancária, onde estudar é memorizar conteúdos depositados mecanicamente, sem significados. A compreensão e a significação não são requisitos, a memorização, sim. Se contrapondo de maneira positiva existe a Educação Dialógica, que apregoa o estudar com apropriação da significação dos conteúdos, que requer que o educando se assuma como sujeito do ato de estudar e adote uma postura crítica e sistemática.

A Educação Bancária anula ou minimiza o poder criador dos educandos, estimulando sua ingenuidade e não sua criticidade. Educar é depositar, transferir o conhecimento de quem tem para quem não tem. Cabe a este tipo de Educação, apassivar os passivos, adaptando-os ao mundo, quanto mais adaptados, mais educados. Neste diapasão, aponta Freire (1983), o papel do educador é conduzir seu aluno a uma consciência ingênua e não a uma consciência crítica, que tende a um simplismo na interpretação dos problemas, a aceitar formas massificadoras do comportamento, a ser frágil na discussão e a aceitar a realidade como imutável.

Freire (1996) relata que ensinar exige rigorosidade metódica, exige pesquisa, exige respeito aos saberes dos educandos, exige criticidade. Relata a importância do ensino pelo exemplo, exigindo a reflexão crítica pela prática. Ensinar exige comprometimento, curiosidade, liberdade e autoridade. Exige a consciência do inacabamento.

## **2.2 UNIDADES DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVAS – UEPS**

Moreira (2011) afirma que, indo de encontro à Aprendizagem Significativa, não raro vislumbramos professores transmitindo informações a serem memorizadas, que seguramente não serão longevas. Se por acaso forem apreendidas, tais informações terão duração até a próxima avaliação, coroando a chamada Aprendizagem Mecânica. Mitigações desse quadro poderiam surgir com a adoção de algumas abordagens sugeridas pelas teorias de aprendizagem ou com o acesso aos resultados das pesquisas em ensino, porém estes dois remédios por via de regra, não são utilizados. Assim, na intenção de promover mudança deste panorama, Moreira (2011) propõe a construção de Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS).

As UEPS são sequências de ensino que se contrapõem à citada Aprendizagem Mecânica e à Aprendizagem Bancária de Freire (1983), e que será utilizada por este autor-pesquisador na apresentação de conteúdos de Mecânica Quântica para alunos de Ensino Médio.

Bayer, Nunes e Manassi (2015) afirmam que de acordo com a literatura majoritária, para se conceber um material didático potencialmente significativo é de

fundamental importância a consideração dos conhecimentos prévios dos alunos e suas experiências de vida no contexto da sala de aula e fora dela.

De acordo com Moreira (2011), uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) deve ser concebida atendendo alguns princípios, como:

- O conhecimento prévio é a variável mais determinante na Aprendizagem Significativa.
- Aprender significativamente depende de ato volitivo do aluno.
- Organizadores prévios fazem ligação entre conhecimentos prévios e novos conhecimentos.
- Almeja-se que o professor proveja situações-problema para despertar aquela intencionalidade do aluno necessária para a aprendizagem significativa. Tais situações-problema podem funcionar como organizadores prévios e devem ser propostas em nível crescente de complexidade.
- A aprendizagem deve ser significativa e crítica, se distanciando da mecânica com memorização de respostas. O ensino tem como ponto central, o aluno.

Na visão deste autor-pesquisador, o tema deste trabalho intitulado Prelúdio do Quantum: As Cinco Rachaduras na Física Clássica que levaram à Teoria Quântica; se mostrava sedutor até para os mais indiferentes alunos. Isto talvez, por se tratar de um assunto muito expressado até por não especialistas e que ainda é fundamento de tecnologias que cotidianamente somos usuários.

Assim, diante de possibilidades concretas de sucesso de aprendizagem, apresentamos o assunto contido em uma Seqüência Didática sob uma estrutura que remete a UEPS, Unidades de Ensino Potencialmente Significativas.

Moreira (2011) sugere a adoção de passos para a construção de UEPS, o que inspirou este trabalho desenvolvido em três segmentos, que constituem o Produto Educacional. Podemos aqui, resumir tais passos:

1. Antes de qualquer ação deste professor-pesquisador, o tema Mecânica Quântica foi apresentado aos alunos e uma breve discussão foi desencadeada por alguns minutos, onde todos tinham total liberdade para quaisquer interveniências.

2. Um questionário (Quiz 0) com quarenta perguntas, cinco de cada um dos oito tópicos da matéria, foi apresentado aos alunos, visando-se obter as concepções prévias dos mesmos, coerentes ou não com os pressupostos teóricos do assunto em pauta. Neste momento foram apresentadas situações-problema como:

a) O que é Física Clássica? Quais são os cinco problemas não resolvidos pela Teoria Clássica? Que acontecimento desencadeou as respectivas soluções?

b) O que é uma constante fundamental? O que é o Sistema Internacional de Unidades? Qual a relação entre a Mecânica Quântica e as unidades das grandezas físicas fundamentais do Sistema Internacional?

c) O que é corpo negro? Qual sua relevância no contexto do surgimento da Teoria Quântica?

d) O que é Efeito fotoelétrico? Ele está presente no nosso cotidiano?

d) O que é calor específico? Conhece a Lei de Dulong – Petit?

f) Como e quando foi observada a radioatividade pela primeira vez? Qual a diferença da emissão radioativa e o raio x? Qual a relação da radioatividade e a Mecânica Quântica?

g) O que são linhas espectrais de emissão e de absorção? O que é espectroscopia? Qual sua relevância? Qual a relação da espectroscopia e a Mecânica Quântica?

h) O que é determinismo e probabilismo no contexto das teorias clássica e quântica? O que é princípio da incerteza? O que é dualidade no contexto da teoria quântica? O que é emaranhamento quântico? O que é tunelamento quântico?

3. Evidentemente que os questionamentos acima foram feitos com linguajar adequado, de maneira leve e com o propósito de despertá-los para um assunto cotidiano e midiático. Nesse momento, foi questionado: Por que a Física Quântica tem esse nome? O que significa o termo quântico? Utilizando poucos minutos o termo foi esclarecido, o que foi um excelente organizador prévio.

4. Em caráter introdutório ao tema geral e em outro dia, foi apresentada a aula 1 sob o título: Contexto Histórico da Física Quântica - Cinco problemas solucionados pela Mecânica Quântica. Esta aula consiste de uma exposição oral

com utilização de PowerPoint com um pequeno questionário de dez perguntas (Quiz 1), cinco inéditas e cinco apresentadas no primeiro questionário (Quiz 0).

Também de forma introdutória é apresentada nos mesmos moldes a aula 2: O Sistema Internacional de Unidades e as Constantes Fundamentais da Natureza. Em seguida é respondido pelo aluno, o quiz 2 com dez perguntas, cinco inéditas e cinco repetidas.

5. Na sequência, foram apresentadas as aulas 3 a 7, onde estavam presentes os tópicos principais da seqüência didática, apresentados em um grau de complexidade um pouco maior. Todas as aulas também estavam em PowerPoint e ao final de cada aula, temos os questionários de dez questões, ou seja, do Quiz 3 ao Quiz 7. Cabe ressaltar que as situações-problema supracitadas começam a encontrar respostas gradativamente. Com o intuito de promover interações e integração ao conteúdo, foi realizado um experimento em laboratório didático de Física, quando foi calculada a constante de Planck utilizando-se LEDs, descrito na terceira parte deste Produto Educacional.

6. Concluindo a apresentação deste assunto, a última aula de número oito sob o título: A Mecânica Quântica, foi ministrada. Em face de no decorrer do desenvolvimento da seqüência didática ter havido a familiarização por parte do aluno, de tópicos pré-requisitos, naturalmente viabilizou-se em um nível maior de complexidade em relação às aulas anteriores.

7. Com relação à avaliação da aprendizagem nesta UEPS, foi utilizada uma avaliação formativa e uma somativa. A primeira aconteceu ao final de cada aula, desde a aula 1 até a aula 7. A segunda, além de estar presente na prática experimental de cálculo da constante de Planck, foi aplicada ao final da aula 8, por se tratar da aula que consolida toda a seqüência didática.

8. Foi evidenciado êxito nesta UEPS, em face do excelente desempenho mostrado nas tabelas abaixo. A tabela 1 descreve a evolução no percentual de acertos dos alunos nas 40 questões antes e depois das aulas, cinco questões de cada assunto. A segunda tabela mostra o percentual de acertos por parte dos alunos, das cinco questões inéditas ao final de cada aula.

Tabela 1 - Evolução nos acertos do Quiz 0 após as aulas

Quiz 0							
Nº de ordem	Acertos antes da aula	Acertos após a aula	$\Delta\%$	Nº de ordem	Acertos antes da aula	Acertos após a aula	$\Delta\%$
<b>1</b>	24,5%	79,2%	+ 54,7%	<b>21</b>	61,2%	98,0%	+36,8%
<b>2</b>	40,8%	83,3%	+ 42,5%	<b>22</b>	44,9%	86,0%	+ 41,1%
<b>3</b>	34,7%	85,4%	+ 50,7%	<b>23</b>	67,3%	96,0%	+ 28,7%
<b>4</b>	65,3%	83,3%	+18,0%	<b>24</b>	16,3%	82,0%	+ 65,7%
<b>5</b>	69,4%	83,3%	+13,9%	<b>25</b>	44,0%	55,1%	+11,1%
<b>6</b>	59,2%	93,6%	+34,4%	<b>26</b>	83,7%	100,0%	+ 16,3%
<b>7</b>	34,7%	76,6%	+41,9%	<b>27</b>	85,7%	93,2%	+ 7,5%
<b>8</b>	34,7%	78,7%	+44,0%	<b>28</b>	26,5%	95,5%	+ 69,0%
<b>9</b>	8,2%	87,2%	+79,0%	<b>29</b>	81,6%	100,0%	+ 18,4%
<b>10</b>	34,7%	89,4%	+54,7%	<b>30</b>	73,5%	88,6%	+ 15,1%
<b>11</b>	36,7%	90,0%	+53,3%	<b>31</b>	38,8%	94,0%	+ 55,2%
<b>12</b>	69,4%	86,0%	+16,6%	<b>32</b>	79,6%	98,0%	+ 18,4%
<b>13</b>	67,3%	94,0%	+26,7%	<b>33</b>	49,0%	94,0%	+ 45,0%
<b>14</b>	18,4%	88,0%	+69,6%	<b>34</b>	61,2%	86,0%	+ 24,8%
<b>15</b>	51,0%	89,0%	+38,0%	<b>35</b>	53,1%	94,0%	+ 40,9%
<b>16</b>	49,0%	94,0%	+45,0%	<b>36</b>	34,7%	93,9%	+ 59,2%
<b>17</b>	61,0%	90,0%	+29,0%	<b>37</b>	40,8%	51,0%	+ 10,2%
<b>18</b>	57,1%	82,0%	+24,9%	<b>38</b>	49,0%	89,8%	+ 40,8%
<b>19</b>	20,4%	84,0%	+63,6%	<b>39</b>	26,5%	79,6%	+ 53,1%
<b>20</b>	20,4%	86,0%	+65,6%	<b>40</b>	32,7%	89,8%	+ 57,1%

Fonte: O autor

Ao aplicar o primeiro questionário, intitulado de Quiz 0, com as mesmas questões feitas aos alunos antes e depois das aulas, verificamos na Tabela 1, significativo aumento no percentual de acertos em todas perguntas. Das 40 perguntas, 14 obtiveram um aumento percentual nos acertos superior a 50%, chegando a pergunta 9 a uma melhora percentual de 79%. Podemos também inferir sucesso na apresentação da sequência didática, pois em 35 das 40 questões, os

alunos alcançaram percentual de acertos acima de 80%, chegando a 100% de acertos nas respostas das perguntas 26 e 29.

Ainda de acordo com a Tabela 1, temos uma média no percentual de acertos por parte dos alunos, das 40 questões **antes** das aulas de 47,7%, e corroborando uma aprendizagem concreta, temos 87,2% **depois** das mesmas.

Tabela 2 - Percentuais de acertos após cada aula

<b>Quiz 1</b>		<b>Quiz 2</b>		<b>Quiz 3</b>		<b>Quiz 4</b>	
<b>nº</b>	<b>acertos</b>	<b>nº</b>	<b>acertos</b>	<b>nº</b>	<b>acertos</b>	<b>nº</b>	<b>acertos</b>
6	89,6 %	6	91,5 %	6	88,0 %	6	92,0 %
7	93,8 %	7	89,4 %	7	88,0 %	7	94,0 %
8	87,5 %	8	68,1 %	8	88,0 %	8	96,0 %
9	87,5 %	9	76,6 %	9	50,0 %	9	94,0 %
10	81,3 %	10	76,6 %	10	84,0 %	10	90,0 %
<b>Média</b>	<b>87,7%</b>	<b>média</b>	<b>80,4%</b>	<b>média</b>	<b>79,6%</b>	<b>média</b>	<b>93,2%</b>
<b>Quiz 5</b>		<b>Quiz 6</b>		<b>Quiz 7</b>		<b>Quiz 8</b>	
<b>nº</b>	<b>acertos</b>	<b>nº</b>	<b>acertos</b>	<b>nº</b>	<b>acertos</b>	<b>nº</b>	<b>acertos</b>
6	82,0 %	6	95,0 %	6	92,0 %	6	89,8 %
7	86,0 %	7	86,4 %	7	84,0 %	7	93,9 %
8	78,0 %	8	88,6 %	8	90,0 %	8	91,8 %
9	88,0 %	9	95,5 %	9	78,0 %	9	83,7 %
10	86,0 %	10	93,2 %	10	90,0 %	10	83,7 %
<b>média</b>	<b>84,0 %</b>	<b>média</b>	<b>91,7 %</b>	<b>média</b>	<b>86,8 %</b>	<b>média</b>	<b>88,6 %</b>
<b>Média total de acertos</b>				<b>86,5%</b>			

Fonte: O autor

Ao observar a tabela 2, verificamos o desempenho dos alunos nas questões apresentadas após a apresentação da sequência didática com 8 encontros, onde cada questionário (Quiz) composto de 10 perguntas era apresentado após cada aula. A ausência das cinco primeiras perguntas de cada questionário, se justifica por serem as mesmas apresentadas no Quiz 0, em um total de 40. Assim, foram 40 perguntas antes e depois das aulas e outras 40 perguntas somente depois das mesmas. Mais uma vez podemos evidenciar êxito na aplicação deste Produto

Educacional, quando após a apresentação de uma Sequência Didática, uma atividade de avaliação é aplicada com média de 86,5% de acertos por parte dos alunos.

### **3. O PRODUTO EDUCACIONAL**

#### **Produto Educacional - Primeira parte:**

# **Prelúdio do Quantum:**

**As Cinco Rachaduras na Física Clássica que levaram à  
Teoria Quântica**

## PREFÁCIO

Em regra, não percebemos que uma evolução conceitual apesar às vezes lenta, sempre é contínua. A história da ciência descreve alguns eventos revolucionários que alavancaram esta evolução. Em alguns momentos nos questionamos se de fato é importante os altos gastos com insumos de pesquisas. Por que investir em aceleradores de partícula, pomposos telescópios, salários com pesquisadores...? Para que Kirchhoff, Strutt e Wien, perderam dias estudando inocentemente um mero corpo aquecido? Por que Crookes e Roentgen ficaram aplicando altas tensões elétricas em tubos vazios? Não podemos saber a utilidade de algo, antes de sua descoberta.

A humanidade relata inúmeras e importantes descobertas ao acaso e pacientes em emergências de hospitais agradecem às pesquisas despretensiosas de Roentgen, de Hertz, de Thomsom, de Planck, de Einstein, de Bohr, de Schroedinger. Questionamentos, dilemas ou acidentes nos apresentaram os raios-X, o elétron, a radioatividade, o efeito fotoelétrico, o quantum, o fóton.

No nosso mundo real de dimensões visíveis, uma visão clássica da física foi sedimentada pelas previsões concretas motivadas por observações lógicas, incutindo um determinismo incontestável nos pensadores e produtores de ciência, diante de regras impostas pela natureza, simples e seguras. Porém se adentrarmos no universo de escalas atômicas e subatômicas da estrutura da matéria, as certezas desaparecem e a realidade desafia o senso comum, estamos no mundo da mecânica quântica, que propiciou um magnífico salto tecnológico modificando nossas vidas com o Laser, os exames de Ressonância Magnética, os dispositivos de armazenamento de dados de computadores e celulares, entre outras aplicações. Segundo Nahas (2022), a mecânica quântica está até na base da cadeia alimentar do planeta, ou seja, na fotossíntese. Assim, não cabe nos dias de hoje este monumental desconhecimento desta tão importante e bem sucedida área do conhecimento: a Teoria Quântica.

Este trabalho vislumbra apresentar cinco problemas que estavam sem soluções em face da incompletude da Teoria Clássica. A concepção do quantum, que abre as portas para uma segunda revolução científica, estabelece um aparato conceitual para a radiação do corpo negro, para o efeito fotoelétrico, para o

comportamento anômalo da capacidade térmica dos sólidos a volume constante em baixas temperaturas, para a compreensão das linhas espectrais de emissão e absorção e para a emissão alfa na radioatividade.

Nestes trinta anos de magistério, fui testemunha de uma natural mudança da sociedade e por conseqüência, do estudante. Ele é mais curioso e menos passivo, questionador que vive em simbiose com a ciência e tecnologia. Assim, nosso aluno está apto a compreender as supracitadas evoluções conceituais, de Aristóteles a Schrodinger e merece um ensino de Física que transcenda o século XIX.

## Capítulo 1 - As constantes Fundamentais da Natureza e o Sistema Internacional de Unidades

Figura 1 - Relógio Astronômico de Praga



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzMw&ctype=1-metrologia-pexels-andrea-piacquadio-820735+%282%29.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a50d2e771\\_581d2adbb4f25110934c6%40ip-10-81-5-121.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=2926062&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzMw&ctype=1-metrologia-pexels-andrea-piacquadio-820735+%282%29.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a50d2e771_581d2adbb4f25110934c6%40ip-10-81-5-121.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=2926062&accountId=0)

## 1.1 AS CONSTANTES DA NATUREZA

Na perspectiva da matemática, o termo constante define uma quantidade que não possui um valor fixo em uma equação ou em qualquer processo matemático, porém, esta quantidade não se altera em um contexto específico. Na física, o termo constante se relaciona com uma quantidade física ou numérica cujo valor independe das condições que um sistema esteja submetido permanecendo invariável no decorrer de um processo.

Uma constante física é uma grandeza física possuidora de dimensão mensurável como a velocidade da luz no vácuo ou adimensional como a razão entre a massa do próton e do elétron, ela ainda se apresenta com característica de valor geral na natureza e constante no tempo. Podemos vislumbrar uma constante física como uma característica de um material ou uma convenção como um calor específico ou a carga de um elétron. Temos as constantes que se relacionam diretamente a algum fenômeno na natureza ou a uma teoria física como mecânica quântica, a gravitação universal ou a relatividade. Podemos aglutinar estas constantes físicas em grupos bem definidos como as constantes físicas eletromagnéticas, as constantes físicas atômicas e nucleares, as constantes físico-químicas e finalmente as constantes físicas fundamentais da natureza.

Quando estudamos a eletricidade, por exemplo, é necessário utilizar a constante de Coulomb ( $k$ ) para calcular a força elétrica ou campo elétrico, porém  $k$  depende da permissividade no vácuo ( $\epsilon$ ) também constante, a qual, por sua vez, que depende da velocidade da luz ( $c$ ). Assim podemos perceber que uma constante física pode se conectar a outras constantes e transitar por diferentes áreas do conhecimento das ciências da natureza.

### 1.1.1 AS CONSTANTES FUNDAMENTAIS DA NATUREZA

Os valores das constantes fundamentais da física são ajustados a cada 4 anos pelo Grupo de Tarefa do Committee on Data for Science and Technology (CODATA), estabelecido em 1969, com precisão cada vez maior. O Grupo de Tarefa CODATA goza de um estreito relacionamento com o *Consultative Committee for Units* (CCU), uma organização da *International Bureau of Weights and*

*Measures* (BIPM), por existir uma profunda ligação com as unidades do Sistema Internacional (SI).

. Entre as ações do CODATA está a publicação periódica dos valores de constantes fundamentais e fatores de conversão de física e química para uso internacional em todos os campos da ciência e da tecnologia. A próxima Assembléia Geral da CODATA acontecerá de 27 a 28 de outubro de 2023 em Salzburgo, na Áustria.

Cientistas usam números para tentar descrever a natureza e comparar características dessa natureza umas com outras a partir de quantidades que configuramos como padrão. Assim, estes cientistas também constroem relações matemáticas entre quantidades de natureza, como a equação  $E = mc^2$ , que relaciona a energia  $E$ , a massa  $m$  de um objeto e a velocidade da luz no vácuo  $c$ . Certos valores, como o valor de  $c$  que é sempre o mesmo, aparecem freqüentemente multiplicando quantidades diferentes nas equações da física. Esses números em geral, são chamados de constantes fundamentais e de acordo com George Matsas, do Instituto de Física Teórica (IFT) da UNESP, buscam “escrever a física padrão da forma mais econômica possível, eliminando o desnecessário para enxergar mais longe”.

Excetuando a constante de Planck ( $h$ ) e a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ), não existe um consenso para descrever quais são as constantes fundamentais, porém, majoritariamente a comunidade científica inclui a esse rol, a constante de gravitação universal ( $G$ ) presente na Lei da gravitação universal newtoniana, que hoje possui valor de  $G = 6,674184 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ . Segundo Gillies (1996), a constante de gravitação universal, medida indiretamente com utilização de uma balança de torção em 1798 por Henry Cavendish (1731-1810), foi a constante da natureza que menos sofreu correções do decorrer do tempo, mesmo com o avanço tecnológico. Milyukov (2019) afirma que entre vários estudiosos no assunto, destacou-se o físico e matemático húngaro Lorand Eotvos (1848-1919) que em 1896 aprimorou a balança de torção estática de Cavendish, concebendo uma balança dinâmica ou pêndulo de torção. Este pêndulo permitiu a obtenção direta da constante de gravitação e também foi usado para provar a equivalência das massas inercial e gravitacional.

Segundo Gupta (2020), inclui-se em face da importância nas definições das unidades das grandezas fundamentais no Sistema Internacional de Unidades (SI), a

constante de Boltzmann ( $k_B$ ), a constante de Avogadro ( $N_A$ ), a carga elétrica elementar ( $e$ ), a frequência da transição hiperfina do estado fundamental não perturbado do átomo de césio 133 ( $\Delta\nu_{Cs}$ ) e a eficácia luminosa de uma radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  Hz ( $K_{cd}$ )

A velocidade da luz no vácuo vale  $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e teve seu valor medido desde a antiguidade por muitos, mas um valor mais preciso foi obtido a partir das equações de Maxwell (1831-1879) e em 1926, com Albert Michelson (1852-1931).

Estabelecida por Planck (1858-1947) e batizada por Bohr (1885-1962) em artigo publicado em 1913, a constante de Boltzmann, de fundamental importância na termodinâmica homenageia um dos mais importantes cérebros que passaram por este planeta, Ludwig Boltzmann (1844-1906). Seu valor é  $k_B = 1,380649 \times 10^{-23}\text{ m}^2\text{ kg s}^{-2}\text{ K}^{-1}$ . A constante de Planck, que iremos obter neste trabalho seu valor experimental utilizando LEDs, fora idealizada pelo citado físico teórico alemão e promoveu a grande mudança de paradigma na ciência, que alavancou os avanços tecnológicos cotidianos. O valor atualizado da constante  $h$  (*hilfgröÙe – variável auxiliar em alemão*) é  $6,62607015 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$ .

Gupta (2020) descreve em quadro abaixo, as constantes fundamentais da natureza e seus valores, que dão base às unidades das grandezas físicas fundamentais do Sistema Internacional de Unidades (SI):

Tabela 3 - Constantes definidoras das unidades básicas do SI

Defining constant	Magnitude in SI units	SI base unit
Unperturbed ground-state hyperfine frequency transition of $^{133}\text{Cs}$ atom $\Delta\nu_{Cs}$	$9192\,631\,770\text{ s}^{-1}$	Second
Velocity of light in vacuum $c$	$299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	Metre
Planck's constant $h$	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	Kilogram
Elementary charge $e$	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19}\text{ A}\cdot\text{s}$	Ampere
Boltzmann constant $k$	$1.380\,649 \times 10^{-23}\text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	Kelvin
Avogadro number $N_A$	$6.022\,140\,76 \times 10^{23}$	Mole
Efficacy of monochromatic radiation of frequency $540 \times 10^{12}$ Hz, $K_{cd}$	$683\text{ lm W}^{-1},\text{ cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^3$	Candela

Fonte: GUPTA, S.V. Units of Measurement - History, Fundamentals and Redefining the SI Base Units 2ª Ed. New Delhi: Springer, 2020.

Cabe ressaltar que todas as constantes fundamentais da natureza pertencem a Física Clássica, com exceção da constante de Planck, a única que surge com o nascimento da Mecânica Quântica.

Além de ser incapaz de explicar o brilho do sol e sua coloração e ainda, o funcionamento de aparelhos eletrônicos; a Mecânica Clássica faz uma descrição superficial e aproximada dos fenômenos da natureza. Já a Mecânica Quântica vai dar uma explicação fundamental de todos os fenômenos, explicados ou não pela MC. Ou seja, a explicação física fundamental da natureza vem da Mecânica Quântica, portanto, a constante de Planck é a mais fundamental das constantes fundamentais da natureza.

Este trabalho também teve por escopo, pesquisar sobre a constante de Planck sobre seus pressupostos teóricos e empíricos, em um ponto de vista da pedagogia voltada para o Ensino Médio, idealizando uma atividade experimental que visa sua obtenção. Ainda neste contexto da teoria quântica, concebemos um produto que discorre sobre cinco problemas do século XIX não resolvidos pela teoria clássica e propomos uma seqüência didática introdutória da Mecânica Quântica neste segmento escolar.

## **1.2 O ENSINO DE FÍSICA, A METROLOGIA E O QUANTUM**

Fazemos medições a todo o momento como o tempo necessário para atravessar uma rua, nossa massa ao subir em uma balança e a velocidade para não ser multado. Segundo Ribeiro (2014), o físico e filósofo austríaco Ernst Mach (1838-1916) propunha que uma medida é fruto de uma comparação com as nossas sensações a partir de um padrão. A física é baseada em medições, mas as medidas são em última análise comparações fisiológicas. Aprender Física pressupõe fazer medidas e conviver com unidades desde a primeira aula de qualquer tópico desta quantitativa área do conhecimento.

As mudanças nas Unidades do Sistema Internacional de Unidades promoveram uma nova demanda no Ensino, com a inclusão de um *ator quântico* em algumas definições. A exemplo disto, Cacaís e Loayza (2019) citam a nova definição do quilograma, que antes era definido a partir de um protótipo internacional, um

cilindro de uma liga de platina e irídio e agora é definido a partir de uma constante fundamental da natureza, a constante de Planck, invariante no tempo e universal para quaisquer civilizações do Universo.

Para o público em geral, nenhuma mudança de rotina acontecerá, pois continuaremos a medir e reclamar dos valores da energia elétrica consumida, a pesar o mesmo tomate, a consumir o mesmo combustível e se atrasar no mesmo engarrafamento.

Kelvin em 1900 ao afirmar que “... *não há nada mais para descobrir na física. Tudo o que resta é fazer medições cada vez mais precisas*”; incorre em uma histórica contradição. Mudanças no SI não impactam somente os Institutos Nacionais de Metrologia. Seguramente podemos obstar Kelvin e inferir que a adição de mais casas decimais no valor final das medidas, que o aumento da exatidão e a precisão das medições, ajudam a promover novas descobertas e avanços tecnológicos em benefício da humanidade. Assim, nossos alunos do Ensino Médio precisam conhecer as constantes fundamentais em face das citadas mudanças.

Diariamente somos usufrutuários da Mecânica Quântica ao lado de nosso Smartphone, do nosso Laptop e ainda convivemos com os Raios-X, Ressonância Magnética, Células fotoelétricas, Sensores, Laser, etc. Estas novas tecnologias, que dela advieram, assim como a diversidade de fenômenos por ela explicados parecem justificar o estudo da Mecânica Quântica já no Ensino Médio. De acordo com Cauti (2022) em publicação na Revista Exame de maio de 2022, 23% das empresas globais desenvolvem projetos que programam tecnologias quânticas para aplicações comerciais. E ainda segundo Landi (2019), em fevereiro de 2019 estimava-se que pelo menos 30% do PIB mundial estejam diretamente relacionados à Mecânica Quântica. Em 13 de julho de 2023, havia seis empresas no mundo com valor de mercado superior a um trilhão de dólares. Cinco delas: Apple Inc (US\$ 2,996 T), Microsoft (US\$ 2,547 T), Alphabet - Google (US\$ 1,580 T), Amazon (US\$ 1,377 T) e NVIDIA (US\$ 1,135 T) simplesmente não existiriam sem a Mecânica Quântica.

A Sociedade Brasileira de Metrologia em conjunto com a Sociedade Brasileira de Física, ao publicarem uma Cartilha em 2019 sob o título: O novo Sistema Internacional de Unidades fazem uma importante consideração. Antes das mudanças instituídas pela 26ª CGPM/2018, nossos alunos após a leitura de um texto básico de ciências, conseguiam sem nenhum esforço para a percepção,

descrever o que era um quilograma, definido por um protótipo que ficava em um cofre em Paris. Agora, para ele definir a mesma unidade, serão necessários novos conhecimentos e um maior nível de abstração. Para a melhor compreensão das novas definições, todo aluno deve entender o significado geral das constantes fundamentais.

De acordo com a tabela acima, as Grandezas Físicas Fundamentais têm para o novo Sistema Internacional, unidades definidas pelas Constantes Fundamentais, invariáveis no tempo como a Constante de Planck, que agora define o quilograma.

Assim temos um desafio, de inserir nossos alunos em um contexto mais atual que transcende a visão clássica da ciência.

### 1.3 O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Uma unificação internacional nas unidades de medidas sempre foi uma grande demanda, sobretudo do comércio e posteriormente também da indústria, além da eficiência dos intercâmbios científicos. Por muito tempo, cada sociedade teve seu peculiar sistema de medidas, em geral com unidades primitivas baseadas em partes do corpo humano para a definição do comprimento, por exemplo. Em face das diferenças antropométricas dos soberanos, as medidas como pés, polegadas e jardas eram usadas praticamente de maneira regional. Existem relatos de que a primeira idéia de um sistema métrico seja de John Wilkins (1614-1672), primeiro secretário e um dos fundadores da Royal Society de Londres em 1668, porém a idéia não se consolidou e a Inglaterra continuou com os diferentes sistemas de pesos e medidas. Após a Revolução Francesa houve um abandono gradual destas medidas, com uma adoção de medidas baseadas em dimensões do planeta Terra.

A Convenção do Metro (*Convention du Mètre*) em 20 de maio de 1875, em Paris, que cria o Sistema Métrico Decimal. Segundo Landim e Carvalho (2019), o Brasil estava entre os 17 Estados Membros, pois D. Pedro II era um entusiasta em ciência e tecnologia. Os governos republicanos não ratificaram a adesão do país, o que ocorreu somente em 1953. A Convenção do Metro foi corroborada em 1889, quando foram definidos os protótipos internacionais de metro e quilograma na Primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), na mesma cidade. Isto foi

fomentador para a futura criação do Sistema Internacional de Unidades (SI) ocorrida na 11ª Conferência Geral de Pesos e Medidas em 1960.

Figura 2 - Membros da CIPM de 1894 e 26ª CGPM/2018 e Marselles



Fonte: <https://canalmetrologia.com.br/> e <http://www.kriss.re.kr/download/1542377872773.jpg>

Sob os termos da convenção do Metro (1875) foi instituído, segundo Landim e Carvalho (2019), o Bureau International des Poids et Mesures (Escritório Geral de Pesos e Medidas - BIPM), é uma das três organizações estabelecidas para manter o Sistema Internacional de Unidades (SI). Situado em Saint-Cloud, França, se constitui no o órgão técnico da Estrutura. Sua função precípua é desenvolver pesquisas e normas metrológicas e garantir a uniformidade, em todo o mundo, das unidades de medida, o que é feito pela ação direta ou submissão de propostas para a CGPM.

Figura 3 - Escritório Geral de Pesos e Medidas - BIPM



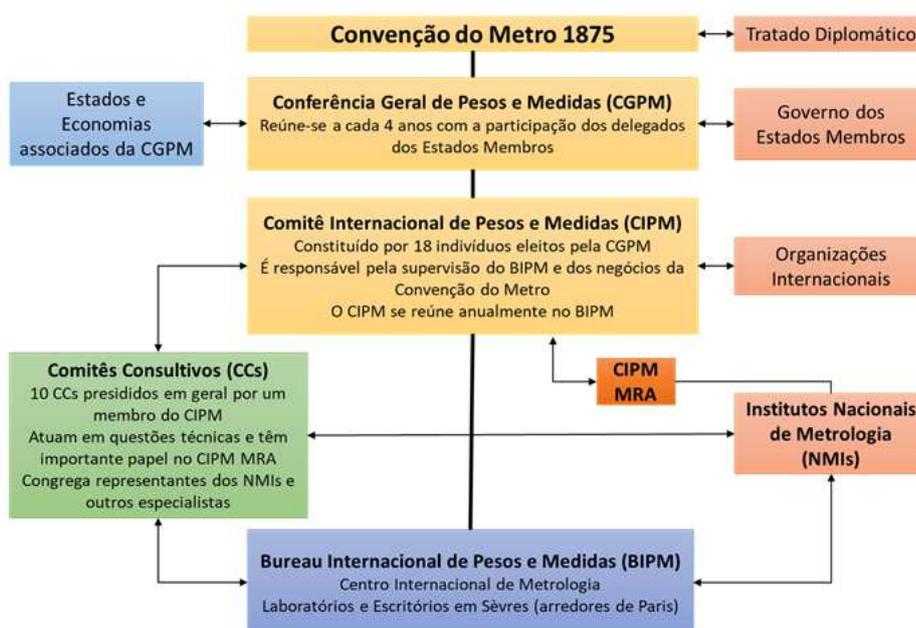
Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Escreit%C3%B3rio\\_Internacional\\_de\\_Pesos\\_e\\_Medidas](https://pt.wikipedia.org/wiki/Escreit%C3%B3rio_Internacional_de_Pesos_e_Medidas)

O segundo componente da Estrutura é a Conferência Geral dos Pesos e Medidas (*Conférence Générale des Poids et Mesures - CGPM*). Ocorre a cada quatro anos e é composta de delegados oficiais de Estados Membros da Convenção do Metro, sendo a maior autoridade internacional em metrologia, decidindo questões importantes como a adoção de novos padrões metrológicos.

O terceiro componente é o Comitê Internacional de Pesos e Medidas (*Comité International des Poids et Mesures– CIPM*). É composto de 18 membros cientistas e metrologistas, cada um de um Estado Membro diferente, e executa as decisões da CGPM. Realiza encontros anuais no BIPM, fazendo sua supervisão e emitindo relatórios referentes às situações administrativas e financeiras, direcionados aos governos dos países-membros da Convenção do Metro.

O sistema Internacional define sete unidades de grandezas físicas fundamentais, também chamadas grandezas de base, e outras unidades de várias grandezas que daí derivam. Conforme a publicação do Inmetro: Conferência Geral de Pesos e Medidas de 2023, as unidades de base do SI são o metro para a grandeza comprimento, o quilograma para a massa, o segundo para o tempo, o ampere para a intensidade de corrente elétrica, o kelvin para a temperatura termodinâmica, o mol para a quantidade de matéria e a candela para a intensidade luminosa.

Figura 4 - Organograma da Convenção do Metro



Em novembro de 2018 durante a 26<sup>a</sup> CGPM, a Metrologia deu um passo histórico, pois o Escritório Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) apresentou novas definições para o quilograma, ampère, kelvin e mol além de revisões nas definições do segundo, metro e candela. Essas mudanças se tornaram efetivas a partir de 20 de maio de 2019, o dia Mundial da Metrologia e aniversário da Convenção do Metro.

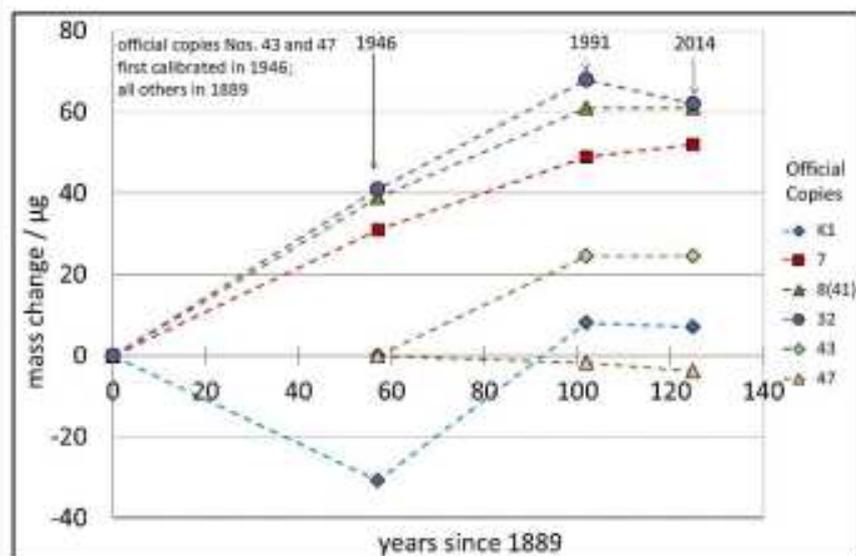
## 1.4 AS MUDANÇAS NO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Conforme *O Novo Sistema Internacional de Unidades*, publicação da Sociedade Brasileira de Metrologia e da Sociedade Brasileira de Física, passa a vigorar na data supracitada, as mudanças nas definições de grandezas físicas fundamentais. Tais mudanças evidenciam a importância do conhecimento por parte de alunos da educação básica, pelo menos de rudimentos de Física Moderna, como a constante de Planck, que foi um *divisor de águas* no pensamento científico e será abordado em capítulos subseqüentes. Landim e Carvalho (2019), publicam em *Cadernos de Metrologia - Inmetro 2019*, as mudanças implementadas abaixo, na 26<sup>a</sup> CGPM.

### 1.4.1 O QUILOGRAMA

Anteriormente, a unidade de massa era definida por um protótipo, a última grandeza de base do SI definida por um artefato material, o protótipo internacional do quilograma ou IPK (International Prototype Kilogram), com seis cópias mantidas no BIPM e instituídas na 1<sup>a</sup> CGPM, de 1899. Um cilindro de uma liga de platina e irídio com 39 milímetros de altura cuja massa deve ser igual a 1 decímetro cúbico (um litro) de água destilada a 4,44 °C. Segundo Cacaís e Loayza (2019), as seis cópias oficiais e o IPK são mantidos, cada um, em uma campânula tripla de vidro e em condições controladas do ar ambiente, juntos dentro de um cofre. Comparações efetuadas mostraram uma variação na massa do IPK de 50 µg desde o seu estabelecimento um século antes.

Gráfico 1 - Variação de massa das cópias do IPK



Fonte: <http://www.inmetro.gov.br/imprensa/releases/cadernos-de-metrologia.pdf>

Visando a não dependência de um padrão que não se mostrou constante, após cento e trinta anos (2019) o valor do quilograma passou a ser estabelecido nos termos de uma constante da natureza invariável, a constante de Planck ( $h = 6,62607015 \times 10^{-34}$  J.s) a partir do “experimento da balança de Watt” que mostra um equilíbrio entre as forças gravitacional e eletromagnética, com medições utilizando fenômenos quânticos. Este instrumento foi batizado balança de Kibble em homenagem ao seu inventor, o físico britânico Bryan Kibble (1938-2016).

#### 1.4.2 O AMPERE

Adotado como unidade de intensidade de corrente elétrica na 9ª CGPM de 1948, era a corrente elétrica invariável que, mantida em dois condutores retilíneos, paralelos, de comprimento infinito e de área de seção transversal desprezível, situados no vácuo, a um metro de distância um do outro, produz entre esses condutores uma força igual a  $2,0 \times 10^{-7}$  N por metro de comprimento desses condutores. Agora é definido a partir da carga elementar ( $1,602176634 \times 10^{-19}$  C) e da constante de Planck.

#### 1.4.3 O KELVIN

Definida na 13<sup>a</sup> CGPM em 1968 como unidade da temperatura termodinâmica, era definida como 1/273,16 da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água. O kelvin, símbolo K, continua a ser a unidade de temperatura termodinâmica, mas seu valor será estabelecido a partir da constante de Boltzmann ( $K_b = 1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ )

#### **1.4.4 O MOL**

Adotada pela 14<sup>a</sup> CGPM em 1971, equivalia à quantidade de substância de um sistema que contém tantas entidades elementares quantos átomos em 0,012 quilograma de carbono 12. Definimos atualmente como quantidade de átomos, de moléculas, de íons, de elétrons a partir da constante de Avogadro ( $N_A = 6,02214076 \times 10^{23}$  partículas

#### **1.4.5 O SEGUNDO**

Equivalia à duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de Césio 133 em repouso a uma temperatura de 0K. Agora a unidade de tempo do SI foi reescrita como o valor numérico da frequência de transição hiperfina do estado fundamental não perturbado do átomo de césio 133, em 9 192 631 770 Hz.

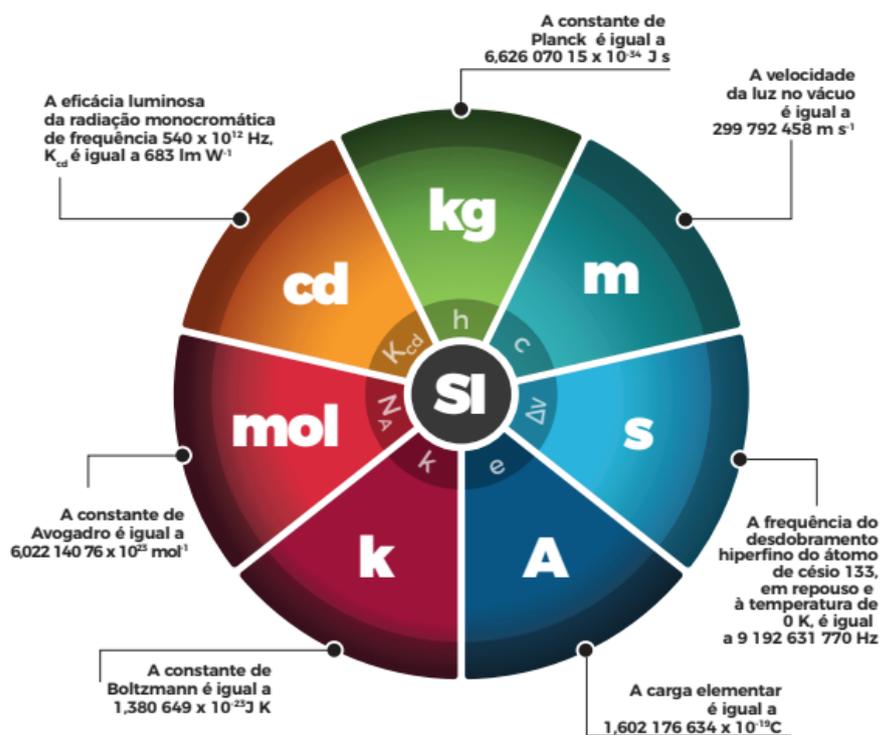
#### **1.4.6 O METRO**

Até 1960 a unidade metro era definida por uma barra de platina, porém, em 1983 na 17<sup>a</sup> CGPM, o metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de 1/299 792 458 de segundo. O metro foi a primeira unidade de base do SI, a ser concebida a partir de uma constante física fundamental, a constante  $c$ .

### 1.4.7 A CANDELA

Estabelecida em 1979, na 16ª CGPM, candela (cd) é a unidade da grandeza de base, intensidade luminosa do SI. Equivalia à intensidade luminosa, numa dada direção, emitida por uma fonte de radiação monocromática de frequência igual a  $540 \times 10^{12}$  Hz e cuja intensidade energética radiante, na mesma direção, é de  $1/683$  watt por esferorradiano. Foi redefinida como unidade de intensidade luminosa em uma dada direção no SI, fixada pelo valor numérico da eficácia luminosa da radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  Hz, exatamente igual a 683, quando se expressa em unidades do SI,  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{CdSr}$  ou  $\text{s}^3 \text{CdSr W}^{-1}$ , onde o quilograma, o metro e o segundo são definidos em função da constante de Planck, da velocidade da luz no vácuo e da frequência do Césio 133.

Figura 5 - As mudanças no Sistema Internacional de Unidades



Fonte: [https://metrologia.org.br/wpsite/wp-content/uploads/2019/07/Cartilha\\_O\\_novo\\_SI\\_29.06.2029.pdf](https://metrologia.org.br/wpsite/wp-content/uploads/2019/07/Cartilha_O_novo_SI_29.06.2029.pdf)

## Capítulo 2 Radiação do corpo negro: A quebra da continuidade e a origem da Energia Quântica

Figura 6 - A Radiação do Corpo Negro



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzMw&ctype=2-corponegro-pexels-mikhail-nilov-6530546+%282%29.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a50d3057f\\_581d2adbb4f2511093556%40ip-10-81-5-121.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=3416436&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzMw&ctype=2-corponegro-pexels-mikhail-nilov-6530546+%282%29.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a50d3057f_581d2adbb4f2511093556%40ip-10-81-5-121.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=3416436&accountId=0)

## 2.1 O QUANTUM E A SOLUÇÃO DE FALHAS NA TEORIA CLÁSSICA

O momento histórico na segunda metade do século XIX era incomum. Segundo Rocha *et al.* (2015), a Mecânica newtoniana reinava absoluta desde o século XVIII. Ela fora aprimorada por Kant (1724-1804), Lagrange (1736-1813), Laplace (1749-1827), e Hamilton (1805-1865) entre outros, e explicava os movimentos de todos os corpos neste planeta e fora dele. E ainda, segundo Gontijo e Rodrigues (2022), o ano de 1865 foi emblemático, quando baseados nos trabalhos empíricos de Michael Faraday (1791-1867), James Clerk Maxwell (1831-1879) unificou e equacionou os fenômenos elétricos e magnéticos, estabelecendo conexões elegantes entre as duas teorias. Registra-se também, a eclética e prodigiosa participação de Boltzmann, denotado nos seus trabalhos empíricos no eletromagnetismo, no seu protagonismo no surgimento da mecânica estatística, na organização da termodinâmica e na defesa inglória da existência de partículas menores na constituição da matéria. Estava estabelecida a Teoria Clássica e para muitos da comunidade científica da época, não existia nada mais a ser descoberto.

Mesmo com tantos avanços, cinco problemas não resolvidos pela Teoria Clássica e colocados aqui em ordem cronológica, intrigavam a comunidade científica: o calor específico, instituído, segundo Rocha *et al.* (2015), em 1784 por Johan Gadolin (1760-1852) apresentava para os sólidos, discrepâncias em temperaturas extremas (Lei empírica de Dulong-Petit 1819); o conflito da teoria com os dados empíricos da radiação do corpo negro (Kirchhoff 1860); a falta de uma explicação para o espectro de emissão e absorção dos gases (Balmer 1885), a inexistência de um alicerce conceitual para o efeito fotoelétrico (1887- Hertz), e finalmente a radioatividade (1896 – Becquerel) não encontrava sustentação teórica para sua existência. A busca por essas explicações fomentou uma forte mudança de paradigmas, que culminará na substituição do mundo determinístico da física clássica pelo universo probabilístico da mecânica quântica.

Em 1900, Planck resolve, segundo Rocha *et al.* (2015), a discordância teórico-experimental da radiação do corpo negro, instituindo mesmo sem convicção própria, a quantização da energia. Einstein em 1905 e 1907, corroborando e encorajando Planck na introdução conceitual do quantum, descortina soluções para o efeito fotoelétrico, conforme Gontijo e Rodrigues (2022) e para o comportamento

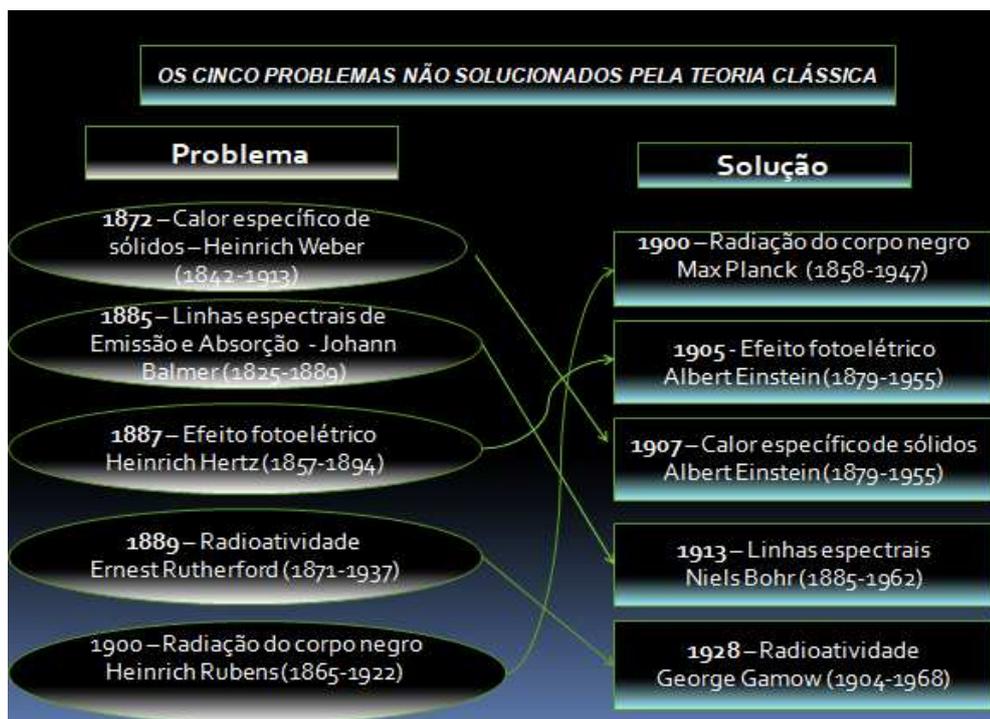
do calor específico a volume constante para sólidos, de acordo com Einstein (2005) e Oudet (2005), respectivamente, resolvendo duas das cinco questões.

Em 1913, Niels Bohr usando a mesma quantização, explica a não catástrofe atômica prevista pelos trabalhos de Maxwell para o modelo atômico vigente. Ele institui um modelo, segundo Gontijo e Rodrigues (2022), para o átomo de hidrogênio, proporcionando finalmente uma estrutura teórica para as linhas espectrais evidenciadas na série de Balmer, vinte e oito anos sem explicação. Esta teoria de Bohr foi tão refutada pela comunidade científica, que os alemães Otto Stern (1888-1969) e Max Von Laue (1879-1960) afiançaram um ao outro, conforme afirma Morris (1997), que se aquela *teoria maluca* viesse a ser provada, os dois abandonariam a física. Para o bem da ciência, os dois não honraram seus juramentos e foram laureados com o premio Nobel de Física, Von Laue em 1914 e Stern em 1943.

Em 1916, Robert Millikan (1868-1953) após inúmeras tentativas para refutar Einstein, ratifica sua teoria estabelecendo experimentalmente a constante de Planck e confirmando os postulados de seu antagonista para o efeito fotoelétrico.

O evidente desenvolvimento científico na Alemanha a partir da segunda metade do século XIX, sobretudo na termodinâmica, teve seu coroamento em 1887. O Estado alemão unificado investiu fortemente em um novo Instituto de Pesquisa em Berlim, o Physikalisch Technische Reichsanstalt (PTR) e em 1900 contrataram um brilhante cientista, Max Planck.

Figura 7 - Os problemas não solucionados pela Teoria Clássica



Fonte: O autor

Planck estabelece o nascimento da Mecânica Quântica após as publicações de três trabalhos na Sociedade de Física da Alemanha, sobre experimentos tratando a emissão de radiação por elementos aquecidos (O MILENAR [...], 2021). Planck aprimorou os trabalhos de Wilhelm Wien (1864-1928): “On an improvement of Wien’s equation for the spectrum – 1900”, “On the theory of the energy distribution law of the normal spectrum – 1900” e “On the law of distribution of energy in the normal spectrum – 1901”. Cabe aqui ressaltar que em 1900, desvendar a emissão de luz por corpos aquecidos, como um corpo negro, seria um grande marco científico, ainda mais em um momento que não tínhamos o conhecimento da estrutura microscópica do átomo ou da matéria.

Gontijo e Rodrigues (2022) estabelecem uma linha do tempo de evoluções conceituais, e começando por volta de 1800, Sir William Herschel (1738-1822) observando a decomposição da luz branca ao atravessar um prisma, conseguiu medir a temperatura correspondente a cada cor do espectro e descobriu que o efeito térmico aumentava à medida que o termômetro se aproximava do vermelho. Mais importante ainda, ele observou que a efeito continuava a aumentar mesmo depois do vermelho, na parte escura do espectro, a região do infravermelho. Esses estudos

continuaram e desembocaram naquilo que na segunda metade do século XIX passou a ser conhecida como radiação de corpo negro (O MILENAR [...], 2021). Qualquer corpo em determinada temperatura irradia energia que depende desta temperatura, e constatado por Herschel, cada temperatura está associada a uma frequência, isto é, a uma determinada cor.

Hans Christian Oersted (1777-1851) em 1823 inicia uma sistemática seqüência de medições da radiação térmica, mesmo com um incipiente aparato experimental. Porém em 1851 algum avanço se obteve nestas medições com a invenção por parte do físico sueco Adolf Ferdinand Svanberg (1806-1887), de um primitivo bolômetro, instrumento capaz de medir a radiação eletromagnética através do aquecimento de um material que tem sua resistência elétrica dependente da temperatura.

O físico escocês Balfour Stewart (1828-1887) enuncia em 1858 que “o poder de emissão de cada tipo de substância é igual ao seu poder de absorção, para cada comprimento de onda do calor radiante”. Stewart fora assistente de James D. Forbes (1809-1868), condecorado professor da Universidade de Edimburgo. Assim como Forbes, Stewart foi membro da Royal Society e também condecorado com a Medalha Rumford. Dentre vários trabalhos se destacam: “Observações com um espectroscópio rígido”, “Aquecimento de um disco por movimento rápido em Vácuo”, “Equilíbrio térmico em um gabinete que contém matéria em movimento visível” e “Radiação interna em cristais uniaxiais”. Stewart também desenvolveu pesquisas na área de meteorologia e campo magnético terrestre.

Gustav R. Kirchhoff (1824-1887), que teve contribuições científicas nos circuitos elétricos e na espectroscopia, em 1859 realiza novos experimentos e deduz que a relação entre a absorção e emissão de calor era uma função do comprimento de onda da radiação absorvida ou emitida pelo corpo em uma temperatura absoluta. No ano seguinte ele introduz o conceito de corpo negro, “... é o corpo que absorve toda radiação que nele incide”.

James C. Maxwell (1831-1879), físico e matemático britânico, demonstrou em 1860 que as velocidades das moléculas de um gás, seguem a lei das distribuições dos erros de John Karl Friedrich Gauss (1777-1855), e que a energia cinética das moléculas era proporcional à temperatura absoluta do gás. Esta lei foi generalizada

em 1872 pelo físico austríaco Ludwig E. Boltzmann (1844-1906), ficando estabelecida a lei de Maxwell-Boltzmann (O MILENAR [...], 2021).

Vislumbro aqui a pertinência em discorrer sobre Boltzmann. Ele foi o maior responsável pelo desenvolvimento da mecânica estatística, que explica e prevê como as propriedades dos átomos (como a massa, a carga e a estrutura) determinam as propriedades macroscópicas da matéria (como a capacidade térmica, a viscosidade, condutividade térmica e difusão). Na Universidade de Viena, Joseph Stefan (1835 – 1893), foi o seu orientador de doutoramento. Publicou vários artigos mostrando que a segunda lei da termodinâmica podia ser explicada pela aplicação das leis da mecânica e das teorias da probabilidade aos movimentos dos átomos, ou seja, era uma lei estatística.

Além de trabalhar no teorema da equi-partição, que relaciona a temperatura de um sistema com sua energia média, Boltzmann foi também um dos primeiros a reconhecer a teoria eletromagnética de Maxwell e com base nela, deduziu que a intensidade da radiação (total) emitida por um corpo negro é proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta (lei de Stefan- Boltzmann).

Sua mecânica estatística foi duramente criticada pela comunidade científica da época que, segundo Dahmen (2007) e Ribeiro (2013), não acreditava na teoria atômica. Isto teria impactado fortemente na saúde de Boltzmann. Seus últimos anos foram marcados por perda progressiva da visão e depressão. Pouco depois de 1900 aconteceram uma série de descobertas em física atômica que tardiamente, consolidaram todo trabalho de Boltzmann.

Albert Einstein (1879-1955), antes dos seus famosos cinco artigos de 1905 no *Annus Mirabilis*, publicou na revista científica *Annalen der Physik*, artigos em 1902, 1903 e 1904 sobre fundamentos da mecânica estatística e termodinâmica. Em 1902 publicou *Kinetische Theorie des Warmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der* (Teoria cinética do equilíbrio térmico e da segunda lei da termodinâmica) que abordava sob a ótica da mecânica estatística, o teorema da equi-partição e as definições de temperatura e entropia. Em 1903, Einstein publica *Eine Theorie der Grundlagen der* (Uma teoria dos fundamentos da termodinâmica) relatando a irreversibilidade da termodinâmica e em 1904, *Allgemeine molekulare Theorie der Wärme* (Sobre a Teoria Molecular Geral do Calor) descrevendo novos métodos para a obtenção da constante de Boltzmann (O MILENAR [...], 2021).

Em 1905, como afirma Coelho (2006), dois dos cinco artigos reforçam o modelo atômico de Boltzmann, o segundo, "*Eineneue Bestimmung der Moleküldimensionen*" ("Sobre uma nova determinação das dimensões moleculares"), foi tese de doutoramento na Universidade de Zurique e tratava da "determinação do tamanho exato de átomos a partir da difusão e da viscosidade em soluções diluídas de substâncias neutras". O terceiro artigo, "*Über die von der molekulartheoretischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*" ("Sobre o movimento de partículas suspensas em fluidos em repouso, como postulado pela teoria molecular do calor"), trata do movimento Browniano, descrito pela primeira vez em 1828, pelo botânico Robert Brown ao observar que o pólen de diversas plantas, que serve de consolidação do modelo atômico-molecular.

Em maio de 1905 em carta destinada ao amigo Conrad Habicht (1876-1958), conforme classifica Moreira (2005), Einstein registra um dos mais importantes e intrigantes documentos da história da ciência.

Eu lhe prometi quatro trabalhos. O primeiro trata da radiação e das propriedades energéticas da luz e é muito revolucionário como você verá. O segundo é uma determinação dos tamanhos reais dos átomos a partir da difusão e da viscosidade de soluções diluídas de substâncias neutras. O terceiro prova que, baseado na hipótese da teoria molecular do calor, corpos da ordem de 1/1.000 mm, suspensos em líquidos, devem executar um movimento aleatório observável, que é produzido pelo movimento térmico; de fato, os fisiologistas observaram movimentos de pequenos corpos em suspensão, inanimados, os quais chamam de 'movimento browniano'. O quarto artigo, neste momento apenas um rascunho grosseiro, é uma eletrodinâmica de corpos em movimento, que utiliza uma modificação da teoria do espaço e do tempo. (MOREIRA, 2005, p. 1).

Nesta época, apesar de deu doutoramento, Einstein ainda não gozava de notoriedade, era um simples examinador no Instituto Federal Suíço de Propriedade Intelectual em Berna, o escritório de patentes da Suíça. Apesar de seus artigos publicados, entre eles a teoria da Relatividade Especial, Einstein só começa a freqüentar de fato a comunidade científica com o convite por Walter Nernst para participar da primeira Conferencia de Solvay de 1911, em Bruxelas. O tema, *La théorie du rayonnement et les quanta* (Theoria da radiação e dos quanta) justificava o convite ao físico mais jovem presente, com 31 anos.

Não sabemos que se Boltzmann tivesse tido contato com as publicações de Einstein, que corroboraram sua tão criticada teoria corpuscular, sua depressão teria sido mitigada. Talvez, o fatídico dia 5 de setembro de 1906 poderia ter sido diferente, e diante de possíveis reconhecimentos como partícipe da evolução da ciência do século XX, fosse o vigésimo quinto integrante da Conferência de célebres que ocorreria em 1911.

Cabe ressaltar que no final do século XIX vários cientistas, usando a teoria clássica da termodinâmica, mostraram que a emissão de energia varia com a temperatura. A energia radiante total por unidade de área na unidade de tempo, ou fluxo é dada pela equação de Stefan-Boltzmann:

$$\Phi = \sigma T^4 \quad (01)$$

onde  $\sigma$  traduz a constante de mesmo nome e vale  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ . Josef Stefan (1835-1893) chegou a esta conclusão de maneira experimental em 1879 e cinco anos depois Ludwig Boltzmann (1844-1906) chega independentemente a este mesmo resultado. Com este fundamento matemático, Stefan a partir de dados obtidos por Charles Soret (1854-1904) obteve a temperatura da superfície solar com boa precisão. Planck determinou experimentalmente que os corpos aquecidos têm um aumento vibracional de suas estruturas, e estabeleceu a hipótese que estes devolvem esta energia sob a forma de emissão de luz (radiação) por *pacotes de energia*, ou quantum (quantidade elementar) de valor proporcional a sua frequência de oscilação (O MILENAR [...], 2021). Mais tarde esta ousadia ganha robustez e promove uma revolução científica e tecnológica. Isto nos remete às reflexões do filósofo Maurice Merleau-Ponty (1908-1961) que nos revela que a criticidade da própria física propicia novas percepções de mundo e a conseqüentes desenvolvimentos. Esta ousadia produtiva de Planck é descrita por Neto (2021) e corroborado por Kruger *et al* (2018):

Sobre a produção do conhecimento e o processo de escolha, Feyerabend afirma que os passos mais inovadores só foram possíveis porque cientistas ousaram desobedecer a conjuntos de regras metodológicas que os prendiam (FEYERABEND, 1977, p. 29). Essa “rebeldia” científica pode contribuir muito mais para a sociedade do que se imagina, como observamos na concepção teórica de dois grandes cientistas: Sigmund Freud, em suas concepções e novos métodos para a psicanálise; Albert

Einstein, que em sua teoria da relatividade sustenta a física moderna. Por isso, o melhor método é não ter método e deixar a ciência fluir naturalmente. (KRUGER *et al*, 2028, p. 541 e 542)

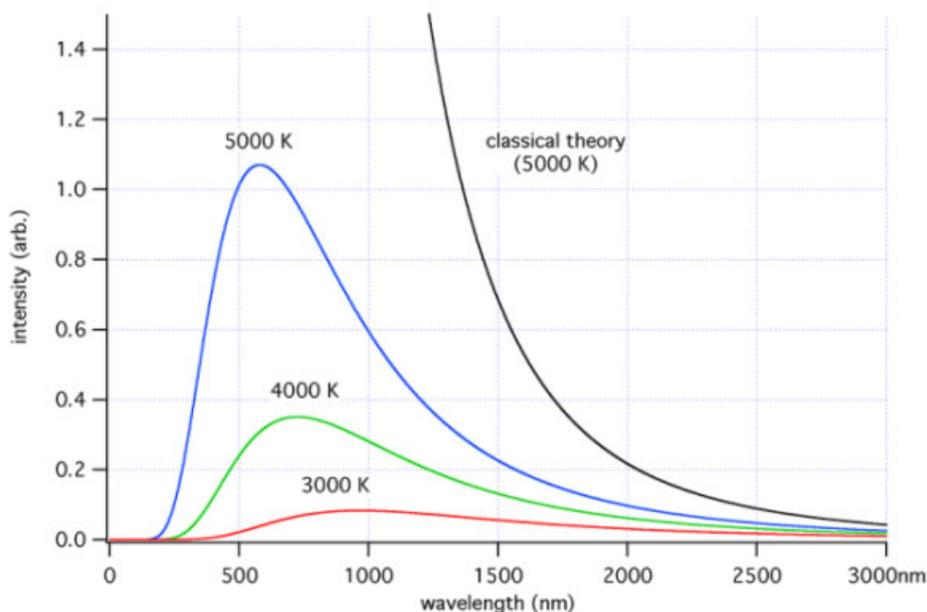
## 2.2 A LEI DE RAYLEIGH – JEANS

Desejando obter uma descrição matemática da energia radiante do espectro eletromagnético em função da temperatura e comprimento de onda, John William Stutt (1842-1919) ou Lord Rayleigh em 1900 consegue através de análise dimensional e teoria clássica, uma boa equação, que porém apresentava uma falha para altas frequências. Mesmo após aprimoramento da equação, juntamente com Sir James Jeans em 1905, o desacordo com os dados experimentais persistia. Esta falha, conforme afirma Morris (1997), passou a ter a alcunha de *catástrofe do ultravioleta*, expressão atribuída ao físico austríaco Paul Ehrenfest (1880-1933), melhor amigo de Albert Einstein. Rayleigh gozava de boa reputação na comunidade científica e teve ilustres alunos como J. J. Thomson. Obteve o Nobel de Física em 1904 pelas pesquisas sobre densidade de gases e pela descoberta do Argônio. Cinco anos depois, a equação de Rayleigh sofre uma pequena modificação por James Jeans (1877-1946) sem, contudo corrigir a citada imprecisão.

$$\bar{U}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2KT}{c^3} \quad (02)$$

$\bar{U}$  – Densidade de radiação,  $\nu$  – frequência,  $T$  – temperatura na escala absoluta,  
 $K$  – constante de Boltzmann

Gráfico 2 - Lei de Rayleigh-Jeans



Fonte: <http://fisicanodiaadia.blogspot.com/2012/02/lei-de-rayleigh-jeans.html>

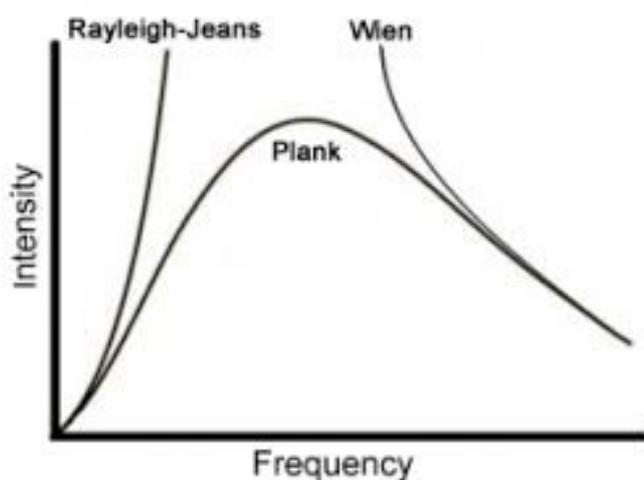
No gráfico verificamos que os picos de radiação para diferentes temperaturas, equivalem a valores específicos de comprimento de onda ou frequência. Por exemplo, quando um corpo irradia a 5000K, esta radiação apresenta um espectro de radiação com preponderância para um comprimento de onda máximo relativo ao azul. A teoria clássica proposta por Rayleigh - Jeans concorda com os dados experimentais para baixas frequências e altos valores de comprimento de onda, mas apresenta inconsistências para altos valores de frequência, como o ultravioleta, prevendo um valor infinito de intensidade de radiação e não um valor máximo.

### 2.3 A LEI DE WIEN

A lei formulada em 1892 por Wilhelm Wien (1864-1928), Nobel de Física em 1911 por trabalhos sobre radiação, é somente compatível com os dados experimentais para valores de altas frequências, ao contrário da lei de Rayleigh - Jeans, que retratava bem a radiação em baixas frequências. Diferentemente dessas duas leis, os valores experimentais encontrarão amparo na lei de Planck a ser formulada aglutinando as duas leis anteriores através de uma idéia revolucionária.

$$\bar{U}(\nu, T) = \frac{CKT\nu^3 e^{-\frac{h\nu}{kT}}}{c^3} \quad (03)$$

Gráfico 3 - Lei de Wien



Fonte: <http://macbeth.if.usp.br/~gusev/AulaCorpoNegro2.pdf>

A Lei de Wien pode ser expressa por uma variação chamada lei de deslocamento de Wien, demonstrada no item 2.5, que relaciona o comprimento de onda onde se situa a máxima emissão de radiação eletromagnética de corpo negro e sua temperatura.

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{b}{T} \quad (04)$$

Onde  $\lambda_{m\acute{a}x}$  é o comprimento de onda para qual a intensidade de radiação eletromagnética é máxima, T é a temperatura do corpo em Kelvin e b é a constante de proporcionalidade chamada constante de dispersão de Wien. No SI seu valor é  $b = 2,8977685 \times 10^{-3}$  (m.K)

## 2.4 A SOLUÇÃO TEÓRICA DE PLANCK PARA ADEQUAÇÃO AOS DADOS EXPERIMENTAIS

Sendo o corpo negro um sistema possuidor de massa e temperatura  $T$  que emite radiação, sabemos que o fluxo dessa energia radiada é proporcional a quarta potência da temperatura e independe do corpo. Modelos que tentaram explicar o espectro da radiação em função da frequência ou comprimento de onda não foram plenamente eficazes. O modelo de Rayleigh – Jeans se adequa para baixas frequências e o de Wien para altas.

Utilizando um modelo de osciladores, acumuladores de energia, chegamos a uma expressão que relaciona energia total do sistema e a densidade de energia na radiação:

$$U(\nu) = \frac{c^3}{8\pi\nu} \bar{u}(\nu) \quad (05)$$

Como a energia total depende da temperatura, utilizemos o modelo termodinâmico:

$$\boxed{\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU}} \quad (06)$$

A partir da **lei de Wien** (*para altas*) temos:

$$\boxed{\bar{u}(\nu, T) = c\nu^3 e^{-\frac{\alpha\nu}{T}}} \quad (07)$$

Onde  $C$  é uma constante e  $\alpha$ , será chamada de  $h$ , constante de Planck. Então:

$$U = \frac{c^3}{8\pi\nu^2} C\nu^3 e^{-\frac{\alpha\nu}{T}} = A \nu e^{-\frac{\alpha\nu}{T}} \quad (08)$$

Considerando que:  $T: \frac{1}{T} = -\frac{1}{\alpha\nu} \ln\left(\frac{u}{A\nu}\right) e \frac{1}{T} = \frac{dS}{dU}$  (09)

Então:  $\frac{dS}{dU} = -\frac{1}{\alpha\nu} \ln\left(\frac{u}{A\nu}\right)$ . (10)

Logo a derivada segunda é:

$$\boxed{\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{1}{\alpha v U}} \quad (11)$$

Fazendo o mesmo para a **lei de Rayleigh – Jeans** (para *v* baixas):

Se  $\boxed{\bar{u} = \frac{8\pi v^2}{c^3} KT}$ , então: 
$$U = \frac{c^3}{8\pi v^2} \frac{8\pi v^2}{c^3} KT \quad (12)$$

Sendo  $U = KT$ ,  $\boxed{\frac{1}{T} = \frac{K}{U}}$  e  $\frac{dS}{dU} = \frac{1}{T} = \frac{K}{U}$ , (13)

Então: 
$$\boxed{\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{K}{U^2}} \quad (14)$$

Onde K é a constante de Boltzmann. Planck propõe uma expressão da derivada segunda da Entropia em função da Energia, que satisfaça regimes de altas e baixas frequências:

Obtemos  $\boxed{\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{1}{\alpha v U + \frac{U^2}{K}}}$  aglutinando-se Wien e Rayleigh – Jeans. (15)

Lembrando que  $\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU}$  e se  $T \rightarrow \infty, U \rightarrow \infty$  então,  $\frac{dS}{dU} \rightarrow 0$ .

$$\frac{dS}{dU} = \int \frac{d^2 S}{dU^2} dU = \frac{1}{\alpha v} \ln \frac{U}{\alpha v K + \frac{U^2}{K}} \quad (16)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU} = \frac{1}{\alpha v} \ln \frac{U}{\alpha v K + \frac{U^2}{K}} \quad (17)$$

Resolvendo para U e lembrando que  $\alpha = \frac{h}{K}$ ,  $\boxed{U = \frac{hv}{e^{hv/KT} - 1}}$  contemplando os dois modelos.

Usando  $U = \frac{c^3}{8\pi v^2} \bar{u}(v)$

$$\frac{h\nu}{e^{K T}-1} = \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \bar{u}(\nu, T), \text{ então } \boxed{\bar{u}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{K T}-1}}. \quad (18)$$

Esta última equação é a lei de Planck, que se comunica com os dados experimentais mostrados na figura 2 (RADIAÇÃO [...], 2016). De acordo com

Feldens, Dias e Santos (2010), Planck se incomodava pelo fato de ter forjado apenas uma argumentação matemática, uma equação que retratasse os tais dados empíricos. Faltava robustez teórica para sedimentar todo o conceito físico da radiação do corpo negro.

Mas mesmo que a validade absolutamente precisa da fórmula da radiação seja assumida, na medida em que ela tenha meramente o status de uma lei revelada por uma sorte da intuição, ela não poderia esperar possuir mais do que um significado formal. Por essa razão, no próprio dia em que formulei a lei, comecei a devotar-me à tarefa de investi-la com um real sentido físico. Essa procura automaticamente levou-me a estudar a inter-relação de entropia com probabilidade — em outras palavras, a perseguir a linha de pensamento inaugurada por Boltzmann. (FELDENS, DIAS e SANTOS, 2010, p. 7).

Ele verificou que a lei de Rayleigh - Jeans não se ajustava a curva espectral em toda faixa de freqüências, porque Rayleigh e Jeans, que partiram da idéia de que a energia irradiada vem da oscilação do campo eletromagnético, admitiam que os osciladores irradiassem qualquer quantidade de energia (RADIAÇÃO [...], 2016).

Em 14 de dezembro de 1900 Planck apresentou para a Sociedade Alemã de Física uma solução inusitada para corroborar os dados experimentais. Ele inferiu uma limitação, ou seja, os osciladores só podiam emitir energia em determinadas quantidades. Ele postulou que a energia contida no corpo negro e que será irradiada, é um número inteiro de pacotes de energia, chamado por Planck de *elemento de energia* e futuramente por De Broglie, de *átomos de luz*. Tanto na emissão como na absorção, o oscilador só pode trocar valores de energia que são múltiplos de  $E_0$  ( $E = nE_0$ ), com  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Este elemento de energia ou quantum, é proporcional à freqüência ( $\nu$ ),  $E_0 \propto \nu$ , ou  $E_0 = h\nu \Rightarrow \boxed{E = nh\nu}$ , onde  $h$  é uma constante que mais tarde foi batizada com seu nome e tem valor  $h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ , atualizada na 26ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (Paris Nov/2018). Essa constante é muito pequena assim como o quantum. Como a matéria que nos

parece contínua mesmo sendo composta de unidades discretas, a luz também é percebida como contínua e é discretamente formada por unidades elementares de radiação chamadas de fótons.

A energia média seria:

$$\bar{E} = \frac{\sum_n n E_0 e^{-n E_0 / K T}}{\sum_n e^{-n E_0 / K T}} = U \quad (19)$$

Adotando-se que  $\beta = \frac{1}{K T}$  e derivando  $\frac{d}{d\beta} = (\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n \epsilon_0 \beta}) / \sum_{n=0}^{\infty} e^{-n \epsilon_0 \beta}$ , que é a soma de uma P.G.

$$U = \frac{E_0}{e^{E_0 / K T} - 1} \rightarrow \bar{u} \text{ como } \bar{u} = \frac{8 \pi \nu^2}{c^3} U \Rightarrow \bar{u} = \frac{8 \pi \nu^2}{c^3} \frac{E_0}{e^{E_0 / K T} - 1} \quad (20)$$

Planck verificou que a expressão:  $\bar{u} = \frac{8 \pi \nu^2}{c^3} \frac{E_0}{e^{E_0 / K T} - 1}$  era equivalente a

$$\bar{u} = \frac{8 \pi \nu^2}{c^3} \frac{h \nu}{e^{h \nu / K T} - 1} \quad (21)$$

$$E_0 = h \nu \quad (22)$$

O elemento de energia  $E_0 = h \nu$  é a energia a ser radiada pelo corpo negro na forma de pacotes, de maneira quantizada, que mais tarde será chamada de fótons. Richard Feynman (1918-1988), Nobel de Física de 1965, afirmava que a diferença do Modelo de Planck em relação ao modelo de Rayleigh - Jeans, era que no primeiro modelo os átomos tinha personalidade. Esse novo paradigma não só se aplica para a radiação do corpo negro, ele será comprovado através de outros efeitos da natureza como no efeito fotoelétrico, espalhamento Compton entre outros. Será conceito geral e base para o nascimento da mecânica quântica.

## 2.5 DE PLANCK A RAYLEIGH – JEANS

Podemos comprovar, a partir da Lei de Planck, que a Lei de Rayleigh - Jeans não se sustenta para pequenos comprimentos de onda e altas frequências, prevendo Radiância espectral infinita para estes valores (DE PLANCK [...], 2022).

$$\text{Segundo Planck: } \boxed{B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/KT} - 1}} \text{ ou} \quad (23)$$

$$\text{ou } \boxed{B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda KT} - 1}} \quad (24)$$

$$\text{Então : } x = \frac{hc}{\lambda KT} \rightarrow \lambda KT \gg hc \Rightarrow x \rightarrow 0$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^x - 1} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{(1+x) - 1} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{x}$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{\lambda KT}{hc} \Rightarrow \mathbf{B_\lambda(T) = \frac{2cKT}{\lambda^4}}. \quad (25)$$

Ou seja, para  $\lambda$  pequenos,  $B_\lambda(T) \rightarrow \infty$  (catástrofe do ultravioleta).

## 2.6 LEI DO DESLOCAMENTO DE WIEN A PARTIR DE PLANCK

Conforme a equação (25), a Radiância Espectral em função de  $\lambda e T$  para

$$\text{Planck é: } \boxed{B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda KT} - 1}}.$$

$$\text{Para } x = \frac{hc\lambda^{-1}}{KT} \text{ temos que } B_\lambda(T) = 2hc^2 \lambda^{-5} (e^x - 1) \quad (26)$$

Para obtermos o valor de máxima Radiância temos:

$$\frac{dB(\lambda)}{d\lambda} = 2hc^2 \left[ -5\lambda^{-6} (e^x - 1)^{-1} + \lambda^{-5} - (e^x - 1)^{-2} e^x \frac{-hc\lambda^{-2}}{KT} \right] = 0$$

$$\frac{-5}{\lambda^6} \frac{1}{e^x - 1} = -\frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{(e^x - 1)^2} e^x \frac{hc}{\lambda^2 KT} 5 = \frac{1}{e^x - 1} e^x \frac{hc}{\lambda KT} \Rightarrow 5 = \frac{x e^x}{e^x - 1} \Rightarrow$$

$$x = \frac{5(e^x - 1)}{e^x} \Rightarrow x = 5(1 - e^{-x}) \Rightarrow \mathbf{x \cong 4,965}$$

Então se  $x = \frac{hc}{\lambda KT}$  e se  $x = cte$

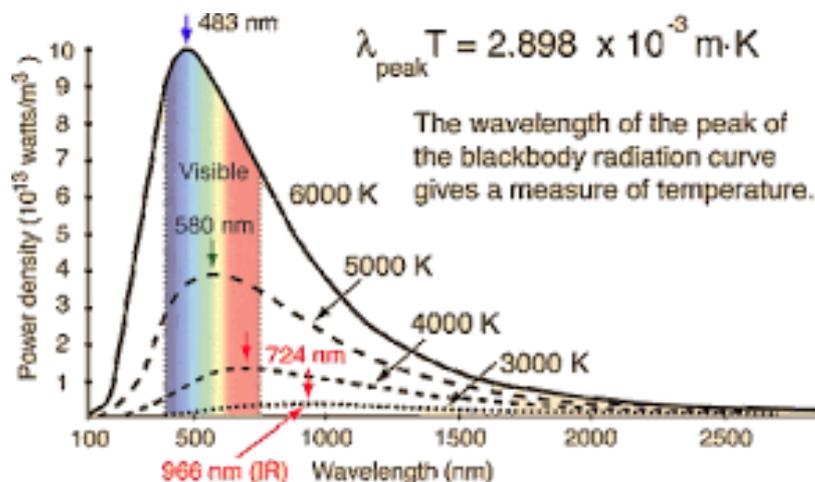
$$\lambda T = \frac{hc}{Kx} = cte \quad (27)$$

Substituindo os valores de  $h$ ,  $c$ ,  $K$  e  $x$ , temos:  $\lambda T = 2,898 \times 10^{-2} = b$

$$\lambda T = b \Rightarrow \lambda_{máx} = \frac{b}{T} \quad (28)$$

Temos então a **Lei do deslocamento de Wien** que relaciona, conforme já foi falado, o comprimento de onda onde se situa a máxima emissão de radiação eletromagnética de corpo negro e sua temperatura (DE PLANCK [...], 2022).

Gráfico 4 - Lei do deslocamento de Wien



Fonte: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com>

## 2.7 A VISITA DE RUBENS, O CHÁ DA TARDE DE DOMINGO E OS QUANTA

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), considerado o pai da teoria quântica entrou na Universidade de Munique em 1875 aos 17 anos, para estudar física. Em 1878 entra na Universidade de Berlim e como aluno de Gustav Kirchhoff (1824-1887), e Hermann von Helmholtz (1821-1894), conclui seu doutoramento em 1879. Sua bela carreira acadêmica estava só começando, e em 1885 assume o

cargo de professor na Universidade de Kiel, sua terra natal. Conforme relata Mukunda (2008), Planck sucede o professor Kirchhoff, o avô da teoria quântica, como professor da Universidade de Berlim, substituto em 1889 e permanente em 1892. Em 1912 tornou-se secretário permanente da Academia Prussiana de Ciências e em 1918 recebeu o Prêmio Nobel de Física, pela citada paternidade, que anunciou a transição de um passado clássico da ciência para uma era moderna.

Em 1929 juntamente com Einstein, recebe a primeira medalha da Sociedade Alemã de Física, mais tarde chamada Medalha Max Planck e em 1930 torna-se presidente da Sociedade Kaiser Wilhelm para Avanço da Ciência, mais tarde Sociedade Max Planck, posição acadêmica mais alta da Alemanha.

Mukunda (2008) relata curiosidades que antecederam o magnífico trabalho de Planck de 1900 e suas conseqüências. Planck dedicou-se ao estudo da termodinâmica, e como outros, buscava a função universal de Kirchhoff para a radiação do corpo negro. Por algum tempo acreditava-se que a equação instituída por Wilhelm Wien (1864-1928) em 1896 era exata, até a visita de Heinrich Rubens (1865-1922) e sua esposa à casa de Planck em uma bela tarde de outono no domingo.

Cabe ressaltar que, segundo Gontijo e Rodrigues (2022), em 1897 o físico e matemático Joseph Larmor (1857-1942) realizou um importante trabalho teórico para um melhor entendimento do espectro de radiação do corpo negro. Ele utilizou conceitos clássicos atestando que ondas eletromagnéticas são emitidas pelo corpo negro, quando do movimento aleatório de cargas elétricas superficiais aceleradas. Em 1899 Otto Lumer (1860-1925) e Ernest Pringsheim (1859-1917) realizaram as primeiras medidas precisas da intensidade do espectro de radiação do corpo negro em função do comprimento de onda. É possível verificar o deslocamento para a esquerda do ponto máximo de cada curva para cada uma das temperaturas indicadas, o deslocamento de Wien de 1893.

Rubens, um competente físico experimental, no chá da tarde de 7 de outubro de 1900, relata ao amigo Planck que desenvolvera um trabalho em laboratório juntamente com Ferdinand Kurlbaum (1857-1927) que atestou o fracasso da fórmula de Wilhelm Wien e Louis Paschen (1865-1940) de 1896 para comprimentos de onda longos. Afirmou ainda que outra fórmula clássica de John William Strutt ou Lorde Rayleigh (1842-1919) de junho de 1900, teria funcionado melhor para os dados

experimentais. Após a saída de Rubens, Planck começou a trabalhar para encontrar uma fórmula interpolando as expressões de Wien-Paschen e Rayleigh - Jeans, e então chegou a sua famosa lei da radiação.

De acordo com Mukunda (2008), assim nasceu a teoria quântica no espaço de algumas horas de uma noite de domingo. Na mesma noite, Planck teria enviado um cartão postal para Rubens relatando seus resultados teóricos, o qual recebera na manhã seguinte. Planck, dois dias depois em 9 de outubro de 1900, apresenta sua teoria em uma reunião na Sociedade Alemã de Física e relata mais tarde que mesmo dia em que formulou a lei da radiação, começou uma busca por um significado físico. Dois meses depois, em uma sexta-feira no dia 14 de dezembro de 1900, Planck apresenta em outra reunião na mesma Sociedade, uma modificação incorporando à sua teoria, a idéia revolucionária de quantização de energia.

O próprio Planck e praticamente toda comunidade acadêmica durante anos, não deram a devida reverência a teoria quântica apresentada por ele em 1900 e corroborada por Einstein em 1905 e em 1907. Planck em 1907 entusiasmava-se com a teoria relativística, mas ainda não se convencera do modelo quântico da luz de Einstein, que era uma continuidade da sua teoria revolucionária de 1900.

Mesmo após o protagonismo de Einstein na Conferência de Solvay de 1911 com a apresentação para a comunidade científica da teoria dos quanta, Einstein ainda se desvencilhava do ostracismo acadêmico e da própria insegurança *do pai da Mecânica Quântica*. Somente em 1913, Planck, Walther Nersnt (1864-1941), Heinrich Rubens (1865-1922) e Emil Walburg (1846-1931) recomendaram Einstein para a Academia Prussiana de Ciências.

A vida pessoal de Planck não denotou o mesmo sucesso de sua vida acadêmica. Perde seu filho mais velho Karl na Grande Guerra e seu filho mais novo Erwin, executado pelos nazistas. Suas filhas gêmeas, Emma e Grete falecem me trabalho de parto, mas Max Planck se manteve sóbrio até o final de sua vida.

### Capítulo 3 Efeito fotoelétrico: A inadequação ao Eletromagnetismo Clássico e o nascimento do Fóton

Figura 8 - O Efeito Fotoelétrico



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzNA&ctype=3-fotoeletrico-pexels-tom-fisk-9893729+%283%29.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a6212b113\\_4f392b0ca9da7128106db%40ip-10-81-5-31.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=6953896&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzNA&ctype=3-fotoeletrico-pexels-tom-fisk-9893729+%283%29.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a6212b113_4f392b0ca9da7128106db%40ip-10-81-5-31.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=6953896&accountId=0)

### 3.1 O ANNUS MIRABILIS DE 1905

O Efeito fotoelétrico refere-se à emissão de elétrons por um material quando exposto à radiação eletromagnética, como a luz. Embora hoje seja totalmente compreendida dentro do ambiente da mecânica quântica, sua história registra questões não resolvidas no final do século XIX e início do século XX, período em que ocorreram grandes avanços na compreensão da luz e da matéria.

A primeira vez que se tem notícia do uso termo em latim *annus mirabilis* foi em alusão ao polímata Isaac Newton (1642-1727), termo cunhado pelo poeta também inglês John Dryden quando escreveu “Annus mirabilis: the year of wonders, 1666”. Apesar do místico e apocalíptico número 666 coadunar com o Grande Incêndio de Londres, que se iniciou na casa do padeiro real Thomas Faryner e devastou em quatro dias mais de treze mil casas, este mesmo ano foi muito frutífero para Newton. Assim, o termo *mirabilis*, refere-se ao fecundo ano de Newton e ao miraculoso ano para Dryden e seu poema, que relata a vitória da Inglaterra em três batalhas e o salvamento de muitas vidas com o controle das chamas sobre Londres, reconstruída pelo rei Charles III. Em 1666, o filósofo natural Isaac Newton desenvolveu importantes avanços como trabalhos experimentais em Óptica Geométrica, teorias que culminaram na Lei da Gravitação Universal, conceitos sobre o movimento e o Método da Fluxões, que no futuro foi chamado de Cálculo Diferencial.

O termo *annus mirabilis* também está relacionado a outro momento histórico, ao ano de 1905 e a um futuro ícone da ciência, Albert Einstein (1879-1955). Segundo Coelho e Ferreira (2006), com apenas 26 anos e cinco anos depois de ter se graduado na Escola Politécnica Federal de Zurique, escola em foi reprovado em seu primeiro vestibular; o jovem e desconhecido Einstein teve também em 1905 o seu ano miraculoso.

Na revista alemã *Annalen der Physik* (anais de Física) que existe até hoje desde 1790, Einstein publica em 1905, mesmo ano que obtém seu doutoramento pela Universidade de Zurique, cinco importantes artigos. Três deles surpreenderam o mundo científico e alavancaram a Física Moderna instituindo a Teoria da Relatividade Especial, a Teoria do Movimento Browniano e a Teoria do Efeito Fotoelétrico.

O primeiro artigo "*Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt*" ("Sobre um ponto de vista heurístico concernente à geração e transformação da luz"), considerado revolucionário pelo próprio Einstein, este artigo formula a lei do efeito fotoelétrico, utilizando conceitos de unidades discretas de energia ou quanta, presentes no artigo escrito em 1900 pelo professor da Universidade de Berlim, Max Planck.

O segundo artigo, "*Eineneue Bestimmung der Moleküldimensionen*" ("Sobre uma nova determinação das dimensões moleculares"), foi aceito, no mesmo ano, como tese de doutoramento na Universidade de Zurique. De acordo com Einstein, o artigo tratava da "determinação do tamanho exato de átomos a partir da difusão e da viscosidade em soluções diluídas de substâncias neutras".

O terceiro artigo, "*Über die von der molekulartheoretischen Theorie der Wärmegeforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeitensuspendierten Teilchen*" ("Sobre o movimento de partículas suspensas em fluidos em repouso, como postulado pela teoria molecular do calor"), aborda o movimento Browniano, descrito pela primeira vez em 1828, pelo botânico Robert Brown ao observar que o pólen de diversas plantas moviam-se de maneira estocástica mesmo se o líquido em questão estiver calmo.

O quarto artigo, "*Zur Elektrodynamikbewegter Körper*" ("Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento") era, segundo Einstein, "apenas um esboço grosseiro" sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento, usando uma modificação da teoria do espaço e tempo. Este "esboço" contém o primeiro trabalho sobre a Teoria da Relatividade Restrita.

No quinto artigo, "*Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*" ("A inércia de um corpo depende da sua energia?") Einstein propõe sua famosa equação  $E = mc^2$ .

### 3.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

James Clark Maxwell (1831-1879) em 1864 estabeleceu a relação entre o eletromagnetismo e a luz nas equações que levam o seu nome. Maxwell pode demonstrar que os campos elétricos e magnéticos se propagavam à velocidade da luz, estabelecendo formalmente o conceito de ondas eletromagnéticas. De acordo

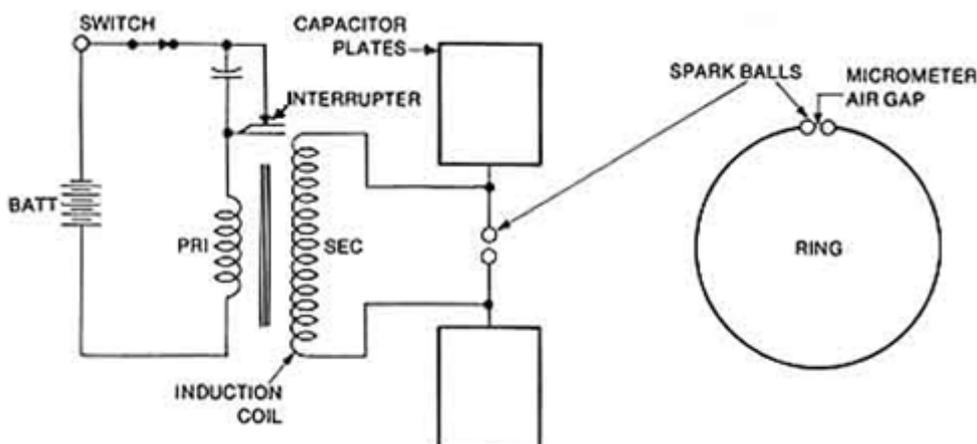
com Gutmann e Oliveira (2002), isto significou a unificação do Eletromagnetismo com a Ótica, duas áreas da Física consideradas, até aí, independentes.

Em 1887 Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), ex-aluno de Gustav Kirchhoff (1824-1887) e de Hermann Von Helmholtz (1821-1894), executou uma série de experimentos visando checar Maxwell, produzindo e detectando em seu laboratório, as ondas eletromagnéticas (também chamadas mais tarde ondas hertzianas). Ele permitiu o nascimento de uma nova era tecnológica: a da transmissão de informação através de ondas eletromagnéticas.

Guglielmo Marconi (1874-1937) em 1894, ano da morte de Hertz, empreendeu a primeira aplicação destas ondas, o primeiro telégrafo sem fio. Conforme afirma Gutmann e Oliveira (2002), Maxwell e Hertz, mortos prematuramente aos 48 e 37 anos, respectivamente, não viram o desenvolvimento tecnológico promovido por suas descobertas.

Hertz realizou seus experimentos aplicando uma diferença de potencial oscilante em um circuito, com uma pequena abertura, ligado à terra, e produziu centelhas a iguais intervalos de tempo. No momento do segundo centelhamento, o campo elétrico na região da pequena abertura cai rapidamente a zero, crescendo até a próxima centelha. O dispositivo de Hertz caracteriza o que hoje é chamado de dipolo oscilante. Como antena receptora, ele usou um anel de metal aberto, uma das extremidades contendo uma fina ponta de cobre e a outra uma esfera de latão. Uma pequena centelha na abertura do anel indicava a detecção de uma onda eletromagnética incidente. Hertz fez experimentos de onda estacionária, refletindo os seus pulsos primários em uma placa metálica e daí determinou o comprimento de ondas da radiação eletromagnética utilizada e a velocidade da luz. O experimento foi realizado com ondas de comprimento 1 m, na faixa que caracteriza o que é chamado hoje de radiofrequência.

Figura 9 - Esquema experimental de Hertz



Fonte: [https://i2.wp.com/alpoma.net/tecob/wp-content/uploads/2013/04/montaje\\_hertz.jpg?fit=620%2C250&ssl=1](https://i2.wp.com/alpoma.net/tecob/wp-content/uploads/2013/04/montaje_hertz.jpg?fit=620%2C250&ssl=1)

Ao realizar esses experimentos, Hertz verificou outro efeito. A centelha secundária (na abertura do anel) era mais intensa quando a abertura do anel era iluminada pela centelha primária. Esse resultado foi publicado em 1887 em um artigo intitulado *On an Effect of Ultraviolet Light upon the Electric Discharge* (Sobre um efeito de Luz Ultravioleta na descarga elétrica). A produção e a detecção de ondas hertzianas significou, à época, a comprovação experimental dos trabalhos teóricos de Maxwell. Já o efeito da luz ultravioleta na descarga elétrica era algo novo para o qual não havia explicação.

Em 1889, Wilhelm Hallwachs mostrou que partículas de carga negativa eram ejetadas da superfície de metais como o zinco, sódio e potássio quando as superfícies eram iluminadas com radiação ultravioleta. Conforme relata Filho (2015), alguns historiadores da ciência afirmam que este efeito potencializado pela luz ultravioleta, também chamado de efeito Hallwachs, fora observado em 1872 por Aleksandr Grigorievich Stoletov (1839-1896) quando trabalhava como professor na Universidade de Moscou. O termo efeito fotoelétrico seria cunhado posteriormente antes mesmo do surgimento do vocábulo *fóton*, proposto em 1926 pelo químico Gilbert Newton Lewis (1875-1946), professor da Universidade da Califórnia.

Em 1902, oito anos após a morte prematura de Hertz, um ex-assistente seu, Philipp Lenard (1862-1947), mediu a relação carga/massa dessas partículas e pôde confirmar que o aumento do centelhamento observado por Hertz era o resultado da emissão de elétrons, que ele, Lenard, chamou de fotoelétrons. A inadequação de tal

efeito com o eletromagnetismo de Maxwell despertou a atenção e curiosidade de muitos pesquisadores, pois a natureza contínua da luz proposta Maxwell, propagando-se em um espaço contínuo e interagindo com uma matéria contínua deveria apresentar dificuldades de interação com uma matéria descontínua, de acordo com a física clássica do final do século XIX.

O transporte de energia em uma onda eletromagnética, por exemplo, a luz, é descrito, por Maxwell, pelo vetor de Poynting, produto vetorial dos campos elétrico e magnético, e é distribuída em todo o espaço no qual a onda existe. O vetor de Poynting funciona perfeitamente para ondas se propagando no vácuo e pode ser usado para determinar a quantidade de radiação solar que atinge a Terra. No entanto, fracassa ao descrever a interação da radiação com a matéria como no efeito fotoelétrico.

O problema do efeito fotoelétrico estava relacionado à compreensão da relação entre a frequência da luz incidente e a energia cinética dos elétrons ejetados de um material. A teoria clássica da física não conseguiu explicar alguns aspectos fundamentais evidenciados empiricamente.

De acordo com o eletromagnetismo clássico, a energia deveria ser absorvida de forma contínua e acumulada pelos elétrons em um material no decorrer do tempo e deveria ser ampliada à medida que a intensidade da luz aumentava. Assim, qualquer frequência de radiação arrancaria elétrons. No entanto, as observações experimentais revelaram um padrão diferente: a energia cinética dos elétrons ejetados não aumentava gradualmente com o aumento da intensidade da luz, mas sim com o aumento da frequência da luz incidente. Além disso, somente certas frequências a partir de um valor mínimo, eram capazes ejetar elétrons.

Em seu primeiro artigo do ano de 1905, Einstein apresenta um trabalho esclarecedor para o fenômeno do efeito fotoelétrico, no qual utiliza a hipótese de discretização da energia que fora adotada por Max Planck há cinco anos, para encontrar uma base teórica que solucionou a discrepância empírica da radiação do corpo negro. Dessa forma, o efeito fotoelétrico torna-se uma maneira experimental e independente das experiências de radiação de corpo negro para determinação da constante  $h$ , evidenciando que a constante  $h$  não era apenas um artifício matemático para obtenção da fórmula de Planck.

Ele propôs que a luz não era uma onda contínua, como a teoria clássica sugeria, mas sim composta por partículas discretas de energia (quanta). Cada quantum de luz (mais tarde será chamado de fóton) carrega uma quantidade específica de energia proporcional à frequência da luz. Esta energia individual atua exclusivamente para atuar em cada elétron. Essa idéia permitiu a Einstein explicar por que a energia cinética dos elétrons ejetados dependia da frequência da luz incidente e não da intensidade. Aumentar a intensidade de luz significa aumentar a quantidade de fótons e não a energia individual de cada fóton. Assim, grande intensidade de luz com baixa frequência, significa a existência de muitos fótons com baixa energia, que poderão não arrancar nenhum elétron.

A resolução de Einstein para o problema do efeito fotoelétrico não apenas esclareceu um paradoxo, mas também sedimentou o início de uma teoria quântica evidenciada cinco anos antes por Planck, porém sem apoio da comunidade científica. Desperta também a compreensão da dualidade onda-partícula da luz a ser comprovada experimentalmente e descrita a partir de 1925 com a consolidação da Mecânica Quântica.

. Conforme afirma Gutmann e Oliveira (2002), a comunidade científica levou mais de 10 anos para reconhecer a validade do trabalho de Einstein e para aceitar as rupturas nas teorias clássicas. Em 1916, Robert Andrews Millikan (1868- 1953), conhecido pelo experimento que determinou a carga elementar, publicou um trabalho acurado sobre a solução apresentada por Einstein para o efeito fotoelétrico, reconhecendo: “Eu trabalhei 10 anos de minha vida testando a equação de Einstein de 1905 e contrário a todas as minhas expectativas, eu fui compelido em 1915 a assegurar sua verificação experimental, a despeito de sua não razoabilidade desde que ela parece violar tudo que eu sabia acerca da interferência da luz.” Em 1921, Einstein recebeu o prêmio Nobel de Física pelas suas contribuições à Física Teórica, em particular por seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico.

### **3.3 DISPERSÃO DE RAYLEIGH**

Como no efeito fotoelétrico, a dispersão também é uma interação da radiação com a matéria. Trata-se da dispersão da luz ou qualquer radiação eletromagnética

por partículas bem menores que o comprimento de onda dos fótons dispersados. Ocorre quando a luz se propaga em sólidos e líquidos transparentes e com maior frequência nos gases. A dispersão de Rayleigh da luz solar na atmosfera é a principal razão para a coloração azul do céu. Este termo faz referência à John William Strutt (1842-1919) matemático e físico inglês, possuidor do título de Barão de Rayleigh e prêmio Nobel de Física de 1904. Rayleigh foi orientador de J. J. Thomsom e G. P. Thomsom, pai e filho agraciados com Nobéis de 1906 e 1937, respectivamente.

Quando o tamanho das partículas é maior que o comprimento de onda, a luz não se decompõe em suas componentes cromáticas e todos os comprimentos de onda são igualmente dispersados, motivo da cor branca para uma nuvem, sal e açúcar. Para ocorrer dispersão da luz, o tamanho das partículas deve ser similar ou menor que o comprimento de onda. O grau de dispersão de Rayleigh que sofre um raio de luz depende do tamanho das partículas e do comprimento de onda da luz, conforme o coeficiente de dispersão: onde  $n$  é o índice de refração,  $d$  é o diâmetro da partícula e  $\lambda$ , o comprimento de onda da luz.

$$\sigma = \frac{2\pi^5 d^6}{3\lambda^4} \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \quad (29)$$

O conceito de dispersão, de acordo com Kerr (2006), pode explicar a coloração azul do céu. Como as cores que enxergamos fazem parte de uma pequena parcela do espectro eletromagnético, a qual compreende os tamanhos de, aproximadamente, 380 a 720 nm de comprimento de onda (violeta a vermelho, respectivamente), em face da equação acima podemos concluir que existem algumas que são mais espalhadas do que outras, ou seja, para comprimentos de onda pequenos, como é o caso do violeta (~400 nm) e azul (~450 nm). Então por que enxergamos o céu com coloração azul se há, de fato, um maior espalhamento de ondas de cor violeta? O motivo é a fisiologia do olho humano e a nossa percepção às cores. O conjunto olho humano-cérebro é o responsável por enxergarmos a coloração azulada, pois no olho existem células chamadas "cones", que nos dão a possibilidade de percepção das diferentes cores, e são muito mais sensíveis ao vermelho, verde e, principalmente, ao azul. Assim enxergamos o céu

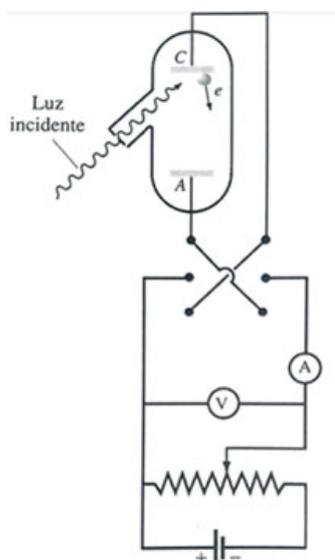
com a coloração azulada, ao invés da roxa. Astronautas vêem a Terra azul em face da maior absorção de longos comprimentos de onda pelos oceanos terrestres, fazendo com que as ondas de menores comprimentos, principalmente aquelas que correspondem ao azul, sejam refletidas até os olhos de observadores externos ao nosso planeta.

### 3.4 A EXPERIÊNCIA DE LENARD

Devemos aqui ressaltar que o efeito fotoelétrico em si, não contraria os ditames da Física clássica e um estudo bem detalhado deste efeito foi efetuado por Phillip Lenard no início do século XX.

Lenard usou um dispositivo composto de um tubo de gás rarefeito com anodo e catodo, um em cada extremidade. O catodo foi iluminado a partir de uma janela, com o objetivo de promover a ejeção de elétrons do catodo em direção ao anodo. Este movimento de elétrons desencadeia uma corrente elétrica que pode ser medida com a colocação de um amperímetro no circuito elétrico, constituído com a presença de um gerador que produz uma ddp variável, de tal sorte que os seus terminais podem ser invertidos, mudando o sinal desta ddp. Lenard teve o intuito de estudar o comportamento da corrente elétrica no amperímetro em função das características da luz que incidia no catodo, ou seja, sua frequência e sua intensidade.

Figura 10 - Esquema experimental de Phillip Lenard



Foi verificado que sem luz no catodo, a corrente elétrica registrada no amperímetro era zero, como esperado. Com incidência de luz, percebeu-se que o valor da corrente aumentava com o aumento da intensidade luminosa, o que também era esperado pela teoria clássica. Outro fato observado foi que a aparição da corrente acontecia no instante da incidência da luz no catodo, independentemente da intensidade luminosa. Este surgimento instantâneo de corrente não pode ser explicado pela teoria clássica, pois uma intensidade luminosa baixa deveria demandar um tempo para um devido acúmulo de energia, necessária para ejetar elétrons. Um terceiro fato observado foi que somente surgia corrente elétrica, a partir de certo valor mínimo de frequência da luz (frequência de corte) incidida no catodo do experimento e cada catodo feito de um metal diferente tinha uma frequência de corte diferente. Isto também contrariava a física clássica.

Com a aplicação de uma tensão elétrica no tubo a partir de 0 v, o valor da corrente aumentava e a partir de determinado valor de ddp, o valor da corrente elétrica se estabilizava e continuava constante mesmo aumentando-se a tensão. Isto pode ser explicado pelo fato de a ddp somente direciona os elétrons ejetados ao anodo e aumentando esta ddp, não são arrancados mais elétrons.

Quando a polaridade é invertida, os elétrons ejetados são compelidos a voltar em face desta tensão elétrica retardadora. O valor da corrente elétrica diminui até chegar a zero para uma tensão, chamada potencial de corte ( $V_0$ ).

Para retirar fotoelétrons do catodo é necessária uma quantidade de energia, porém se estes fotoelétrons estão na superfície deste metal, esta demanda de energia será mínima, que será chamada por Einstein de função trabalho ( $\phi$ ). Então se a energia incidente no catodo for maior que a função trabalho, haverá ejeção de elétrons próximos à superfície do metal. Elétrons ejetados, a partir da borda ou não, vão possuir uma energia cinética ( $E_c$ ) equivalente à diferença entre a energia recebida da radiação ( $E_f$ ) e a energia gasta ( $E_g$ ) para ser arrancado do catodo.

$$E_c = E_f - E_g \quad (30)$$

Para elétrons da borda, esta energia cinética será máxima ( $E_{máx}$ ) e a energia para arrancá-los será a Função trabalho ( $\phi$ ).

$$E_{c_{m\acute{a}x}} = E_f - \phi \quad (31)$$

Para que estes elétrons com energia cinética máxima possam ser freados, devem estar submetidos ao potencial de corte ( $V_0$ ). Então:

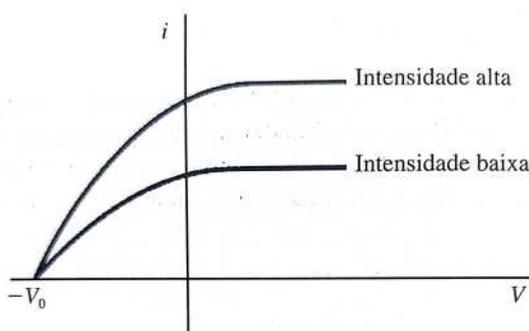
$$E_{c_{m\acute{a}x}} = eV_0$$

$$V_0 = \frac{E_{c_{m\acute{a}x}}}{e} \quad (32)$$

Se o experimento é repetido para uma intensidade de luz maior e aumentando-se o potencial a partir de zero, a corrente aumenta até novamente se estabilizar e manter-se constante mesmo com o aumento deste potencial. Esta corrente constante é maior que a corrente constante quando a intensidade de luz era menor no primeiro experimento. Isto não contraria a teoria clássica.

O que não pode ser explicado é o fato de, mesmo para correntes maiores, o potencial de corte é o mesmo. O potencial de corte deveria ser a razão entre a energia cinética máxima e a carga do elétron. E ainda, a energia cinética máxima depende da diferença da energia incidente e a função trabalho (constante). Pela teoria clássica, maior intensidade de luz traduz em maior energia incidente, e, portanto, maior energia cinética e maior função trabalho. Assim, o potencial de corte deveria ser maior para correntes maiores, no entanto, é o mesmo (FUNÇÃO [...], 2011).

Gráfico 5 - Gráfico  $i \times V$  para dois valores de intensidade de luz



### 3.5 OS POSTULADOS DE EINSTEIN E A EQUAÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO

O problema do efeito fotoelétrico resolvido por Einstein estava relacionado à interpretação da natureza da luz e à compreensão de como ela interage com a matéria. A teoria clássica da luz, baseada na teoria eletromagnética de Maxwell, previu que a intensidade da luz incidente sobre um material deveria resultar em uma quantidade proporcional de energia despendida para os elétrons do material, independentemente da frequência da luz. No entanto, as observações experimentais do efeito fotoelétrico contradiziam essa previsão.

Duas questões foram resolvidas. A primeira foi como explicar a independência da frequência da luz incidente na intensidade da corrente elétrica. Segundo a teoria clássica, aumentar a intensidade da luz (ou seja, o número de fótons incidentes) deveria resultar em uma maior quantidade de energia consumida para os elétrons, levando a uma maior energia cinética e, portanto, uma maior velocidade dos elétrons e, conseqüentemente, uma corrente elétrica mais intensa. No entanto, os experimentos demonstraram que mesmo quando a intensidade da luz era aumentada, a velocidade dos elétrons não aumentava proporcionalmente.

A segunda foi como entender a dependência da frequência na energia dos elétrons ejetados. Outra observação experimental crucial era que a energia cinética dos elétrons ejetados era diretamente proporcional à frequência da luz incidente, não à sua intensidade. Isso estava em conflito direto com a teoria clássica, que não oferecia uma explicação adequada para essa relação.

Einstein resolve esses problemas ao propor uma abordagem quântica radical. Ele sugeriu que a luz não era uma onda contínua, como previsto pela teoria eletromagnética clássica, mas sim corroborou Planck adotando a quantização da luz. Cada fóton carregava uma quantidade específica de energia proporcional à frequência da luz. O valor da constante de Planck de acordo com a 26ª Conferência Geral de Pesos e Medidas é  $h = 6,62607015 \times 10^{-34} J \cdot s$

$$\boxed{E = h\nu} \quad (33)$$

Onde  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  a frequência da radiação incidente

Conforme relata Rocha *et al.* (2015), Einstein corrobora a quantização de Planck e ressalta a importância da frequência da luz, pois não havia ejeção de elétrons abaixo de certas frequências críticas, qualquer que fosse a intensidade da radiação.

Ele explicou tais aspectos experimentais usando a hipótese quântica. Ele afirmaria que a luz comportava-se como um feixe de partículas e que somente os elétrons atingidos por um dos projéteis (de luz) é que seriam afetados. O fato de uma das partículas ser ejetada, ou não, dependia da energia contida no projétil. Utilizando a equação de Planck, ele pressentiu o que a quantidade de energia dependia diretamente da frequência e que abaixo de uma frequência crítica, o efeito era demasiado fraco para deslocar o elétron. A partir de tais premissas, ficou claro para ele que a luz era constituída de partículas. Em síntese, Einstein explicou o efeito fotoelétrico, partindo da hipótese de Planck, e afirmando que, ao invés de imaginar a luz como uma onda de energia discreta, era mais conveniente imaginá-la como formada por partículas. Com isso, surgiu o conceito de quantum de luz, mais tarde fóton. (ROCHA *et al.*, 2015, p. 311).

Em 1905 em um dos artigos do *Annus Mirabilis*, Einstein propõe três postulados a respeito da natureza da luz e de qualquer radiação eletromagnética. O primeiro corrobora Planck e vai além, afirmando não só as trocas de energia entre matéria e energia sejam quantizadas, mas a própria energia luminosa seja quantizada, onde cada quantum de luz tem energia proporcional a sua frequência.

$$E = h\nu$$

O segundo postulado afirma que um fóton entrega toda sua energia para um elétron, e não parcialmente. O terceiro postulado institui que a interação entre fóton e elétron é por par, ou seja, um fóton só entrega energia para um elétron, ou seja, ele não divide sua energia entre dois elétrons ou mais. Assim tudo que não fora explicado pela teoria clássica, será sanado por estes postulados.

O primeiro problema que a teoria clássica não explicava era o fato do intervalo de tempo ser zero entre a incidência de luz e a aparição de corrente. Agora com a teoria quântica pode ser explicado pelo fato de que basta um fóton com energia mínima atingir um elétron que ele será ejetado, produzindo uma corrente elétrica instantânea.

O segundo problema consistia na existência de uma frequência de corte, o que pode ser explicado pelo fato de que se um fóton possui energia mínima maior que a Função Trabalho, um elétron da superfície do catodo será ejetado. Esta

energia depende de uma frequência mínima, a frequência de corte, que depende de uma constante da natureza ( $h$ ) e das características do metal ( $\phi$ ).

$$h\nu_0 = \phi$$

$$\boxed{\nu_0 = \phi/h}$$
 (34)

O terceiro problema era a existência de um único potencial de corte independente da intensidade luminosa promotora de corrente. Sabe-se que o potencial de corte é dado por:

$$V_0 = \frac{E_{c_{\max}}}{e}$$

Adotando os postulados de Einstein

$$E_{c_{\max}} = E_f - \phi$$

$$E_{c_{\max}} = h\nu - \phi$$

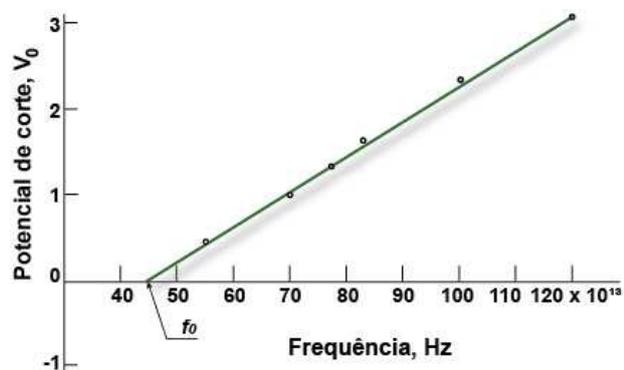
Então:  $\boxed{V_0 = \frac{h\nu - \phi}{e}}$  ou  $V_0 = \frac{h\nu - h\nu_0}{e}$  (35)

Que nos leva a:  $\boxed{V_0 = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0)}$ . (36)

Podemos então constatar que este potencial de corte não depende da intensidade luminosa.

Em 1916 Robert Andrews Millikan (1868-1953) realiza um experimento não realizado por Lenard e corrobora os postulados de Einstein. Millikan determinou o potencial de corte em função da frequência da luz incidente. E ainda pode calcular também, independente de Planck, a constante de mesmo nome. Planck em 1900 utilizou um ajuste de uma função da intensidade de radiação do corpo negro para calcular o valor de  $h$ , *hilfsgroosse* ou variável aleatória em alemão. Millikan em 1916 utiliza o efeito fotoelétrico e chega ao mesmo valor. Assim, Einstein confirma Planck e Millikan confirma Einstein (EFEITO [...], 2011).

Gráfico 6 - Dados obtidos por Millikan para Potencial de corte versus frequência (do coeficiente angular, pode-se obter a constante de Planck)



Fonte: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSwl83uEHOKt0L1f\\_Z6jY-CIxyWTWipvxUumw&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSwl83uEHOKt0L1f_Z6jY-CIxyWTWipvxUumw&usqp=CAU)

## Capítulo 4 Capacidade Térmica dos sólidos e a Lei de Dulong – Petit: A rachadura oculta na Termodinâmica e os primórdios da Física da Matéria Condensada

Figura 11 - Capacidade Térmica dos sólidos



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzNA&ctype=4-calorespecifico-pexels-mitchell-henderson-2004385+%283%29.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a6212c442\\_4f392b0ca9da71281078a%40ip-10-81-5-31.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=1386610&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzNA&ctype=4-calorespecifico-pexels-mitchell-henderson-2004385+%283%29.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a6212c442_4f392b0ca9da71281078a%40ip-10-81-5-31.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=1386610&accountId=0)

#### 4.1 A LEI DE DULONG - PETIT

Em 1907 no artigo: A teoria da radiação de Planck e a teoria do calor específico (*Die Planckshe Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme*), Einstein usando a quantização, explica a duradoura discrepância entre o previsto pela Física Clássica e o observado para a Capacidade Calorífica de sólidos monoatômicos.

Tudo começa em 1819 Alexis-Trérèse Petit (1791-1820) e Pierre-Louis Dulong (1785-1838) publicaram um artigo intitulado Investigação sobre alguns aspectos importantes da teoria do calor (*Recherchessurquelques points importants de La Thèorie de La Chaleur*) que mais tarde ficou conhecida como Lei de Dulong-Petit, que relaciona a capacidade calorífica dos elementos com sua massa atômica. Segundo Braga (2001), nesta publicação de trabalhos puramente experimentais com treze substâncias, os autores afirmaram que para sólidos, o produto do calor específico à volume constante, pela massa atômica ou massa molecular é constante.

Eles ainda encontraram para vários metais que o calor específico é proporcional a massa atômica para um valor constante de aproximadamente  $25 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , em torno de  $6 \text{ cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , posteriormente chamada de unidade de Dulong-Petit. Junior (2021) relata que, em 1832, Franz Neumann (1798-1895) estendeu esse resultado para corpos compostos e Victor Regnault (1810-1878) após longo trabalho empírico, confirmou em 1841 a lei de Dulong & Petit para todos os corpos sólidos estudados.

A tabela abaixo é a original apresentada no artigo de Dulong e Petit, com os dados convertidos para J/K mol. Conforme Braga (2001), os autores usaram a massa molar normalizada para a massa molar do oxigênio. O valor de 16 g/mol foi usado para remover esta normalização conforme resultados apresentados na tabela abaixo. O erro percentual relativo,  $\varepsilon = \frac{C_v - 3R}{3R} \times 100$ , é também apresentado, sendo seu valor médio de 1,1415.

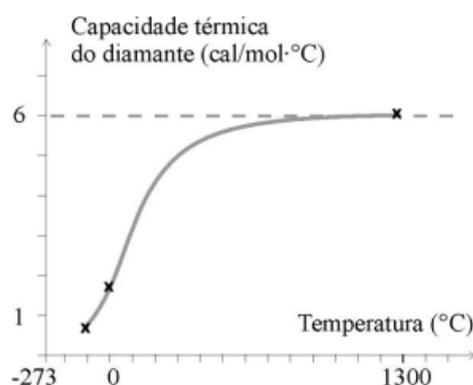
Tabela 4 - Dados originais de Dulong e Petit: Capacidade calorífica em J/K.mol

Sistema	$C_V$	$\epsilon$
Bismuto	25,6150	2,6984
Chumbo	25,3743	1,7331
Ouro	24,7724	0,6802
Platina	25,0131	0,2815
Estanho	25,2740	1,3309
Prata	25,1402	0,7946
Zinco	24,9864	0,1779
Telúrio	24,5784	1,4578
Cobre	25,1134	0,6874
Níquel	25,5415	2,4035
Ferro	24,9529	0,0438
Cobalto	24,6453	1,1896
Enxofre	25,2806	1,3577

Fonte: BRAGA, J. P. O colapso da equipartição da energia. Química Nova, v. 24, n. 5, p. 693-699, 2001.

Junior (2021) descreve que no decorrer do tempo, foi verificado que vários materiais violavam a lei de Dulong & Petit. Em 1872 Heinrich Weber (1842-1913), pesquisador em Zurique e futuro professor de Einstein, investigou exaustivamente a capacidade térmica do diamante de  $-50^{\circ}\text{C}$  até  $1300^{\circ}\text{C}$ , comprovando a citada violação. Ludwig Boltzmann (1844-1906) em 1871 já apresentara uma explicação usando a teoria clássica, repetido também sem sucesso em 1893 por Franz Richarz (1860-1920).

Gráfico 7 - Dados de Weber (1872) para a capacidade térmica do diamante



Fonte: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7683302/mod\\_resource/content/1/HFQ-03.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7683302/mod_resource/content/1/HFQ-03.pdf)

No final do século XIX e início do século XX o desvio da calor específico em baixas temperaturas foi muito investigado pela comunidade científica, como Karl Von Linde (1842-1934) em 1896, William A. Tilden (1842-1926) em 1903 e James

Dewar(1842-1923) em 1905. Assim, foi evidenciado que o calor específico dos sólidos tende a zero à medida que se aproxima da temperatura de zero absoluto.

## 4.2 CAPACIDADE TÉRMICA

Ao fornecer calor para uma determinada substância variamos sua temperatura, porém substâncias diferentes possuem variações de temperaturas diferentes para a mesma Quantidade de Calor recebida ou perdida. Assim podemos fazer a distinção destes corpos pela Capacidade Térmica, que é a razão entre o Calor trocado e a variação de temperatura que este Calor provoca.

$$C(T) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{Q}{\Delta T} \quad (37)$$

Quando a variação de temperatura tende a zero, a Capacidade Térmica é uma função da temperatura. Para um gás a Capacidade Térmica depende do processo, assim temos capacidade térmica a volume constante ( $C_v$ ) e à pressão constante ( $C_p$ ). Em um sólido podemos aceitar que  $C_v = C_p$ , e isto pode ser explicado pela primeira lei da Termodinâmica:

$$dE = dQ + dW \quad (38)$$

Como os sólidos possuem uma variação de volume que tende a zero, a fração relacionada ao Trabalho também tende a zero. Assim a variação da energia interna em um sólido depende exclusivamente das trocas de Calor e nos sólidos:

$$C = \frac{\partial E}{\partial T} \quad (39)$$

Para se calcular a Capacidade Térmica, temos que calcular a Energia do sólido. Para isto, fazemos uso de um tópico da Mecânica Estatística clássica: o Teorema da Equipartição de Energia, que no equilíbrio térmico, cada grau de liberdade contribui com  $\frac{kT}{2}$ , onde  $k$  é a constante de Boltzmann e vale  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K.

$^{23}\text{J/K}$ . Podemos exemplificar com o caso de um gás monoatômico com três graus de liberdade nas dimensões de volume.

$$E = \frac{3}{2}NkT \Rightarrow C_v = \frac{3}{2}Nk \quad (40)$$

Se substituirmos  $N$  por  $nN_A$ , teremos:  $E = \frac{3}{2}nN_AkT \Rightarrow C_v = \frac{3}{2}nN_Ak$ .

E ainda para  $R = N_Ak$ , temos:

$$\boxed{E = \frac{3}{2}nRT \Rightarrow C_v = \frac{3}{2}nR} \quad (41)$$

Para os sólidos, utilizando o modelo clássico de Boltzmann, que vislumbra átomos em rede cristalina vibrando em torno de pontos fixos, temos para a Energia total:

$$E = 3NkT \Rightarrow C = 3Nk \quad (42)$$

Nesta descrição temos  $N$  átomos em equilíbrio térmico com seis graus de liberdade, três de energia cinética e três de energia potencial. Assim a capacidade térmica por átomo vale  $3k$  para todas substâncias, conforme a lei de Dulong-Petit. Lembrando que:

$$C = 3Nk = 3nN_Ak = 3nR \quad (43)$$

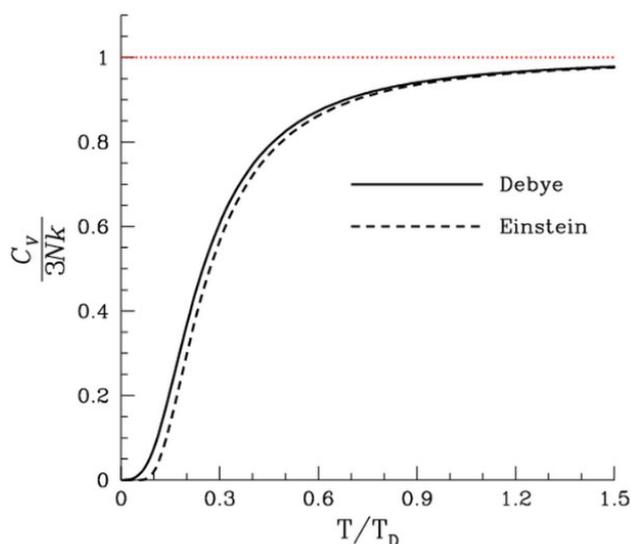
$\frac{C}{n} = 3R$ , que é a Capacidade Térmica por mol a volume constante, que vale aproximadamente  $25 \frac{\text{J}}{\text{Kmol}}$  (TERMODINÂMICA [...], 2020).

### 4.3 A SOLUÇÃO DE ENSTEIN

Capacidade térmica ou calorífica está relacionada à capacidade dos átomos vibrarem, ou de armazenarem energia. De acordo com a teoria clássica, os átomos

poderiam oscilar em sua posição de equilíbrio em qualquer valor de energia ou frequência. Para o modelo de Einstein (1907) estes valores serão discretos e os átomos de um sólido continuam vibrando em torno de uma posição fixa, porém estas vibrações são quantizadas, ou seja, os átomos são agora osciladores quânticos e não mais clássicos. Isto levará à explicação do fato da capacidade térmica tender a zero para temperaturas muito baixas, confirmando os dados experimentais não explicados pela teoria clássica.

Gráfico 8 - Capacidade térmica adimensional dividida por 3 em função da temperatura segundo modelos de Einstein, Debye e Dulong-Petit (linha pontilhada horizontal)



Fonte :[https://gl.wikipedia.org/wiki/Capacidade\\_calor%C3%ADfica](https://gl.wikipedia.org/wiki/Capacidade_calor%C3%ADfica)

Considerando a quantização do movimento vibracional, Einstein chegou à seguinte relação:

$$\boxed{C_{v,m}(T) = 3R f_E(T)^2} \quad (44)$$

Admitamos que  $C_{v,m}(T)$  é a Capacidade calorífica molar a volume constante em função da temperatura e  $f_E(T)$  é o que chamamos de função de Einstein elevada ao quadrado. Podemos inferir que quando a temperatura tende a zero, a Capacidade calorífica tende também a zero, pois a função de Einstein tende a zero.

Quando a temperatura tende a infinito, a função de Einstein tende a 1 e a Capacidade calorífica tende a 3R.

A função de Einstein é estabelecida da seguinte forma:

$$f_E(T) = \left(\frac{\theta_E}{T}\right) \left(\frac{e^{\frac{\theta_E}{2T}}}{e^{\frac{\theta_E}{T}} - 1}\right) \quad (45)$$

Onde  $\theta_E$  é a temperatura de Einstein e vale  $\theta_E = \frac{h\nu}{k}$  com k sendo a constante de Boltzmann. E terá o Kelvin como unidade, pois:

$$\theta_E = \frac{J \cdot s \cdot s^{-1}}{JK^{-1}} = K \quad (46)$$

Quando  $T \rightarrow 0$ ,  $\theta_E \gg T$  e portanto:

$$\frac{e^{\frac{\theta_E}{2T}}}{e^{\frac{\theta_E}{T}} - 1} \approx \frac{e^{\frac{\theta_E}{2T}}}{e^{\frac{\theta_E}{T}}} = e^{\frac{\theta_E}{2T}} \cdot e^{-\frac{\theta_E}{T}} = e^{(\frac{\theta_E}{2T}) - (\frac{\theta_E}{T})} = e^{-\frac{\theta_E}{2T}}$$

$$\text{Então: } f_E(T) = \frac{\theta_E}{T} e^{-\frac{\theta_E}{T}} \quad (47)$$

$$\text{Quando } T \rightarrow 0 \rightarrow e^{-\infty} = 0 \rightarrow f_E(T) = 0 \rightarrow C_{v,m}(T) = 0 \quad (48)$$

Porém quando  $T \rightarrow \infty$ : Nesse caso,  $T \gg \theta_E$  e aplicando a expansão de Taylor:

$$\frac{e^{\frac{\theta_E}{2T}}}{e^{\frac{\theta_E}{T}} - 1} = \frac{1 + \left(\frac{\theta_E}{2T}\right) + \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{\theta_E}{2T}\right)^2 \dots}{\left(1 + \left(\frac{\theta_E}{2T}\right) + \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{\theta_E}{2T}\right)^2 \dots\right) - 1} \quad (49)$$

Desprezando-se os termos quadráticos e superiores:

$$\frac{e^{\frac{\theta_E}{2T}}}{e^{\frac{\theta_E}{T}} - 1} = \frac{1 + \left(\frac{\theta_E}{2T}\right)}{1 + \frac{\theta_E}{T} - 1} = \frac{1 + \left(\frac{\theta_E}{2T}\right)}{\frac{\theta_E}{T}} \quad (50)$$

Então: 
$$f_E(T) = \left(\frac{\theta_E}{T}\right) \frac{1 + \left(\frac{\theta_E}{2T}\right)}{\frac{\theta_E}{T}} = 1 + \frac{\theta_E}{2T} \approx 1 \quad (51)$$

Assim, quando a temperatura tende a zero, a Capacidade Calorífera tende a zero conforme a teoria quântica. Quando a temperatura tende a infinito, a Capacidade Calorífera tende a  $3R$ , de acordo com as teorias quântica e clássica de Dulong-Petit (LEI DE DULONG [...], 2020).

Este resultado levou o renomado Walter Nernst (1864-1941) a ser um dos primeiros a aceitar a quantização de energia, já que o comportamento do calor específico a baixas temperaturas era consequência de sua formulação da 3ª Lei da Termodinâmica, segundo a qual a entropia tende a zero à medida que se aproxima do zero absoluto. Um ano depois, porém, medições mais precisas do grupo de Nernst mostraram desvios da lei de Einstein, que seriam corrigidas por Peter Debye (1884-1966) em 1912.

#### 4.4 WALTHER NERNST TORNA EINSTEIN FAMOSO

Apesar do miraculoso ano de 1905 quando publicou importantes artigos científicos, onde um deles corroborou a quantização de Planck de 1900, marco instituidor da Mecânica Quântica, Albert Einstein em 1911 ainda era um desconhecido funcionário de patentes. Porém em outubro de 1911, Einstein com 31 anos, foi convidado para uma conferência de elite, para discutir a teoria dos quanta. Na época, quatro dos 23 cientistas presentes já haviam ganhado um ou dois Prêmios Nobel e outros cinco acabariam também ganhando um prêmio, incluindo o próprio Einstein (HOW [...], 2019). Mas como surgira um convite de tamanha

envergadura para uma pessoa sem carreira acadêmica? Embora suas idéias sobre a relatividade estivessem lentamente ganhando força, suas teorias radicais de quantização da luz foram totalmente ignoradas, então, por que uma conferência sobre Mecânica Quântica?

Figura 12 - A Conferência de Solvay de 1911



Fonte : How the 3rd Law of Thermodynamics made Einstein famous - <https://youtu.be/ueqVVa4iA24>

O mentor desta Conferência e, conseqüentemente do reconhecimento de Einstein junto à comunidade acadêmica foi Walther Nernst (1864-1941), professor da Universidade de Berlim. Conforme relatos do ex aluno de pós graduação Robert Milikan (1868-1953) Nobel de Física em 1923, Nernst “era muito popular no laboratório, mas sempre tinha uma briga com alguém”. Apesar de não promover um bom exemplo de organização em seu laboratório, escritório ou sala de aula, nem de ser um pacificador, sua competência e fama o precedia e estava sempre livre para estudar o que quisesse. Muito bem sucedido financeiramente, possuía patentes de lâmpadas elétricas e fertilizantes à base de nitrogênio, uma preocupação comum dos químicos da época desde 1898 quando William Crookes (1832-1919) previu que os métodos agrícolas da época estavam esgotando o solo de nitrogênio e com o crescimento populacional, poderia haver fome no mundo (HOW [...],2019).

Nernst estava interessado em entender o comportamento anômalo do calor específico dos sólidos então, no início de 1910, tomou conhecimento de um inusitado artigo de 1907 de um funcionário de patentes, Albert Einstein, que provou

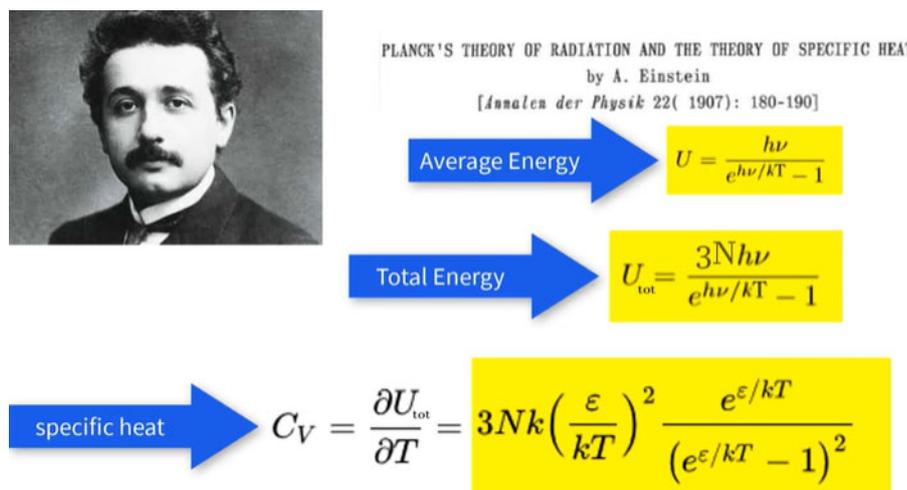
teoricamente que o calor específico chega a zero, mas apenas se abdicarmos da teoria clássica e coadunarmos com a mecânica quântica, instituída em dezembro de 1900 por um amigo pessoal de Nernst chamado Max Planck.

O próprio Planck não tinha convicção da discretização da energia, pois o objetivo era obter uma equação de radiação que funcionasse. Porém Einstein teve olhos de ver, e em 1905 assumiu que a luz era composta de “um número finito de quanta de energia que estão localizados em pontos do espaço, movem-se sem se dividir e podem ser absorvidos ou gerados apenas como um todo”. Planck acreditava que a luz era uma onda descrita pelas equações de Maxwell refutando a visão da descontinuidade de Einstein, mas se entusiasmava com seu terceiro artigo do *annus mirabilis* que instituiu a teoria da relatividade. Dois anos depois, em 1907 Einstein escreveu um artigo no qual decidiu usar a quantização de Planck para entender como os sólidos emitem ou absorvem o calor, impactando Nernst (HOW [...],2019).

Nernst medira exaustivamente o calor específico de vários materiais verificando calores específicos muito baixos em baixas temperaturas. Na verdade, todos eles parecem ir a zero à medida que se aproximam de zero grau. O calor específico é a energia térmica necessária por massa, para aumentar a temperatura de um objeto por grau. Se o calor específico for zero, o objeto não precisa de calor para que a temperatura aumente, significando que o objeto não ficará no zero absoluto. Em outras palavras, o zero absoluto é inatingível. Nernst estava cada vez mais convencido de que estava à beira de uma idéia profunda, mas frustrava-se com o fato de não ter base teórica para suas teorias.

Einstein com muita simplicidade usou a equação de Planck para a energia média das moléculas vibrantes em função da temperatura, multiplicando por três (dimensões) para encontrar a energia total. Finalmente ele tomou a derivada dessa energia em função da temperatura. Como derivada é a mudança instantânea, ele obteve uma equação para o calor específico. Em 1912 Peter Debye (1884-1966), Nobel de química em 1936, aprimora esta teoria do calor específico para baixas temperaturas.

Figura 13 - O calor específico para Einstein



. Fonte: How the 3rd Law of Thermodynamics made Einstein famous-<https://youtu.be/ueqVVa4iA24>

O artigo de Einstein de 1907, assim como o artigo pioneiro de 1905 foram ignorados pela comunidade científica, sendo infrutíferas as tentativas de Einstein em divulgar o quantum. Em maio de 1909, ele escreveu a um amigo: “Esta questão quântica é tão extraordinariamente importante e difícil que todos deveriam se dar ao trabalho de trabalhar nela”. Três meses depois, Max Planck convidou Einstein para dar sua primeira palestra importante. Planck provavelmente esperava que Einstein falasse sobre relatividade, mas em vez disso, falou sobre a mecânica quântica. “Uma teoria da luz que pode ser entendida como uma espécie de fusão das teorias de ondas e partícula”. Enquanto isso, Einstein ainda trabalhava como balconista de patentes, e no início de 1910 Nernst leu o artigo de Einstein de 1907 e ficou empolgado, pois, encontrara finalmente um suporte teórico não importando o quão radical fosse.

Nernst escreveu a um amigo: “A hipótese quântica de Einstein está provavelmente entre as construções de pensamento mais notáveis de todos os tempos, se estiver correta, indica caminhos completamente novos para todas as teorias moleculares.” O famoso e poderoso Nernst decidiu então visitar o “Boltzmann renascido” pessoalmente, tumultuando Zurique. Einstein consagrado pela teoria dos quanta escreve para um amigo: “Minhas previsões sobre o calor específico, aparentemente foram brilhantemente confirmadas e até Nernst esteve aqui para ver”.

Ainda em 1910, Nernst idealizou uma grande reunião científica para discutir questões quânticas, divulgar sua teoria da terceira lei da termodinâmica e promover

Einstein. Após ser desencorajado por Planck, o impaciente Nernst recorre a um rico fabricante de refrigerantes e filantropo científico chamado Ernest Solvay (1838-1922). Nernst organizou o primeiro encontro internacional de física em 1911 na cidade de Bruxelas e resolveu enviar 19 convites para os principais cientistas do mundo e um convite adicional e secreto para Einstein, que promoveu a teoria quântica, desestimada há onze anos.

Na Conferência de Solvay de 1911, até os mais conservadores se empolgaram com a palestra do desconhecido Einstein e, Marcel Briloouin (1854-1948) ressaltou “que a partir de agora teremos que introduzir em nossas idéias físicas e químicas uma descontinuidade, algo para mudanças nos saltos do qual não tínhamos noção há alguns anos atrás (HOW [...], 2019).

Após a Conferência, os participantes se imbuíram em divulgá-la como um dos secretários Maurice de Broglie descreveu a seu irmão mais novo Louis, que relata “Comecei a pensar em quanta desde o momento que meu irmão me deu as notas do Congresso de Solvay de 1911”. Ernest Rutherford, de volta à Inglaterra, discutiu a reunião com seu aluno de pós-graduação, um bom dinamarquês chamado Niels Bohr (HOW [...], 2019).

Bohr ganhou o Nobel de Física em 1922 pelo seu modelo atômico e Louis de Broglie em 1923 pela descrição da natureza ondulatória das partículas.

## Capítulo 5 Espectros de Emissão e Absorção do Hidrogênio: A falha da Óptica Clássica e a detecção de impressões digitais quânticas

Figura 14 - O espectro visível do sol



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzNQ&ctype=5-espectra-pexels-ben-mack-5707570+%282%29.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a6a368454\\_68dc2b06e610b1089691%40ip-10-81-5-43.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=5882078&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzNQ&ctype=5-espectra-pexels-ben-mack-5707570+%282%29.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a6a368454_68dc2b06e610b1089691%40ip-10-81-5-43.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=5882078&accountId=0)

### 5.1 ESPECTROS DE EMISSÃO E ABSORÇÃO

O espectro é um conjunto de comprimentos de onda ou frequências emitidos ou absorvidos por uma fonte. O espectro de emissão é obtido quando incidimos luz

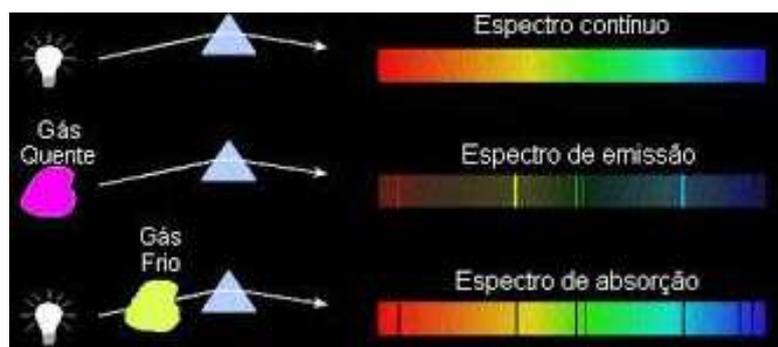
em um prisma, surgindo linhas coloridas obtidas pela dispersão da luz emitida pela amostra. Cada linha corresponde a um determinado comprimento de onda.

O espectro de absorção equivale às linhas escuras obtidas ao transmitir luz branca através da amostra. As linhas escuras estão sempre nas mesmas posições das linhas claras emitidas pela mesma amostra. Assim, o espectro de absorção coincide com o espectro de emissão.

A Espectroscopia é uma ferramenta imprescindível para a análise química de amostras diversas em laboratório e a composição química de estrelas distantes pode ser obtida analisando seus espectros de emissão. Importantes atores alemães protagonizaram o desenvolvimento da espectroscopia. Em 1814 Joseph von Fraunhofer (1787-1826), que fabricava instrumentos de vidro (lentes, prismas, microscópios e telescópios), inventou um aparelho que seria chamado de espectroscópio, e percebeu a existência de várias linhas escuras (*espectro de Fraunhofer*) no espectro solar, que esperava ser contínuo. Tais linhas escuras foram explicadas por Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) e Robert Wilhelm Eberhard von Bunsen (1811-1899) em 1859.

Kirchhoff enunciou as chamadas três leis da espectroscopia: 1ª) Um corpo opaco aquecido, independente de seu estado físico, emite um espectro contínuo. 2ª) Um gás rarefeito transparente, produz um espectro de emissão com surgimento de linhas brilhantes. O número e a posição dessas linhas dependem dos elementos químicos presentes no gás. 3ª) Se um espectro contínuo passar por um gás à temperatura mais baixa, o gás frio causa a presença de linhas escuras, ou seja, será formado um espectro de absorção. O número e a posição dessas linhas depende dos elementos químicos presentes no gás.

Figura 15 - Espectro de absorção e emissão



Fonte: <https://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/Aula17-132.pdf>

Ressaltemos que a Alemanha experimentou sua revolução industrial a partir da metade do século XIX, o que fomentou um notável desenvolvimento na termodinâmica e uma grande produtividade de sua comunidade científica. Isto desencadeará no futuro, o surgimento da mecânica quântica. Conforme relata Saraiva (2014), Fraunhofer possuía uma expertise na construção de instrumentos ópticos.

## 5.2 AS LINHAS DE BALMER

Johann Jacob Balmer (1825-1898) foi um matemático suíço que em 1885 descobriu empiricamente, uma fórmula que instigou o desenvolvimento da teoria atômica e da evolução da espectroscopia. Balmer foi professor de matemática no Ensino Médio durante 39 anos. Também lecionou geometria entre 1865 e 1890, na Universidade de Basel.

Em 1885 ele publicou um artigo que descreve “notas sobre as linhas espectrais do hidrogênio” (*Notiz über die Spectrallinien des Wasserstoffes, Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft*). Foi o primeiro a desenvolver uma fórmula empírica que permitia prever o comprimento de onda de luz do espectro de emissão do hidrogênio. Mais tarde explicada por Bohr como sendo emitida em qualquer transição eletrônica num átomo de hidrogênio de um estado excitado para o nível  $n = 2$ . As linhas espectrais constituem a chamada série de Balmer, a primeira das séries espectrais a serem observadas experimentalmente. A fórmula de Balmer serviu como modelo para as fórmulas de outras séries espectrais, sendo fundamental na espectroscopia atômica. Ao observar o espectro de emissão do Hidrogênio, Balmer utilizou os valores dos comprimentos de ondas observados nas linhas e formulou uma relação matemática:

$$\lambda = B \left( \frac{n^2}{n^2 - m^2} \right) \quad (52)$$

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda, B é a constante de Balmer, originalmente chamada de número fundamental do Hidrogênio e representada por H e vale

$3,6450682 \times 10^{-7} \text{nm}$ ;  $m = 2$  e  $n$  é um número inteiro tal que  $n > m$ . Adotando  $m = 2$  e valores de  $n$  a partir de 3, obtemos o valores dos comprimentos de onda visíveis no espectro de emissão do Hidrogênio.

$$n = 3 \rightarrow \lambda = 656 \text{ nm}$$

$$n = 4 \rightarrow \lambda = 486 \text{ nm}$$

$$n = 5 \rightarrow \lambda = 434 \text{ nm}$$

$$n = 6 \rightarrow \lambda = 410 \text{ nm}$$

$$n = 7 \rightarrow \lambda = 397 \text{ nm} \Rightarrow \text{não visível para Balmer}$$

Figura 16 - Espectro de absorção e emissão do Hidrogênio



Fonte: <http://www.if.ufrgs.br/cref/camiladebom/Aulas/Pages/3.html>

Três anos mais tarde, o físico sueco Johannes Rydberg (1854-1919) generalizou a fórmula de Balmer de modo a poder prever-se o comprimento de onda da radiação emitida em qualquer transição eletrônica entre dois níveis no átomo de hidrogênio. Vale ressaltar que em 1888 não se conhecia o elétron e nem o núcleo atômico, o que nos faz afirmar que tais equações eram produto de abstrações puramente matemáticas.

$$\boxed{\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)} \quad (53)$$

$$\lambda = \text{comprimento de onda}, \quad R_H = \frac{4}{B} = \text{cte de Rydberg} = 1,0973 \times 10^{-1} \text{ mm}^{-1}$$

e  $n_1$  e  $n_2$  são inteiros com  $n_1 < n_2$ . Com  $n_1 = 2$ :

$$\boxed{\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)} \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R_H}{4} - \frac{R_H}{n^2}$$

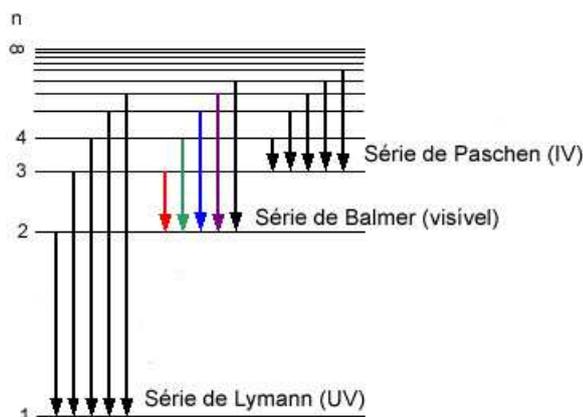
$$\frac{1}{\lambda} = -R_H \frac{1}{n^2} + \frac{R_H}{4}, \text{ que é a equação de uma reta } (y = ax + b)$$

$OR_H$  vale  $0,0110 \text{ nm}^{-1}$  e pode ser obtido pela inclinação da reta.

$$\boxed{y = -0,011x + 0,0027} \quad (54)$$

De acordo com Ribeiro (2014), por ser matemático, Balmer encontrou sua relação matemática a partir de dados observacionais sem se ater aos aspectos conceituais da então física clássica. Sua equação descrevia adequadamente os espectros de emissão e de absorção do hidrogênio na região visível e foi aprimorada por dois alemães, em 1906 por Theodore Lyman (1874-1954) para a região do ultravioleta e em 1908 por Friedrich Paschen (1865-1947) para a região do infravermelho. No entanto, a equação de Balmer se mostra como mais um problema resolvido pela quantização da energia. Assim, somente vinte e oito anos depois, em 1913, Niels Bohr (1885-1962) descobriu que o enunciado da equação de 1885 se encaixava com sua teoria dos estados discretos de energia do átomo de hidrogênio (ESPECTROS [...], 2011).

Gráfico 9 - Espectros do átomo de Hidrogênio



Fonte: <https://www.fq.pt/atomo/espectro-do-atomo-de-hidrogenio>

### 5.3 A ESPECTROSCOPIA E OS MODELOS ATÔMICOS DE THOMSON, NAGAOKA, JESSUP E NICHOLSON

Conforme relatam Filho e Matsumoto (2009), no início do século XX era interesse de vários pesquisadores, estabelecerem um modelo que explicasse a estrutura da matéria, apesar da aceitação da existência do átomo não ser um consenso. Muitos aceitavam a hipótese atômica, mas alguns proeminentes nomes como o químico Wilhelm Ostwald (1853-1932), futuro laureado com o Nobel de química de 1909 e o físico Ernest Mach (1838-1916) não admitiam uma estrutura corpuscular elementar para a matéria. O próprio Max Planck relutou antes de aceitar o átomo.

O ano de 1903 foi icônico para o físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940) e o físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950). Enquanto o primeiro palestrava na Universidade de Yale, nos Estados Unidos, o segundo palestrava na Sociedade de Física e Matemática em Tóquio e, de acordo com Filho e Matsumoto (2009), ambos apresentavam um modelo atômico.

Thomson já conhecia a existência do elétron desde 1897 e receberia em 1906 o Nobel de Física por isto. Conhecia também a partícula positiva idealizada em 1886

por Eugen Goldstein (1850-1930) que mais tarde seria chamado de próton por Ernest Rutherford (1871-1937), ganhador do Nobel de Química de 1908 por suas investigações sobre a desintegração dos elementos e a química das substâncias radioativas. Então, J.J.Thomson intuiu uma carga total nula e concebeu um modelo atômico que consistia em um volume esférico carregado com carga elétrica positiva, com elétrons estaticamente inseridos nesta massa esférica. Este modelo atômico recebeu a alcunha de pudim de passas.

Segundo Hentschel (2009), o primeiro modelo atômico planetário foi idealizado por Nagaoka, que se graduou em física pela Universidade de Tóquio em 1887 e depois de seu pós-doutorado na Alemanha e Áustria assumiu o cargo de professor em Tóquio se tornando mais tarde no mais importante físico moderno do Japão. Seu modelo, descrito por Filho e Matsumoto (2009), consistia de um átomo formado por um “caroço” central rodeado por anéis constituídos por partículas que giravam com velocidade angular única, como o planeta Saturno. Nagaoka, segundo Planas (2021) se amparava no fato de que cargas elétricas opostas são impenetráveis e propôs um modelo atômico baseado em uma esfera grande e massiva com uma carga elétrica positiva cercada por vários elétrons orbitando ao seu redor. Filho e Matsumoto (2009) afirmam que Nagaoka já sabia das limitações do seu modelo para justificar a estabilidade do átomo, o que ocorreria posteriormente também com o modelo atômico de Ernest Rutherford, que será sanado através da teoria quântica.

No ano de 1904, Thomson e Nagaoka publicaram seus modelos atômicos no mesmo volume da *Philosophical Magazine*, uma revista científica publicada até hoje que surgiu em Londres em 1798, quando filosofia natural era um termo que abrangia todas as ciências da natureza. Os dois pesquisadores tentaram, sem sucesso, explicar a existência das linhas espectrais, o que ocorrerá somente com o modelo do átomo de Bohr (1885-1962). De acordo com Filho e Matsumoto (2009), Nagaoka abandona seu modelo atômico em 1908 e segundo Ressurreição (2020), o modelo de Thomson desidrata um pouco antes da publicação em 1911, dos resultados encontrados com o espalhamento de partículas alfa, realizado em 1909 por Hans Geiger (1882-1945) e Ernest Marsden (1889-1970) com supervisão de Rutherford.

Compreenderemos melhor o trabalho de Nicholson após breve relato sobre a importância da espectroscopia para a compreensão da estrutura da matéria.

Conforme relatam Lopes e Martins (2007), desde as pesquisas desencadeadas por Gustav R. Kirchhoff (1824-1887) e Robert W. Bunsen (1811-1899) vários trabalhos que procuravam caracterizar elementos por meios espectroscópicos foram desenvolvidos por físicos, químicos e astrônomos. De acordo com Gonzalez (2013), após Bunsen inventar um bico de gás de chama limpa, foi possível obter um padrão de linhas espectrais de diferentes vapores químicos e em 1859, utilizando um espectroscópio desenvolvido por ele mesmo, Kirchhoff mostrou que todas as substâncias puras têm espectros característicos. A partir daí, descreve Lopes e Martins (2007), várias descobertas passam a acontecer, como o Césio em 1860 por Kirchhoff e Bunsen, o Rubídio por Bunsen em 1861, o Tálcio por William Crookes (1832-1919) em 1861 e o Índio por Ferdinand Reich (1799-1882) e Theodor Richter (1824-1898) em 1863. Surgiram também, os primeiros passos para novos campos de conhecimento que se construíram nas fronteiras da física, química e astronomia (astrofísica, astroquímica, cosmoquímica), como a “química solar de John Tyndall (1820-1893) em 1861 e a nova linha amarela no espectro do sol descoberta em 1868, que Norman Lockyer (1836-1920) chamou de Hélio. A espectroscopia aproximou a química, a física e a astronomia desencadeando progressos nos processos de investigação em todos os campos.

Em 1908, os pesquisadores britânicos A. C. Jessup e A. E. Jessup publicaram o artigo, que não é citado na história da teoria atômica: “A evolução e involução dos elementos” na *Philosophical Magazine*, que apresentava unidades elementares corpusculares (elétrons segundo Thomson) e partículas positivas (futuros prótons) que formariam os átomos.

Em 1911, o matemático e físico inglês John William Nicholson (1881-1955) inicia, conforme relatam Lopes e Martins (2007), uma série de publicações sobre espectroscopia ligadas à astronomia e sobre a constituição da matéria e propõe um modelo atômico baseado na teoria clássica, que evolui para um modelo quântico. Embora Nicholson seja uma figura muito pouco conhecida na história da química e da teoria atômica, suas pesquisas foram imprescindíveis para o desenvolvimento dos modelos atômicos no início do século XX. Nicholson teria sido o primeiro a criar um modelo atômico com elétrons com momentos angulares quantizados. Criou também uma teoria quântica para explicar as linhas espectrais solares e de nebulosas. Ele foi um grande matemático e pesquisava no campo da física e

astroquímica. Obteve o doutorado em matemática em Cambridge, e também foi contemporâneo de Bohr no laboratório Cavendish. Em 1912 assumiu como professor de Matemática em King's College London. Nicholson foi citado no famoso artigo de Niels Bohr de 1913, que institui seu modelo atômico.

Lopes e Martins (2007) descrevem que o primeiro trabalho sobre estrutura atômica, publicado por Nicholson em 1911 na *Astronomical Society*, intui um átomo planetário formado por um núcleo positivo que podem...

[...] existir em distribuições esféricas de pequeno volume e densidade uniforme, cujo raio é pequeno na comparação com o raio de um elétron, uma reversão do ponto de vista mais geralmente aceito. A massa destas unidades positivas é muito grande em comparação com a de um elétron, sendo responsável pela quase totalidade da massa de um átomo. O átomo é chamado "simples" quando contém somente uma unidade positiva e um único anel de elétrons que giram em volta dele. (LOPES e MARTINS, 2007, p. 4).

O modelo atômico de Nicholson não fora influenciado pelo experimento idealizado por Rutherford, das finas lâminas de ouro bombardeadas por partículas alfa. Na visão de Lopes e Martins (2007), Nicholson aglutina a esfera positiva nuclear de Thomson (1904) e o modelo saturniano de Nagaoka (1904) com anéis de elétrons girando em torno do núcleo positivo com velocidade angular comum. Ele também acreditava que cada distribuição eletrônica corresponde a uma emissão específica no espectro de raios dos átomos.

Em artigo publicado em 1912, Nicholson cita pela primeira vez a teoria de Planck, considerando que os elétrons se assemelham aos osciladores de Planck, intuindo que o momento angular poderia assumir apenas determinados valores.

Assim, se a constante  $h$ , de Planck tem, como Sommerfeld tinha sugerido, um significado atômico, ele pode significar que o momento angular de um átomo pode somente aumentar e diminuir em valores discretos quando elétrons saem ou retornam. (LOPES e MARTINS, 2007, p. 5)

## 5.4 O ÁTOMO DE RUTHERFORD

O experimento de 1909 realizado na Universidade de Manchester por Hans Geiger (1882-1945) e Ernest Marsden (1889-1970), capitaneado por Ernest Rutherford (1871-1937) tinha como objeto, estudar a estrutura do átomo. Com este experimento, o experimento da folha de ouro, Rutherford se contrapôs ao modelo de Thomsom, inferindo a existência de um pequeno núcleo, que rechaçava partículas alfa disparadas nos átomos de ouro.

Esta representação clássica planetária baseada nos experimentos de Rutherford coloca o átomo como um sistema simples, com elétrons orbitando ao redor do núcleo como planetas ao redor do sol. Este modelo pictórico, além de equacionado de maneira idêntica, era filosoficamente atraente, pois igualava o macro e o micro, tornando-se extremamente aceitável na comunidade científica. No entanto, de acordo com a mesma teoria clássica, esse átomo não poderia existir.

Os elétrons do átomo de Rutherford parecem estar em condições muito mais favoráveis do que, por exemplo, os satélites artificiais da Terra, pois parecem totalmente livres de quaisquer forças dissipativas por não haver mais nada no espaço ao redor do núcleo. Já os satélites, que em face de pequena resistência do ar, eventualmente caem por perda de energia. Ou seja, os elétrons deveriam ser "planetas" ideais, sem perdas de energia no caminho.

Porém, esta tese despreza o fato fundamental de que cada elétron carrega uma carga elétrica e, conseqüentemente, seu próprio campo eletromagnético. Assim, este elétron executando um movimento circular, possui aceleração centrípeta e de acordo com a teoria eletromagnética clássica, emite radiação e perde energia. Conforme relata Fayngold (2013), temos como resultado após cerca de  $10^{-8}$  segundos, a colisão do elétron com o núcleo, deixando de existir o átomo de Rutherford.

De um lado, temos os experimentos de Rutherford que mostram um modelo atômico possível e estável. De outro, temos uma teoria que além de não explicar os espectros de emissão e absorção, afirma que as orbitas de Rutherford tendem a colapsar. Teria a teoria clássica falida ou ela é somente limitada?

## 5.5 O ÁTOMO DE BOHR E A EXPLICAÇÃO PARA AS LINHAS

Bohr propõe uma maneira de justificar a estabilidade do átomo de Hidrogênio, incompatível com o eletromagnetismo clássico, além de explicar seu espectro observado. Ele impõe de maneira oficialmente original e sem nenhuma justificativa, que o raio de órbita do elétron não pode ser um raio qualquer. Ele não pode ser uma variável contínua e sim, uma variável discreta, quando somente alguns valores de raios podem existir e ainda impõe uma quantização do momento angular do elétron em sua trajetória circular, com valores múltiplos de um valor fundamental:

$$\boxed{L = n\hbar}, \quad (55)$$

Onde  $L$  é o momento angular e  $\hbar$  é a constante de Planck reduzida  $\left(\hbar = \frac{h}{2\pi}\right)$

Bohr continuava admitindo para o átomo, um núcleo central muito massivo com órbitas circulares dos elétrons conforme previa Rutherford. A força de atração elétrica entre núcleo e elétrons tinha uma função centrípeta:

$$F_{el} = F_{cp} \quad (56)$$

$$\frac{ke^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (57)$$

Como momento angular pode ser descrito por:  $L = mvr = n\hbar$ , temos:

$$v = \frac{n\hbar}{mr} \quad e \quad v^2 = \frac{n^2\hbar^2}{m^2r^2}, \quad \text{então:}$$

$$\frac{ke^2}{r^2} = \frac{m n^2 \hbar^2}{r m^2 r^2}$$

$$r = n^2 \frac{\hbar^2}{mke^2} \quad (58)$$

$\frac{\hbar^2}{mke^2} = a_B$ , chamado de raio de Bohr

$$\boxed{r = n^2 a_B} \quad a_B = 0,529 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (59)$$

Percebe-se acima uma expressão para os raios de órbita possíveis. Quando  $n = 1$ , temos que o raio de órbita do elétron é o próprio raio de Bohr, associado à órbita de menor energia e a mais estável. Analisando a Energia, temos:

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \quad (60)$$

O sinal negativo significa que o referencial está no infinito, significando que quando a energia vale zero, o elétron e o núcleo estão infinitamente distantes. E ainda:

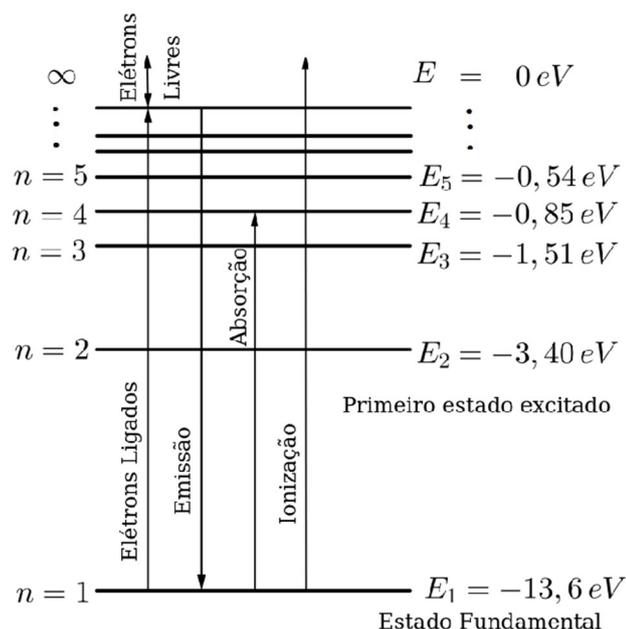
$$\boxed{E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{ke^2}{2a_B}} \quad (61)$$

O termo  $\frac{ke^2}{2a_B}$  pode ser chamado de Energia de Rydberg ( $E_R$ ), então:

$$\boxed{E_n = -\frac{1}{n^2} E_R} \quad (62)$$

Podemos perceber que a quantização do momento angular imposta por Bohr, resultou na quantização dos raios das órbitas dos elétrons e na quantização dos níveis de Energia (ÁTOMO [...], 2014).

Gráfico 10 - Diagrama de níveis de Energia do átomo de Hidrogênio



Fonte: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQH8VI0yTP4GsDQstkNA\\_2rSI5WCnpLPllU66ILL45XJC2-BaX7IPC1zHC3OgCQWIPg\\_L4&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQH8VI0yTP4GsDQstkNA_2rSI5WCnpLPllU66ILL45XJC2-BaX7IPC1zHC3OgCQWIPg_L4&usqp=CAU)

Podemos entender que haverá absorção de energia quando o elétron passar de um nível de energia mais estável para outro nível superior, e isto só será possível se este ganho de energia, ou seja, se este fóton possuir energia igual à diferença energética entre estes dois níveis. Assim só acontecerá uma transição (salto quântico) de um elétron entre dois níveis quaisquer, se este receber um fóton com energia equivalente a respectiva diferença energética. Este novo estado excitado onde agora se encontra o elétron é instável, e o mesmo tende a voltar para seu nível mais estável emitindo um fóton com mesma energia.

Assim chegamos à relação:  $E_{\gamma} = E_n - E_{n'}$ , (63)

o que equivale dizer que na absorção  $n'$  é o nível de partida e  $n$ , o nível de chegada.

$$E_{\gamma} = -\frac{1}{n^2}E_R + \frac{1}{n'^2}E_R \quad (64)$$

$$E_Y = E_R \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (65)$$

$$\boxed{\frac{1}{\lambda} = \frac{E_R}{hc} \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)} \quad (66)$$

A equação acima desenvolvida por Bohr a partir das quantizações acima citadas é equivalente a equação de Balmer-Rydberg, puramente matemática advinda de observações, sem nenhum argumento físico.

Para a constante de Rydberg, Bohr finaliza:

$$R = \frac{E_R}{hc} \quad (67)$$

$$R = \frac{ke^2}{2a_B} \frac{1}{hc} \quad (68)$$

$$R = \frac{ke^2 m ke^2}{2\hbar^2} \frac{1}{hc} \quad (69)$$

$$R = \frac{2\pi^2 (ke^2)^2 m}{h^3 c} \quad (70)$$

$$\boxed{R = 0,0110 \text{ nm}^{-1}} \quad (71)$$

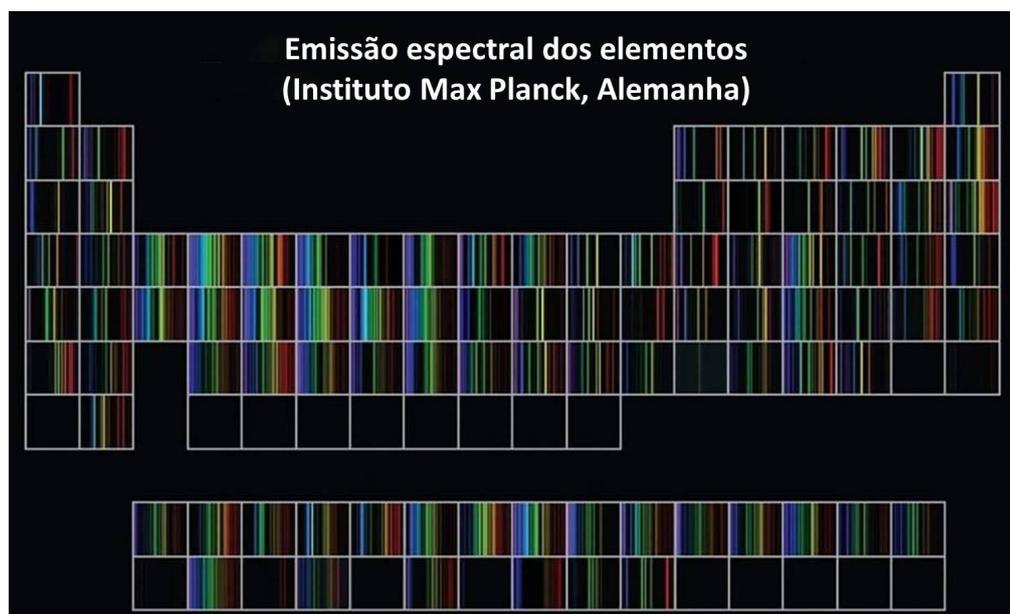
O valor da constante de Rydberg encontrado por Bohr usando conhecidas constantes fundamentais da natureza é o mesmo encontrado por Balmer-Rydberg, vinte e cinco anos atrás. Assim mais um problema que a teoria clássica não podia explicar, fora solucionado pela teoria quântica. Agora, o mistério das linhas espectrais de absorção e emissão tem uma explicação, pois o valor do comprimento de onda do fóton emitido ou absorvido pode ser estabelecido:

$$|\Delta E| = hf \quad (72)$$

$$|\Delta E| = \frac{hc}{\lambda} \quad (73)$$

$$\lambda = \frac{hc}{|\Delta E|} \quad (74)$$

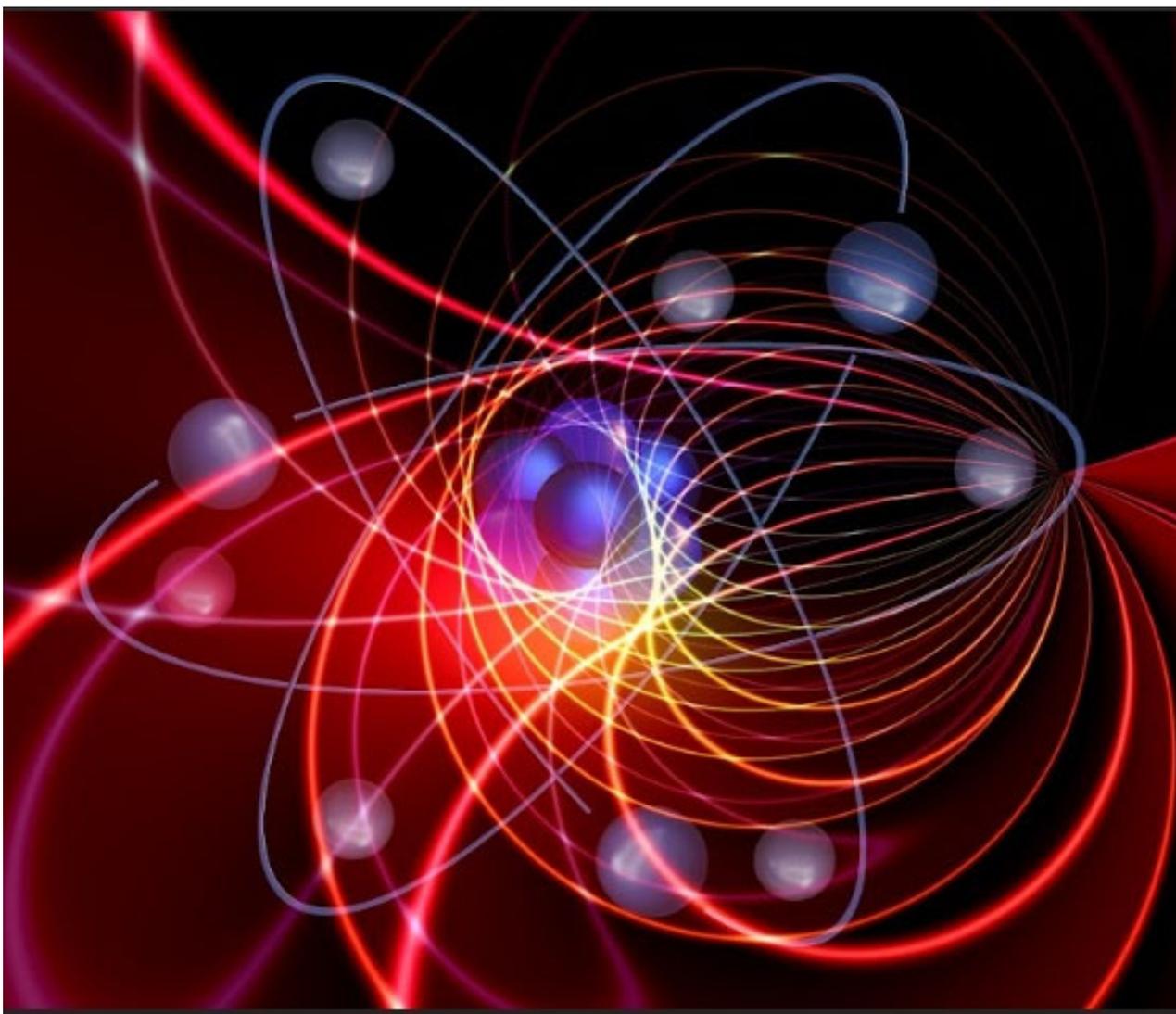
Figura 17 - Tabela Periódica com linhas espectrais de emissão dos elementos



Fonte: <https://www.facebook.com/QualitativaInorgUfrj/posts/3534108353284878/>

## Capítulo 6 Radioatividade: A deterioração do determinismo e a descoberta da Física Nuclear

Figura 18 - Abstração do mundo em escalas atômicas



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzNQ&ctype=Radioatividade-Image+by+Gerd+Altmann+from+Pixabay+physics-3871216+%282%29.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a6a365822\\_68dc2b06e610b108968ec%40ip-10-81-5-43.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=1922116&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzNQ&ctype=Radioatividade-Image+by+Gerd+Altmann+from+Pixabay+physics-3871216+%282%29.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a6a365822_68dc2b06e610b108968ec%40ip-10-81-5-43.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=1922116&accountId=0)

## 6.1 OS RAIOS CATÓDICOS

A radioatividade é um fenômeno natural que revolucionou a ciência e a tecnologia desde sua descoberta, no início do século XX. Este fenômeno, que envolve a emissão de partículas subatômicas e radiação por átomos instáveis, tem uma história fascinante que se desenrolou ao longo dos anos. Neste texto, examinaremos os aspectos históricos da radioatividade, desde suas descobertas iniciais até os desenvolvimentos posteriores que moldaram nossa compreensão atual desse fenômeno que desencadeou avanços não apenas no campo da física nuclear, mas também motivaram profundos impactos na medicina e na indústria.

Conforme relata Piedade (2023), em 1838 Michael Faraday (1791-1867) se interessou pelos experimentos de descargas elétricas em tubos de vácuo, realizadas por Heinrich Geissler (1814-1879). Faraday desenvolve uma ampola de vidro em forma de ovo dotada de dois eletrodos (*Faraday Electric Egg*) e estudou a relação entre a condução elétrica em um gás rarefeito e a pressão no interior da ampola, observando também pequenas descargas elétricas em seu interior. Vinte anos depois, utilizando um aparato mais adaptado, Julius Plucker (1801-1868), um colega de Geissler, juntamente com seu aluno Jonatham Hittorf (1824- 1914), utilizando tensões mais elevadas produziram feixes de partículas que, segundo Martins (1998), interagia com campos magnéticos. Em 1876, Eugen Goldstein (1850-1930) batiza os estranhos raios por Raios Catódicos.

Os raios catódicos tiveram um longo caminho para seu entendimento, desencadeando várias descobertas, como a do elétron. A ampola de Crookes, amplamente utilizada neste período, que é feita de vidro e tem o vácuo no seu interior, contém duas placas metálicas que são ligadas a uma fonte de tensão elétrica. Cátodo é como chamamos a placa que é ligada ao polo negativo, e anodo é a unificada ao polo positivo. A tensão que se forma entre o cátodo e o anodo, quando fica elevada, gera o feixe luminoso que sai do cátodo atravessando o tubo inteiro.

Sir William Crookes (1832-1919) foi um físico e químico britânico descobridor do elemento químico Tálcio, e ainda identificou a primeira amostra conhecida de Hélio em 1895. Foi o inventor do radiômetro de Crookes e desenvolveu os tubos de mesmo nome, investigando os raios catódicos. Em suas pesquisas sobre a

condutividade elétrica em gases sob baixa pressão, descobriu que, à medida que se diminuía a pressão e aumentava a tensão elétrica, o eletrodo negativo emitia raios catódicos, que hoje se sabe tratar-se de um feixe de elétrons livres. Foi um dos primeiros a investigar o que hoje chamamos de plasma.

Cabe ressaltar que naquela época não se sabia da existência do elétron. Experimentos com o Tubo de Crookes eram comuns em toda comunidade científica mundial, porém Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) se notabilizou com a publicação do artigo, *Über Eine Neue Art von Strahlen* ("Sobre uma nova espécie de Raios") em 28 de dezembro de 1895.

## 6.2 OS RAIOS X

Por acaso Wilhelm Röntgen (1845-1923) certa noite estava em seu laboratório trabalhando com uma ampola de Crookes, onde no seu interior existiam gases em pequena quantidade e a baixas pressões. Em suas extremidades, havia dois eletrodos que estabeleciam uma diferença de potencial, passando corrente elétrica pelos gases dentro do tubo. A ampola de Crookes estava coberta com papel-cartão preto e as luzes estavam apagadas.

Röntgen percebeu, de acordo com Martins (1998) que uma tela contendo platinocianeto de bário, que por acaso estava no seu laboratório, começou a brilhar quando a corrente surgia dentro do tubo, apesar de que a placa estar a alguns metros de distância do tubo, mesmo com alguns objetos se interpondo entre eles. Platinocianeto de Bário é uma substância fluorescente que emite luz visível quando absorve energia, mas de onde vinha esta energia? Röntgen sabia se tratar de uma nova radiação e por não saber, chamou de Raios-X. Obteve o reconhecimento máximo com o prêmio Nobel em 1901 “em reconhecimento aos extraordinários serviços que a descoberta dos notáveis raios que levam seu nome possibilitara” e tem como homenagem, seu nome em um elemento químico, o Roentgenio (111-Rg). Apesar de ter ganhado seu nome, hoje majoritariamente são chamados de raios X, como preferia o próprio Roentgen. Ele doou todo prêmio em dinheiro obtido pelo Nobel para a Universidade de Munique, pois relatava que “a ciência devia estar a serviço da humanidade e não do lucro pessoal.”

Os raios catódicos são estabelecidos entre os dois eletrodos (do catodo ao anodo) e quando os elétrons atingem o anodo, eles perdem energia cinética. Esta perda é a origem da radiação eletromagnética raio X, que é também chamada de *Bremsstrahlung*, radiação de frenagem em alemão. Röntgen notou também que eles não sofriam desvio por campo elétrico e podiam sensibilizar uma chapa fotográfica. Ele não sabia explicar a origem dos Raios X, só sabia observá-los, pois neste momento histórico, ainda não se conhecia nêutron, próton e elétron, mas mesmo assim, era possível usá-lo em aplicações médicas. Segundo Martins (1998), Röntgen fez a primeira radiografia usando a mão de sua esposa, pois percebeu que átomos mais pesados possuíam a propriedade de *bloquear* os raios X e como os ossos são mais densos que outros tecidos, eles farão o papel de *meio opaco*, projetando no filme uma *sombra*.

A aplicação após descoberta foi rápida, pois a descoberta dos raios x ocorrera em novembro e a primeira radiografia em dezembro de 1895, um mês após. Em menos de dois meses, os mais importantes jornais do mundo já haviam noticiado esta descoberta, o que proporcionou, segundo Lovejov (2020), que um hospital em Montreal utilizasse os raios-X para localizar e extrair um projétil da perna do paciente Toulson Cunning, baleado em 25 de dezembro de 1895. Em maio de 1896 os raios X foram preponderantes para extrair balas do braço de um soldado italiano, ferido em campanha contra os etíopes. Marie Currie inventou um aparelho portátil que emitia Raio X, amplamente utilizado na 1ª Guerra Mundial.

Como a utilização do Tubo de Crookes em pesquisas era muito comum nesta época, várias Universidades pelo mundo replicaram rapidamente o experimento de Röntgen, popularizando os raios-X em aplicações na medicina. Curioso é que o próprio Crookes já havia percebido, segundo seus relatos, a existência dos raios X, pois várias placas fotográficas em seu laboratório inexplicavelmente também ficavam borradas.

### 6.3 A ORIGEM DA RADIOATIVIDADE

Cabe ressaltar que os raios X não são o mesmo que radioatividade. Os raios X são ondas eletromagnéticas de alta energia, com comprimento de onda no intervalo aproximado de  $10^{-11}$  a  $10^{-8}$  m (0,1 a 100 Å), portanto altamente penetrantes

e resultam da colisão entre elétrons, ou seja, originam-se fora do núcleo do átomo. Já a radioatividade caracteriza radiações emitidas de núcleos atômicos instáveis. A descoberta dos raios X suscitou quase instantaneamente um grande número de trabalhos na Academia de Ciências de Paris e foi a principal motivação para o trabalho inicial de Antoine Henri Becquerel (1852-1908).

Antoine Henri iniciou sua carreira científica, de acordo com Oliveira (2019), seguindo os passos do pai, Alexandre-Edmond Becquerel (1820-1891). Suas principais investigações científicas de Becquerel foram sobre os fenômenos ópticos, especialmente a fosforescência utilizando compostos de urânio colecionados por seu pai. Segundo Martins (1990), a utilização de compostos de Urânio em pesquisas ópticas era muito comum na época. E o diferencial de Becquerel foi o uso de uma nova substância, o sulfato duplo de uranila e potássio.

Becquerel deixou ao sol amostras de um composto de urânio, o sulfato duplo de potássio e a uraniladi-hidratada. Em seguida, ele colocou essas amostras em contato com um filme fotográfico envolvido por um invólucro preto para ver se elas impressionavam o filme e, assim, emitiam raios X. Entretanto começou a chover em Paris e Becquerel teve que guardar as suas amostras em uma gaveta escura com alguns filmes virgens protegidos com um papel preto. Segundo Martins (1990), é questionável a pregada descoberta acidental da radioatividade, porém Becquerel relatou à Academia de Ciências da França em 1896, o supracitado acontecimento:

Como o Sol não apareceu de novo nos dias seguintes, revelei as placas fotográficas a 1º de março, esperando encontrar imagens muito fracas. Ao contrário, as silhuetas apareceram com grande intensidade. Pensei logo que a ação devia ter continuado na obscuridade e preparei a experiência seguinte: No fundo de uma caixa de cartão opaco coloquei uma placa fotográfica; depois, sobre o lado sensível, coloquei uma lamela do sal de urânio, lamela convexa [com a parte central mais alta] e que tocava a gelatina apenas em poucos pontos; então, ao lado, na mesma placa, coloquei outra lâmina do mesmo sal, separada da gelatina por uma fina lâmina de vidro. Após realizar essa operação, na sala escura, a caixa foi fechada, então colocada dentro de outra caixa de papelão e por fim dentro de uma gaveta. (MARTINS, 1990, p. 34).

Segundo Oliveira (2019), Somente quando Marie e Pierre Curie descobriram substâncias muito mais ativas do que o urânio, houve uma maior divulgação da descoberta e dos efeitos da radioatividade, se tornando um fenômeno de grande importância para os físicos.

Marie Scklodowska Curie (1867-1934), objetivando iniciar sua tese de doutorado, decidiu estudar os *raios de Becquerel* e teve apoio de Pierre Curie (1859-1906), que promoveu seu acesso a laboratórios, ao seu rico aparato experimental e a minérios específicos. Eles descobriram que a propriedade verificada era pertencente ao urânio, pois todos os minérios de urânio, além de outros como o Tório, emitiam os raios que impressionavam o filme. Marie Curie batizou essa propriedade de o urânio emitir raios de *radioatividade*.

Os trabalhos do casal Curie protagonizaram avanços nos estudos da radioatividade. Em 1902, isolaram átomos de dois elementos químicos radioativos que não eram conhecidos na época. O *Rádio* (do latim *radius*, *raio*) muito mais radioativo que o Urânio e o *Polônio*, em homenagem à terra natal de Madame Curie. Em 1903, Marie Curie, Pierre Curie e Antoine-Henri Becquerel dividiram o Prêmio Nobel de Física pelos seus trabalhos com radioatividade.

Ernest Rutherford possuía dois brilhantes assistentes em Manchester, o jovem doutor Hans Geiger (1882-1945) e o estudante de graduação Ernest Marsden (1889-1970). Eles pesquisavam penetrabilidade de partículas  $\alpha$  em vários materiais, além de técnicas de contagem delas. Tais experimentos sobre comportamento das partículas alfa quando em interação com a matéria, culminaram em uma primeira publicação: *On a Diffuse Reflection of the  $\alpha$  - Particles*, na Royal Society em 1909. Conforme relata Lopes (2009), Geiger e Marsden mostraram resultados em lâminas de estanho, ouro, platina, chumbo, cobre, ferro e alumínio. Em uma segunda publicação mais detalhada feita por Geiger em 1910, o ouro recebeu destaque em relação aos outros metais.

Tais experimentos motivaram Rutherford a comunicar na Manchester Literary and Philosophical Society e publicar na revista *Philosophical Magazine and Journal of Science*, em maio de 1911 um artigo que descreve a dispersão de partículas  $\alpha$  e  $\beta$  pela estrutura do átomo, propondo seu modelo atômico, com um pequeno núcleo massivo e central e elétrons a sua volta. Na verdade Rutherford não afiançou neste artigo, uma trajetória planetária para o elétron, para ele o átomo era composto por um núcleo e uma esfera eletrificada de carga negativa. Cabe ressaltar que o modelo atômico de 1903 de Hantaro Nagaoka (1865-1950) anteriormente citado, dá justificativa teórica para a radioatividade, com quebras ocasionais dos anéis

saturnianos. De acordo com Hentschel (2009), Nagaoka afirmava que os elétrons eram ejetados dos átomos na forma de raios beta.

Rutherford refutou a tese de Thomsom da existência de pequenos desvios sucessivos no bombardeamento de partículas alfa, pois constatou alguns dos desvios ao atravessarem finas lâminas de ouro eram superiores a  $90^\circ$ . Assim, ele inferiu que os desvios decorriam de um único encontro da partícula com uma zona de intenso campo elétrico em uma zona central, um núcleo que poderia ser dotado de carga positiva e uma zona difusa à sua volta, com carga negativa. Corrêa (2014) ressalta que neste momento, Rutherford não tinha convicção em sua teoria, sobre ao sinal da carga elétricas do núcleo, mas tinha a noção de sua importância, que além de massivo, determinava as características físicas e químicas dos elementos, e ainda determinava o número e a distribuição dos elétrons ao seu redor.

Novos experimentos de Geiger e Marsden em 1913 corroboraram o modelo atômico de Rutherford o que o faz publicar outro artigo em março de 1914, mais detalhado sobre o núcleo (“The Structure of the Atom”), na mesma revista que publicara seu primeiro artigo em 1911. Ele inferiu que o átomo consistia num núcleo de pequenas dimensões carregado positivamente no qual se concentrava praticamente toda a massa do átomo. Da mesma forma que Bohr, Rutherford questiona a possibilidade de existência de elétrons no núcleo e também concluiu que as partículas  $\beta$  provinham do núcleo. O átomo de Rutherford instigou a comunidade científica sendo base para outros modelos atômicos e inaugura o que no futuro vai se chamar física nuclear. Ele relata

:

Para explicar os grandes desvios angulares das experiências de dispersão das partículas  $\alpha$ , supus que o átomo consistia num núcleo de pequenas dimensões carregado positivamente no qual se concentrava praticamente toda a massa do átomo. Considerei o núcleo rodeado de elétrons, de modo a tornar o átomo eletricamente neutro, distribuídos a distâncias comparáveis ao que se considera ser o raio do átomo. (CORRÊA, 2014, p. 2).

A radioatividade é a desintegração espontânea de alguns núcleos atômicos em face de emissão de partículas ou radiação eletromagnética. Um elemento químico é radioativo quando seu núcleo é instável e esta instabilidade vem do desequilíbrio entre duas forças ali existentes, a força eletrostática e a força nuclear forte. A primeira força determina a repulsão entre os prótons e a segunda, com alcance limitado a distâncias de dimensão do diâmetro atômico, é intermediada por

uma partícula elementar, o glúon que tem como função manter os quarks juntos uns aos outros, bem como os nêutrons e prótons no núcleo atômico. O excesso de prótons ou nêutrons no núcleo promove desequilíbrio entre as citadas forças motivando a instabilidade, haja vista que, de acordo com Parkhomenko (2005), todo átomo com mais de 82 prótons é radioativo. Chamamos de decaimento radioativo, o rompimento do núcleo em face desta instabilidade e na busca do equilíbrio, o núcleo atômico emite radiações alfa, beta e gama. Ressaltemos ainda que, conforme relata Silva (2019), não possuímos leis determinísticas de desintegração para átomos individuais. O que temos é que o fenômeno de desintegração radioativa é de natureza estatística para uma grande amostra de núcleos.

O decaimento alfa, o mais comum, surge com a emissão de dois prótons e dois nêutrons com velocidade igual a um décimo da velocidade da luz e tem baixo poder de penetração na matéria. Após a eliminação um novo átomo/núcleo é formado com número atômico de duas unidades menor que o do átomo originário e número de massa quatro unidades menor. O decaimento alfa é comumente encontrado em núcleos pesados, como o urânio-238 e o rádio-226. Esse processo é regido por interações nucleares fortes.



O decaimento beta é um tipo de decaimento radioativo em que um núcleo instável emite um elétron ( $\beta^-$ ) ou um pósitron ( $\beta^+$ ). No decaimento beta negativo ( $\beta^-$ ), um nêutron se transforma em um próton, um elétron e um antineutrino. No decaimento beta positivo ( $\beta^+$ ), um próton se transforma em um nêutron, um pósitron e um neutrino. Essa transformação muda o número atômico do núcleo, enquanto o número de massa permanece o mesmo. Possui penetrabilidade intermediária na matéria, com 90% da velocidade da luz no vácuo. Este tipo de emissão é regido por interações nucleares fracas.



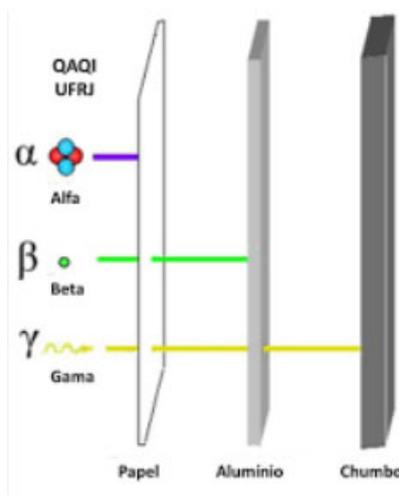


O decaimento gama é um processo no qual um núcleo excitado emite uma partícula de alta energia, chamada fóton gama ( $\gamma$ ), para alcançar um estado de menor energia. Estes fótons não possuem carga elétrica nem massa, possuem alto poder de penetração na matéria e velocidade  $c$ . Esse tipo de decaimento não promove a transmutação e geralmente segue os decaimentos alfa e beta para estabilizar o núcleo.



*m significa metaestável*

Figura 19 - Penetrabilidade das radiações



Fonte: <https://www.facebook.com/QualitativInorgUfrj/photos/a.903760846319655/3565962100099503/?type=3>

As radiações podem ser classificadas em ionizantes, quando possui energia suficiente para arrancar elétrons dos átomos produzindo cátions e não ionizantes. Podemos exemplificar as radiações ionizantes com os raios-X e as radiações alfa,

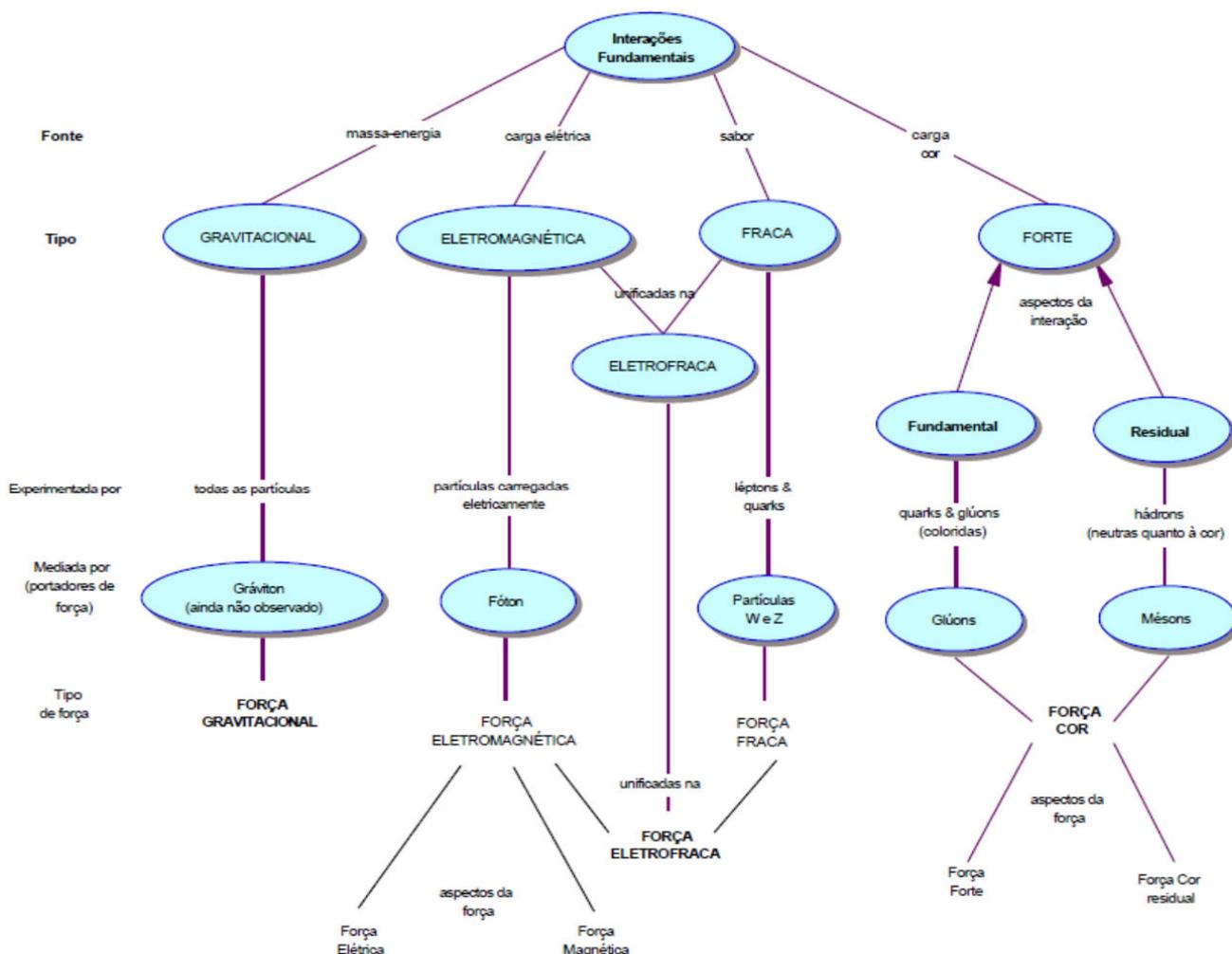
beta e gama. As ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível e ultravioleta são exemplos de radiação não ionizante.

Apesar de ter sido constatada em 1896 por Becquerel e investigada incansavelmente pelo casal Curie, o que motivou um prêmio Nobel de Física em 1903 para o trio, uma explicação consistente para a radioatividade não encontrou amparo teórico no conhecimento até então existente.

O raio de Becquerel fez parte do rol dos fenômenos sem explicação e ombreou juntamente com o problema da capacidade térmica para sólidos (Lei de Dulong – Petit 1819), com a radiação do corpo negro (Kirchhoff 1860), com as linhas espectrais do átomo de hidrogênio (Balmer 1885) e com o efeito fotoelétrico (Hertz 1887); na busca de uma teoria esclarecedora em face da limitação da Física Clássica. Somente com o surgimento de uma *física moderna*, ou seja, com o advento da teoria quântica, todas as inseguranças conceituais foram sanadas. Neste diapasão de descobertas, a radioatividade foi contemplada no início do século XX, com o desenvolvimento de um modelo que descreve as partículas que constituem a matéria e suas interações. Estamos falando do Modelo Padrão da Física de Partículas, uma teoria quântica de campos desenvolvida nos anos 70 do século XX e estudada até hoje.

Conforme relata Moreira (2004), não somente devemos conhecer as várias partículas constituintes da matéria, existentes no modelo padrão. Devemos também saber como também elas interagem, como elas integram sistemas estáveis e como elas se desintegram. Chegamos às partículas mediadoras das forças fundamentais da natureza, protagonistas da cromodinâmica quântica (QCD). No entanto, diante do universo das incertezas das partículas elementares, o conceito de força não se faz preciso, sendo mais aprazível o uso do termo interação, assim temos as interações gravitacionais, eletromagnética, forte e fraca. A interação forte atua nos hádrons, que são sistemas de quarks e glúons e mantém prótons e nêutrons juntos no núcleo atômico. A interação fraca atua sobre todas as partículas elementares, esta é a responsável pelo decaimento radiativo de partículas como nêutrons, e também por todas as reações envolvendo neutrinos.

Figura 20 - Mapa Conceitual das Interações Fundamentais

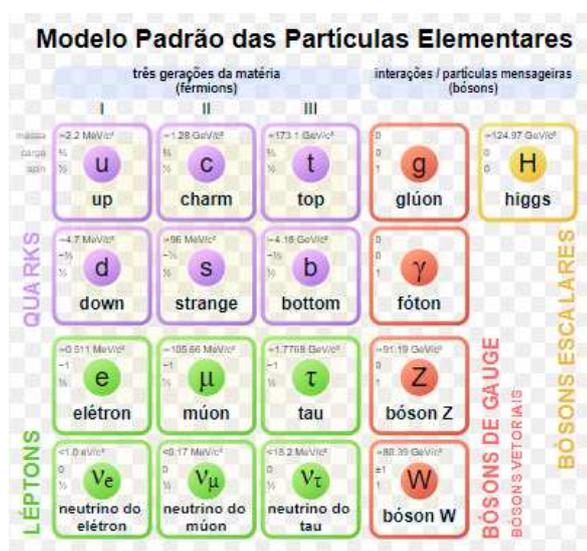


Fonte: MOREIRA, M. A. Partículas e Interações. Física na Escola, 2004.

Estas interações são viabilizadas por partículas elementares, a saber: o gráviton, a partícula hipotética que media a interação gravitacional; o fóton, presente na interação eletromagnética; os bósons W e Z, na interação fraca e os glúons, na interação forte. A massa de repouso destas partículas é inversamente proporcional ao alcance da interação por ela causada. Fótons e grávitons por não terem massa, promovem um alcance infinito da interação eletromagnética e gravitacional, respectivamente. As interações forte e fraca são mediadas por partículas massivas, portanto, de curto alcance. Ressalta ainda Moreira (2004):

Essas quatro interações são mediadas por partículas (portadoras de força) elementares – grávitons (gravitacional), fótons (eletromagnética), W e Z (fraca) e glúons (forte) – e descritas por campos de força. Os mésons mediam a interação forte residual. Quer dizer, além dos campos gravitacional e eletromagnético, que são relativamente familiares, há também o campo forte e o campo fraco. A energia armazenada nesses campos não está neles distribuída de maneira contínua: está quantizada, isto é, concentrada nos chamados quanta de energia. Assim, os fótons são os quanta do campo eletromagnético, as partículas W e Z são os quanta do campo fraco, os glúons do campo forte e os grávitons do campo gravitacional. (MOREIRA, 2004, p. 12).

Figura 21 - Modelo Padrão das Partículas Elementares



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo\\_Padr%C3%A3o](https://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo_Padr%C3%A3o)

## 6.4 TUNELAMENTO QUÂNTICO E O DECAIMENTO ALFA

Chamamos de Barreira de Potencial a região onde existe um potencial que impede classicamente, uma partícula de atravessá-lo, usando uma imaginação pictórica, um muro a ser transposto. Para atravessar esta barreira classicamente teremos que ter um incremento de energia cinética à energia potencial mínima  $U_0$  necessária para transpor a barreira, ou seja, uma energia total  $E > U_0$ . Outra alternativa deriva de visão quântica, quando partículas podem transpor esta barreira, ou um estado de energia classicamente proibido, ou escapar de regiões cercadas por barreiras potenciais, mesmo com energia cinética menor que a energia potencial das barreiras. Assim, esta partícula pode usar da pequena probabilidade do

tunelamento quântico ou efeito túnel, analogamente a uma bola atravessando um muro. Podemos identificar tais barreiras no perímetro de um núcleo atômico, e adotando esta opção, existe a probabilidade de uma partícula vencer a barreira de potencial do núcleo radioativo e ser emitida, com energia menor que a do pico de barreira, como observamos na emissão de radiação alfa.

Figura 22 - Compton, Heisenberg, Dirac e Hund em Chicago (1929)



Fonte: [https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Hund,Friedrich\\_1929\\_Chicago.jpg](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Hund,Friedrich_1929_Chicago.jpg)

Este fenômeno quântico fora observado e teorizado em 1927 por Friedrich Hund (1896-1997) e, conforme afirma Bassalo (2019), o intrigante decaimento alfa foi resolvido após o estabelecimento teórico do tunelamento quântico por George Antonovich Gamow (1904-1968), publicado no extinto periódico alemão *Zeitschrift für Physik* (Revista de Física) em 1928, quando o mesmo se encontrava concluindo seu pós-doutoramento em Göttingen, na Alemanha. Gamow aplicou a descrição da mecânica quântica ondulatória de Erwin Schrodinger (1887-1961) publicada no periódico *Annalen der Physik* dois anos antes. Em entrevista ocorrida em 25 de abril de 1968, quatro meses antes de sua morte, ao historiador da ciência norte-americano Charles Weiner (1932- 2012), Gamow revelou que em face da sua bolsa em Göttinger sido encerrada, e ele, com apenas 10 dólares disponíveis, decidiu voltar para Leningrado, e passando por Copenhague, resolveu encontrar Bohr:

Eu desejava encontrar Bohr, e como eu tinha a passagem de volta, eu mudei-a para Copenhague/Estocolmo e Finlândia. Dispunha de algo em torno de \$10, o bastante para um dia. Cheguei a Copenhague, me instalei num hotel barato e rumei para o Instituto de Bohr onde fui recebido pela secretária, Sra. Schultz [Betty Schultz (1898-1980)]... Falei a ela que só iria passar um dia e gostaria de falar com Bohr. Ela me falou que o professor era muito ocupado e que eu teria de esperar pelo menos um par de dias. Repliquei, “Eu tenho de viajar amanhã porque não tenho dinheiro nem para comer”. Ela foi até Bohr que veio falar comigo na biblioteca onde eu estava esperando e perguntou-me o que eu estava pesquisando. Falei-lhe do meu trabalho sobre o decaimento alfa, que ainda não havia sido publicado... e então Bohr disse, “Minha secretária falou-me que você não pode ficar mais do que um dia porque você não tem dinheiro. Agora se eu arranjar uma bolsa de estudos (‘fellowship’)... Você ficaria por um ano? Respondi imediatamente: “Claro, sem dúvida! (BASSALO, 2019, p. 2).

Gamow ficou na Dinamarca por três anos, local muito apropriado para físicos que almejavam se aprimorar em Física Atômica. De acordo com Harper (2000), além de ter sido grande colaborador na teoria do big bang e do universo em expansão, Gamow fez enormes contribuições para a compreensão da incipiente Física nuclear e na astronomia. Foi o primeiro pesquisador a propor que a seqüência de nucleotídeos do DNA poderia servir como código para a produção das proteínas, sendo grande colaborador na compreensão do código genético. Foi um dos participantes da 7ª Conferência de Solvay de 1933 que abordou a “Estrutura e propriedades do núcleo do átomo”

Figura 23 - 7ª Conferência de Solvay

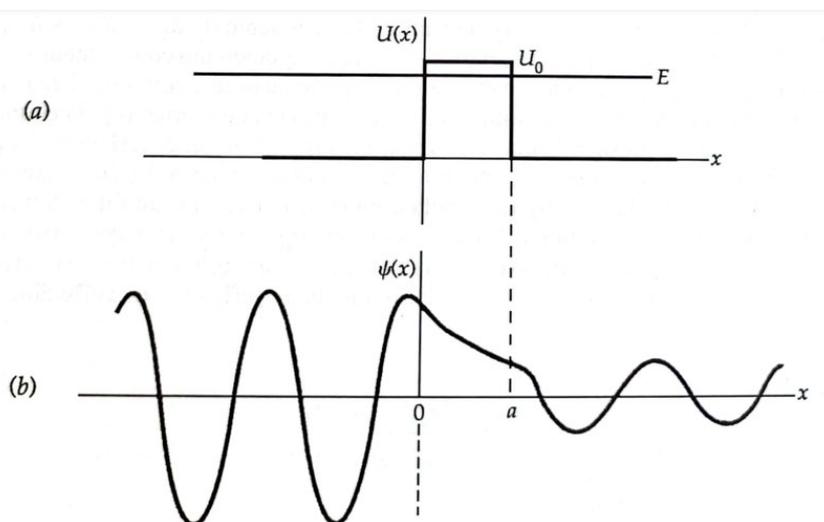


Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a9/Solvay1933Large.jpg>

Tipler (1995) relata a penetração de barreiras (tunelamento quântico) apresentada por Gamow em 1928 para explicar o decaimento alfa. Consideremos uma partícula quântica vinda da esquerda, com energia  $E$  menor que  $U_0$ , que pode ser representada por uma função de onda contínua, incidindo sobre a barreira potencial. Na visão clássica, a partícula seria refletida pela barreira com total certeza. Porém, a onda incidente na barreira não tem sua amplitude reduzida à zero de forma instantânea, mas diminui exponencialmente na região ( $0 < x < a$ ) classicamente proibida. Ao atravessar a barreira, se a amplitude da onda não tiver sido reduzida a zero, esta amplitude final volta a ser constante e constituirá a nova onda, conforme a figura 28. Embora a proibição pela teoria clássica, existe a probabilidade da partícula (onda) atravessar a barreira de potencial, e esta

probabilidade de penetração diminui exponencialmente com a espessura  $a$  e com a raiz quadrada da altura relativa da barreira ( $U_0 - E$ ).

Gráfico 11 - Penetração em barreiras



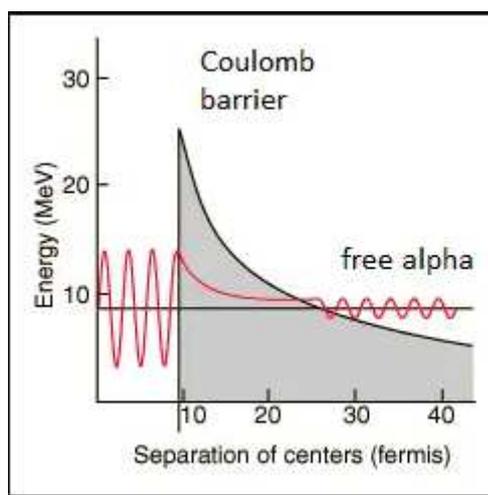
Fonte: TIPLER, P. A. **Física**: para cientistas e engenheiros, vol 4, p. 228 3ª Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1995.

A partir dos trabalhos 1924 de Louis de Broglie (1892-1987), que descreve um comportamento ondulatório para partículas, Erwin Schrödinger (1887-1961) em 1926 institui o formalismo básico da mecânica quântica, a equação de Schrödinger. Neste mesmo ano, Max Born (1882-1970) propôs um significado físico para aquela equação. Para Born a função de onda da equação de Schrödinger elevada ao quadrado define a probabilidade de se encontrar uma partícula, onde para uma maior amplitude, temos maior probabilidade. Assim, nesta análise estatística, a menor amplitude da onda após o tunelamento, mostra uma probabilidade muito menor deste tunelamento realmente acontecer. E ele só acontece por conta do comportamento ondulatório das partículas, neste universo microscópico e quântico.

A estabilidade do núcleo decorre do equilíbrio entre a força eletrostática e a nuclear forte, assim apesar da força forte ter alcance limitado, ela constituirá uma barreira potencial para qualquer emissão deste núcleo. De acordo com Connor (2020), o decaimento alfa só acontece em face de um processo de tunelamento quântico, pois a partícula alfa só será emitida após atravessar uma barreira de potencial, que chamaremos de barreira de Coulomb.

Ocorre que esta barreira, ou a altura da barreira de Coulomb é equivalente a uma energia potencial a ser vencida de aproximadamente 25 MeV e as partículas alfa emitidas no decaimento do núcleo, possuem em torno de 5 MeV. Classicamente, isto é impossível, mas para a mecânica quântica, não. Assim, a radiação de partículas alfa pode ser estatisticamente explicada pelo tunelamento quântico de Gamow.

Gráfico 12 - Barreira de Coulomb



Fonte: <https://www.radiation-dosimetry.org/pt-br/o-que-e-a-teoria-do-decaimento-alfa-tunelamento-quantico-definicao>

**Produto Educacional - Segunda parte:**

# O surgimento da Mecânica Quântica:

Recursos pedagógicos para a sala de aula

Charles Cordeiro da Silva

## 1. OBJETIVOS

O objetivo desta Seqüência Didática é apresentar para o Ensino Médio, de maneira qualitativa, um importante tópico da Física Moderna, a Mecânica Quântica. Amparando-se em uma construção de conhecimento em simbiose com a História da Ciência, seguimos uma linha do tempo com uma linguagem acessível, que mostra que as descobertas científicas não acontecem em saltos. Pelo contrário, tais descobertas avançam inexorável e continuamente, na medida do acontecimento de incrementos e evoluções anteriores.

Motivando o aluno às participações ativas, as aulas se desenvolvem depois de investigação de existências de possíveis conhecimentos prévios, para posterior construção do conhecimento e aproximação dos alunos às atividades científicas atendendo ao interesse de alguns e ofertando estímulos à ciência e à tecnologia, para todos. Ressaltemos que o aluno participativo constrói, com auxílios externos, seu conhecimento e sua autonomia. Assim, espera-se que o professor não atue como um mero expositor, e sim como um facilitador-mediador-estimulador da supracitada construção.

A Seqüência Didática consiste em 8 (oito) aulas, a saber:

- Contexto histórico – Cinco problemas solucionados pela Mecânica Quântica
- O Sistema Internacional de Unidades e as Constantes Fundamentais da Natureza
- Radiação do Corpo Negro
- Efeito Fotoelétrico
- Capacidade Térmica dos sólidos
- Radioatividade
- Espectros de Emissão e Absorção
- A Mecânica Quântica

Antes da apresentação da primeira aula, deve ser aplicado um Questionário (Quiz 0) com quarenta questões, cinco de cada um dos oito assuntos que

futuramente serão apresentados, buscando-se obter concepções prévias dos alunos, a respeito de rudimentos da teoria quântica.

Após a apresentação de cada aula, aplica-se um novo Questionário com dez questões, referentes à aula ministrada anteriormente. Ou seja, após a aula 1, temos o Quiz 1, após a aula 2, Quiz 2 e assim por diante. Ressaltamos que das dez questões, cinco faziam parte do primeiro Questionário (Quiz 0) e cinco são questionamentos novos. Assim, teremos além do Quiz 0, mais oitenta questões distribuídas no Quiz 1 ao Quiz 8. Segue abaixo um código QR que direciona o professor-leitor a todos os Questionários no formato editável.



## 2. QUESTIONÁRIO INTRODUTÓRIO

### I. Contexto Histórico da Física Quântica - Cinco problemas solucionados pela Mecânica Quântica

#### 1) O que é Física Clássica?

- a) A física que se desenvolveu até o período renascentista no final do século XVI.
- b) Todos os desenvolvimentos teóricos e experimentais em física, até a publicação do livro *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* em 1687 por Isaac Newton.
- c) Conhecimentos acumulados de mecânica, eletromagnetismo e termodinâmica desenvolvidos até a percepção da discretização energética.
- d) Conjunto de conceitos físicos que compreendem mecânica, óptica, eletromagnetismo, termodinâmica e mecânica quântica.

**2) Quais são os problemas experimentais do século XIX que não foram resolvidos pela física clássica e que só foram compreendidos com o desenvolvimento da teoria quântica no início do século XX?**

- a) Lei da Inércia, relatividade especial, radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico e gravitação.
- b) Espectro de emissão e absorção de gases, calor específico de sólidos, radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico e radioatividade
- c) Ondas eletromagnéticas, calor específico dos sólidos, radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico e coeficiente de atrito estático.
- d) Relatividade especial, radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico, gravitação e força de atrito.

**3) Por que a Alemanha no final do século XIX foi o ambiente fértil para o surgimento e desenvolvimento da mecânica quântica?**

- a) Tendo em vista a tradução para o alemão da obra Livro de Óptica escrita por Ibn al-Haytham no Século X.
- b) Unificação política e territorial com a subsequente revolução industrial alemã. Assim, grandes reservas de carvão fomentaram o desenvolvimento da metalurgia alemã e das teorias de refinamento da Termodinâmica.
- c) Acordo de colaboração científica celebrado entre a Alemanha e a Inglaterra em 1887 liderado por Michael Faraday e Gustav Kirchhoff.
- d) O protagonismo alemão liderado por Hermann Von Helmholtz no eletromagnetismo teórico e experimental pós-Maxwell.

**4) Qual das alternativas a seguir NÃO contribuiu para o desenvolvimento da mecânica quântica?**

- a) A descoberta do elétron por J. J. Thompson
- b) As observações do efeito fotoelétrico
- c) O desenvolvimento da dinâmica por Isaac Newton
- d) O estudo da radiação do corpo negro

**5) Por que a mecânica quântica é considerada uma revolução?**

- a) Porque estabelece um valor numérico para a velocidade da luz no vácuo.
- b) Porque nega implacavelmente a constante de Boltzmann.

- c) Porque foi evidenciado que as ondas eletromagnéticas podem ser descritas como fótons.
- d) Porque estabelece o caráter contínuo e indivisível da luz.

## II. O Sistema Internacional de Unidades e as Constantes Fundamentais

### **6) Qual sistema de unidades serviu de base para o desenvolvimento do SI?**

- a) Sistema Métrico Decimal
- b) Sistema Antropométrico Inglês
- c) Sistema Grego de Euclides
- d) Sistema Babilônico

### **7) Qual é a unidade do Sistema Internacional de Unidades (SI) para Intensidade Luminosa?**

- a) ampère
- b) candela
- c) tesla
- d) gaussiano

### **8) Por que é importante definir a unidade de massa utilizando constantes fundamentais?**

- a) Cumprir apenas a tradição da Royal Society, estabelecida por Sir Isaac Newton.
- b) Padronizar unidades científicas, conforme solicitado por Lord Kelvin.
- c) Garantir que as unidades sejam alteradas apenas por especialistas.
- d) Evitar a dependência de objetos físicos que, por exemplo, possam variar sua massa em função do tempo.

### **9) Quais grandezas físicas não fazem parte das grandezas fundamentais do SI?**

- a) Intensidade da corrente elétrica
- b) Massa
- c) Temperatura
- d) Velocidade

**10) O quilograma é a unidade SI para medir massa. Em que se baseia a definição recente do quilograma?**

- a) A massa de um litro de água
- b) A massa de um cilindro específico de platina-irídio
- c) A constante de Planck
- d) A massa de uma barra de ouro padrão

### III. Radiação do Corpo Negro

**11) Qual foi a principal contribuição de Max Planck para a compreensão da radiação do corpo negro e para o surgimento da mecânica quântica?**

- a) Utilizando conceitos da Termodinâmica, descobriu que uma teoria poderia explicar os dados experimentais se fosse adotado um caráter descontínuo para a energia.
- b) Descobriu, em parceria com Richard Feynman, que a constante cosmológica tem origem na mecânica quântica.
- c) Ele descobriu a dualidade onda-partícula.
- d) Descobriu a constante de estrutura fina, que motivou a descoberta do telégrafo sem fio.

**12) A idéia revolucionária de Planck publicada em 1900, foi imediatamente aceita sem resistência pela comunidade científica?**

- a) Sim, no ano seguinte, em 1901, houve consenso na Sociedade Alemã de Física.
- b) Sim, mas só em 1905, com a publicação do artigo de Einstein explicando o efeito fotoelétrico, Planck obteve pleno reconhecimento.
- c) Não, porque o próprio Planck não estava convencido, e só depois de provas subseqüentes Planck recebeu o Prêmio Nobel de Física por este feito, somente em 1918.
- d) Não, dados os trabalhos de Bohr, Millikan e Compton, as idéias de Planck nunca foram aceitas.

**13) Como as compreensões da radiação do corpo negro e do efeito fotoelétrico levaram ao desenvolvimento de uma nova teoria, a mecânica quântica?**

- a) Planck, em 1900, definiu a idéia de que a energia radiante era quantizada em unidades discretas, que chamou de quanta. Einstein explicou o efeito fotoelétrico em 1905 propondo que a luz também era quantizada em pacotes de energia, que dependem da frequência. Mais tarde, eles foram chamados de fótons.
- b) Tanto a explicação da radiação do corpo negro como o esclarecimento do efeito fotoelétrico dependem exclusivamente das equações de Maxwell.
- c) A radiação do corpo negro e o efeito fotoelétrico não influenciaram o surgimento da mecânica quântica porque suas explicações dependem exclusivamente da Física Clássica.
- d) Apesar dos esclarecimentos sobre a radiação do corpo negro e do efeito fotoelétrico que estabelecem o conceito de quântico, a mecânica quântica teve seu nascimento filosófico com Montesquieu em 1755 e experimental com Sadi Carnot em 1832.

**14) Quem primeiro introduziu o conceito de corpo negro e radiação de corpo negro?**

- a) Albert Einstein (1879 – 1955)
- b) Max Planck (1858 – 1947)
- c) Joseph Black (1728 - 1799)
- d) Gustav Kirchhoff (1824 - 1887)

**15) Por que a radiação do corpo negro é importante no campo da astrofísica e da cosmologia?**

- a) Ajuda na produção de fontes de luz artificial.
- b) Explica o comportamento dos buracos negros.
- c) É utilizado no projeto de telescópios espaciais.
- d) Fornece informações sobre a temperatura e composição das estrelas e a radiação cósmica de fundo em micro-ondas.

IV. Efeito Fotoelétrico

**16) O que é o efeito fotoelétrico?**

- a) É o efeito quando os metais submetidos a altas temperaturas adquirem características dielétricas (isolantes).

- b) É a emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando recebe radiação de ondas eletromagnéticas de frequências específicas.
- c) É a absorção de elétrons por determinados materiais quando expostos à luz de qualquer frequência.
- d) É o movimento de elétrons no interior de certos materiais quando exposto à luz de qualquer frequência.

**17) Como Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico usando a teoria quântica da luz?**

- a) Einstein propôs que o feixe de luz incidente sobre um material não é uma onda contínua que se propaga, mas pacotes de ondas discretas (fótons). Elétrons serão emitidos do material se o a "colisão" ocorre com fótons com energia específica (frequência).
- b) A emissão de elétrons de um determinado material, geralmente metais, só acontece quando exposto a alta intensidade luminosa.
- c) Einstein utiliza a equação de Stefan-Boltzmann e conclui que a emissão de elétrons de um determinado material acontecerá se ele for exposto a alguma radiação, mas apenas em temperaturas específicas.
- d) Einstein propôs uma equação que explica a emissão de elétrons dos metais, que depende da massa e da temperatura do material. Nesta equação, a constante e a constante de Boltzmann ganha destaque.

**18) Embora o efeito fotoelétrico tenha sido observado pela primeira vez na segunda metade do século e explicado por Einstein em 1905, quem estabeleceu o termo fóton em 1926?**

- a) Gilbert Lewis
- b) Edmilson Juvêncio
- c) Germán Cano
- d) Paul Dirac

**19) O que é frequência limite no contexto do efeito fotoelétrico?**

- a) A frequência na qual a luz tem a energia mais alta
- b) A frequência mínima de luz necessária para causar o efeito fotoelétrico

- c) A frequência máxima da luz que pode causar o efeito fotoelétrico
- d) A frequência na qual a luz tem a energia mais baixa

**20) Qual é o efeito da intensidade da luz na energia cinética dos elétrons emitidos no efeito fotoelétrico?**

- a) A intensidade da luz não afeta a energia cinética dos elétrons.
- b) Aumentar a intensidade da luz significa aumentar a velocidade dos elétrons.
- c) O aumento da intensidade da luz provoca uma diminuição na velocidade dos elétrons.
- d) Aumentar a intensidade da luz aumenta a frequência dos elétrons emitidos.

#### V. Capacidade Térmica dos sólidos

**21) O calor específico de uma substância pode ser expresso em:**

- a) Joules por grama por grau Celsius ( $J/g^{\circ}C$ )
- b) Watts por metro quadrado ( $W/m^2$ )
- c) Calorias por mol ( $cal/mol$ )
- d) Quilogramas por litro ( $kg/L$ )

**22) Se você aquecer igualmente duas substâncias com a mesma massa, mas se uma tiver um calor específico maior que a outra, qual delas sofrerá uma maior mudança de temperatura?**

- a) Aquela com maior calor específico
- b) Aquela com menor calor específico
- c) Ambas experimentarão a mesma variação de temperatura
- d) Depende da temperatura inicial das substâncias

**23) Quando um cubo de gelo a  $-10^{\circ}C$  é colocado em um copo com água a  $20^{\circ}C$ , qual substância ganha calor e qual perde calor?**

- a) O gelo ganha calor e a água perde calor
- b) O gelo perde calor e a água ganha calor
- c) Tanto o gelo quanto a água ganham calor
- d) Tanto o gelo quanto a água perdem calor

**24) Em 1911, por iniciativa do famoso cientista alemão Walther Nernst (1864-1941) e do apoio financeiro de Ernest Solvay (1838-1922), houve grande encontro que reuniu notáveis acadêmicos na cidade de Bruxelas. Qual foi o impacto da apresentação de Einstein neste encontro, chamado de Conferência de Solvay de 1911, para a comunidade científica?**

- a) Ele demonstrou a existência de vida extraterrestre.
- b) Ele propôs a teoria da relatividade restrita e abriu caminho para a teoria da relatividade geral que lhe conferiu o prêmio Nobel de 1921.
- c) Ele trouxe novas idéias sobre a física nuclear e provou quantitativamente que o calor específico dos sólidos é constante para qualquer variação de temperatura.
- d) Ele reforçou a validade da teoria quântica apresentando uma solução para o problema do calor específico dos sólidos.

**25) Qual é o problema do calor específico dos sólidos que foi resolvido por Einstein em 1907?**

- a) A discrepância entre o calor específico dos sólidos e dos líquidos.
- b) A relação entre a densidade e a condutividade térmica dos sólidos.
- c) A discrepância entre as variações teóricas e experimentais do calor específico dos sólidos.
- d) A relação entre o calor específico e a temperatura dos sólidos.

## VI. Radioatividade

**26) O que é radioatividade?**

- a) A propriedade de qualquer substância de brilhar no escuro.
- b) A propriedade do núcleo de um átomo de emitir partículas ou radiação.
- c) Uma propriedade do átomo de ter alta densidade.
- d) A propriedade de estabilidade de alguns gases monoatômicos.

**27) A meia-vida de um material radioativo é:**

- a) O tempo que leva para a radioatividade dobrar.
- b) O tempo que leva para a radioatividade se tornar zero.

- c) O tempo que leva para que a metade de sua massa, por radioatividade, reduza pela metade.
- d) O tempo que leva para a radioatividade aumentar pela metade.

**28) Quem primeiro percebeu a radioatividade em 1896?**

- a) Henri Becquerel (1852-1908)
- b) Wilhelm Rontgen (1845-1923)
- c) Pierre Curie (1859-1906)
- d) Marie Curie (1869-1934)

**29) Qual tipo de radiação tem a maior capacidade de penetração e é mais perigosa para os tecidos vivos?**

- a) Radiação alfa
- b) Radiação beta
- c) Radiação gama
- d) Radiação de nêutrons

**30) Como a emissão alfa na radioatividade está relacionada à mecânica quântica?**

- a) A mecânica quântica não está relacionada à emissão alfa.
- b) A mecânica quântica descreve a emissão alfa como o resultado do tunelamento quântico, onde a partícula alfa atravessa uma barreira de potencial.
- c) A mecânica quântica descreve a emissão beta como a emissão de quarks.
- d) A mecânica quântica descreve a emissão alfa como a emissão de fótons.

VII. Espectro de Emissão e Absorção

**31) Quem foi o cientista conhecido por seu trabalho sobre espectros atômicos e por criar o primeiro modelo da mecânica quântica do átomo?**

- a) Ernest Rutherford (1871 - 1937)
- b) Max Planck (1858 – 1947)
- c) Niels Bohr (1885 – 1962)
- d) Albert Einstein (1879 – 1955)

**32) O estudo dos espectros atômicos forneceu evidências valiosas para a compreensão de qual conceito científico?**

- a) Mecânica Quântica
- b) Indução eletromagnética
- c) Relatividade geral
- d) Termodinâmica

**33) Qual é a principal causa dos espectros de linha observados nos espectros atômicos?**

- a) O reflexo da luz
- b) A interferência das ondas de luz
- c) A quantização dos níveis de energia no átomo
- d) O efeito Doppler

**34) Como o modelo atômico de Bohr difere do modelo clássico de Rutherford?**

- a) O átomo de Rutherford prevê elétrons orbitando em níveis de energia quantizados em torno de um grande núcleo. Bohr estabelece o conceito de átomo que tem seu núcleo orbitado por células aceleradas por elétrons que perdem energia e colapsam neste núcleo
- b) O átomo de Rutherford prevê um pequeno núcleo orbitado por elétrons acelerados que perdem energia e colapsam em espiral com o núcleo. O átomo de Bohr possui elétrons orbitando em níveis quantizados.
- c) A única diferença entre estes dois modelos atômicos é que no átomo de Bohr; o elétron não possui órbita definida, transitando em vários raios orbitais sem alterações energéticas.
- d) Dados os dois modelos atômicos da Física clássica, praticamente não há diferenças. A única diferença evidente é que no modelo de Rutherford o núcleo é maior.

**35) Qual dos seguintes espectros atômicos está associado à transição de elétrons de níveis de energia mais altos para níveis de energia mais baixos?**

- a) Espectro de absorção
- b) Espectro de emissão
- c) Espectro contínuo

d) Espectro de linha

### VIII. A Mecânica Quântica

#### **36) O que é a dualidade onda-partícula na mecânica quântica?**

- a) Refere-se à propriedade da luz e dos elétrons de se comportarem ora como partículas, ora como ondas. Esta propriedade foi comprovada com o experimento de difração de elétrons realizado em 1926 por G.P.Thomson.
- b) Disputa sobre a natureza da luz liderada por Newton e Huygens, quando o primeiro afirmou que a luz era uma partícula e o segundo que a luz era uma onda. A experiência de Thomas Young no século 18 resolveu esta dúvida.
- c) Disputa sobre a definição da natureza da luz liderada por Newton e Huygens. O primeiro afirmava que a luz era uma onda e o segundo que a luz era uma partícula. A experiência da dupla fenda de Young no século 18 resolveu a disputa.
- d) É a propriedade física que permite que matéria de qualquer dimensão se comporte visivelmente como uma onda.

#### **37) Qual é a compreensão do determinismo e da previsibilidade na mecânica quântica?**

- a) Na mecânica clássica em escala macroscópica e na mecânica quântica em escala microscópica, podemos fazer previsões confiáveis sobre a localização e velocidade das partículas pertencentes a um sistema.
- b) Ao contrário do mundo macro e clássico, no mundo microscópico e quântico, não podemos precisar a localização e a velocidade das partículas.
- c) O Princípio da Incerteza de Heisenberg de 1927 confirma o determinismo e a previsibilidade exatamente como na mecânica clássica.
- d) As equações cinemáticas clássicas podem fazer previsões simultâneas de localização e velocidade dos elétrons.

#### **38) Qual experimento demonstrou que a luz (radiação eletromagnética) interage com partículas carregadas como elétrons, demonstrando que também**

**pode se comportar como partículas (fótons) apoiando a idéia da dualidade onda-partícula da luz da mecânica quântica?**

- a) Experiência de queda de óleo de Millikan
- b) Experimento de Dispersão Compton
- c) Experimento da Folha de Ouro de Rutherford
- d) Experimento Edmilson-Tiquinho

**39) Qual cientista é conhecido por seu trabalho sobre a dualidade onda-partícula dos elétrons, demonstrando que eles exibem comportamento tanto de onda quanto de partícula?**

- a) Max Planck (1858 – 1947)
- b) Albert Einstein (1879 – 1955)
- c) Niels Bohr (1885 – 1962)
- d) Louis de Broglie (1892 – 1987)

**40) Quais dispositivos tecnológicos ou aplicações abaixo dependem dos princípios da mecânica quântica?**

- a) célula fotovoltaica, LED, termômetro de testa, smartphone.
- b) laser, ressonância magnética, sensor de presença e telégrafo sem fio.
- c) máquina a vapor, chip, leitores ópticos, telescópios
- d) microscópios, computadores, equipamentos de raios X e aspiradores de pó.

**GABARITO**

**1C 2B 3B 4C 5C6A 7B 8D 9D 10C 11A 12C 13A 14D 15D 16B 17A 18A 19B**

**20A 21A 22B 23A 24D 25C 26B 27C 28A 29C 30B 31C 32A 33C 34B 35B 36A 37B**

**38B 39D 40A**

## Aula 1

# Contexto histórico – Cinco problemas solucionados pela Mecânica Quântica

Figura 24 - Uma abstração quântica



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzNA&ctype=CINCO+problemas-Image+by+Gerd+Altmann+from+Pixabay+physics-6780710+%281%29.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a62131f51\\_4f392b0ca9da71281082e%40ip-10-81-5-31.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=13787904&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzNA&ctype=CINCO+problemas-Image+by+Gerd+Altmann+from+Pixabay+physics-6780710+%281%29.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a62131f51_4f392b0ca9da71281082e%40ip-10-81-5-31.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=13787904&accountId=0)

**Tema:** Contexto histórico – Cinco problemas solucionados pela Mecânica Quântica

**Área:** Ciência da Natureza e suas Tecnologias

**Disciplina:** Física

**Ano/Série:** 3º ano do Ensino Médio

**Duração da aula:** 2 tempos de 40 minutos cada

**Objetivos Gerais:**

- Despertar o aluno à investigação científica
- Apresentar qualitativamente conteúdos da Física sob a óptica da História da Ciência
- Mostrar o protagonismo da Ciência e Tecnologia na atualidade.

**Objetivos Específicos:**

- Apresentar o momento histórico da física no século XIX e sua aparente completude
- Mostrar a descoberta do quantum
- Descrever os cinco problemas não resolvidos pela Teoria Clássica
- Apresentar as cinco soluções advindas da Teoria Quântica

**Recursos utilizados:**

- Computador
- Projetor
- Slides utilizando o software PowerPoint

Esta aula consiste em 30 slides e abaixo temos alguns como exemplos:

**Os cinco problemas não resolvidos pela Teoria Clássica**

- \*Anomalia no Calor específico de sólidos (1819)
- \*Radiação do Corpo Negro (1860)
- \*Espectro de emissão e absorção de gases (1885)
- \*Efeito fotoelétrico (1887)
- \*Radioatividade (1889)

Prof. Charles Cordeiro

**Final do século XIX**

Mecânica Newtoniana, Termodinâmica, Eletromagnetismo. Chegal!!!

Não existe nada mais a ser descoberto!!!

Boa!

Como explicar?

- \*Conflito da Radiação CN(1860)
- \*Espectro de emissão e absorção de gases (1885)
- \*Efeito fotoelétrico (1887)
- \*Radioatividade (1889)
- \*Calor esp. de sólidos (1872)

Agora vai!

Vou falar com Planck!

### OS CINCO PROBLEMAS NÃO SOLUCIONADOS PELA TEORIA CLÁSSICA

Problema	Solução
1872 – Calor específico de sólidos – Heinrich Weber (1842-1913)	1900 – Radiação do corpo negro Max Planck (1858-1947)
1885 – Linhas espectrais de Emissão e Absorção - Johann Balmer (1825-1898)	1905 - Efeito fotoelétrico Albert Einstein (1879-1955)
1887 – Efeito fotoelétrico Heinrich Hertz (1857-1894)	1907 – Calor específico de sólidos Albert Einstein (1879-1955)
1889 – Radioatividade Ernest Rutherford (1871-1937)	1913 – Linhas espectrais Niels Bohr (1885-1962)
1900 – Radiação do corpo negro Heinrich Rubens (1865-1922)	1928 – Radioatividade George Gamow (1904-1968)

Teoria Clássica (Física Clássica)

1900

Princípios e Leis físicas desenvolvidos antes do início do século XX. Descreve o comportamento dos objetos em escalas **macroscópicas**, ou seja, em condições que não envolvem velocidades próximas à **velocidade da luz**. Não descreve o **átomos e partículas subatômicas**.

As partículas possuem massa e posição bem definidas

A energia e as radiações são contínuas

Teoria Quântica (Física Quântica)

Descreve a física das pequenas escalas, com comportamento **probabilístico**.  
Radiação e **quantizada**

→

Mecânica Clássica  
Termodinâmica Clássica  
Óptica Clássica  
Eletromagnetismo Clássico

Teoria Quântica + Relatividade (Especial e Geral) → Física Moderna

### 1º. Comportamento do calor específico de sólidos à altas temperaturas

**Lei empírica de Dulong-Petit (1819)**

Para sólidos, o produto do calor específico a volume constante, pela massa atômica ou m. molecular é **3R**. Em altas temperaturas, o calor **ssp.** tem o valor limite de **3R (25J/Kmol)**.

**SOLUÇÃO**

Descoberta da **3R** de Planck da quantização da energia  $E=h\nu$ .  
Artigo de Einstein de 1907 - A teoria da radiação de Planck e a teoria do calor específico (Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme)

Albert Einstein (1879-1955)

### 2º - Conflito da teoria com dados experimentais da Rad. do corpo negro

**Rayleigh-Jeans**:  $\mathcal{U}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$

**Wien**:  $\mathcal{U}(\nu, T) = C \frac{kT\nu^3}{c^3} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$

**Planck**:  $\mathcal{U}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$

**SOLUÇÃO**

Descoberta da **3R** de Planck da quantização da energia -  $E=h\nu$ .  
Artigo de Planck de 14 dez 1900 - Sobre a Teoria da Lei de Distribuição de Energia do Espectro Normal. (Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum)

Max Planck (1858-1947)

**19 de outubro 1900**

Analisando as fórmulas de Paschen-Wien e Lord Rayleigh, fez uma interpolação com as duas, obtendo:

$$I(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)}$$

Utilizou termodinâmica pré-Boltzmann e não encontrou nenhum erro, segundo a Física Clássica, na eq de Rayleigh. Adota então a interpretação probabilística da Entropia de Boltzmann de 1877 com adoção de que os osciladores moleculares das paredes do CN vibravam com frequências discretas.

O acesso à totalidade da aula com todos os slides encontra-se no link abaixo:

[1ª Apresent- Contexto histórico - 5 problemas solucionados pela MQ](#)

Está disponível no link abaixo um Tutorial, abordando na percepção do autor, uma forma de apresentação da aula, com as ideias e a teoria presentes nos slides quando das suas concepções.

<https://drive.google.com/file/d/1n9TnCFJfU6lhxBbTU9vGa4wVnpiNCQ3g/view?usp=sharin>

Visando acrescentar alternativas de acesso, segue abaixo o código QR que direciona o leitor para todas as oito aulas em PowerPoint e aos respectivos vídeos tutoriais.



Questionário apresentado após a aula:

#### Quiz 1- Contexto Histórico da Física Quântica

##### **1) O que é Física Clássica?**

- a) A física que se desenvolveu até o período renascentista no final do século XVI.
- b) Todos os desenvolvimentos teóricos e experimentais em física, até a publicação do livro *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* em 1687 por Isaac Newton.
- c) Conhecimentos acumulados de mecânica, eletromagnetismo e termodinâmica desenvolvidos até a percepção da discretização energética.
- d) Conjunto de conceitos físicos que compreendem mecânica, óptica, eletromagnetismo, termodinâmica e mecânica quântica.

##### **2) Quais são os problemas experimentais do século XIX que não foram resolvidos pela física clássica e que só foram compreendidos com o desenvolvimento da teoria quântica no início do século XX?**

- a) Lei da Inércia, relatividade especial, radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico e gravitação.
- b) Espectro de emissão e absorção de gases, calor específico de sólidos, radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico e radioatividade

- c) Ondas eletromagnéticas, calor específico dos sólidos, radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico e coeficiente de atrito estático.
- d) Relatividade especial, radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico, gravitação e força de atrito.

**3) Por que a Alemanha no final do século XIX foi o ambiente fértil para o surgimento e desenvolvimento da mecânica quântica?**

- a) Tendo em vista a tradução para o alemão da obra Livro de Óptica escrita por Ibn al-Haytham no Século X.
- b) Unificação política e territorial com a subsequente revolução industrial alemã. Assim, grandes reservas de carvão fomentaram o desenvolvimento da metalurgia alemã e das teorias de refinamento da Termodinâmica.
- c) Acordo de colaboração científica celebrado entre a Alemanha e a Inglaterra em 1887 liderado por Michael Faraday e Gustav Kirchhoff.
- d) O protagonismo alemão liderado por Hermann Von Helmholtz no eletromagnetismo teórico e experimental pós-Maxwell.

**4) Qual das alternativas a seguir NÃO contribuiu para o desenvolvimento da mecânica quântica?**

- a) A descoberta do elétron por J. J. Thompson
- b) As observações do efeito fotoelétrico
- c) O desenvolvimento da dinâmica por Isaac Newton
- d) O estudo da radiação do corpo negro

**5) Por que a mecânica quântica é considerada uma revolução?**

- a) Porque estabelece um valor numérico para a velocidade da luz no vácuo.
- b) Porque nega implacavelmente a constante de Boltzmann.
- c) Porque foi evidenciado que as ondas eletromagnéticas podem ser descritas como fótons.
- d) Porque estabelece o caráter contínuo e indivisível da luz.

**6) Quem é o cientista considerado o pai da mecânica quântica?**

- a) Isaac Newton (1642 – 1727)
- b) Albert Einstein (1879 – 1955)

- c) Ludwig Boltzmann (1844 – 1906)
- d) Max Planck (1858 – 1947)

**7) A quem é atribuída a descoberta dos raios catódicos?**

- a) Julius Plücker (1801 – 1868)
- b) J.J. Thompson (1856 – 1940)
- c) Wilhelm Roentgen (1845 -1923)
- d) Robert Millikan (1868 – 1953)

**8) Qual é a carga de um elétron?**

- a) Positivo
- b) Neutro
- c) Negativo
- d) Variável

**9) Qual partícula subatômica foi descoberta por J.J. Thomson usando raios catódicos?**

- a) Próton
- b) Nêutron
- c) Elétron
- d) Núcleo

**10) O que Wilhelm Roentgen descobriu em 1895?**

- a) Elétrons
- b) Raios X
- c) Raios catódicos
- d) Raios gama

**GABARITO**

**1C 2B 3B 4C 5C 6D 7A 8C 9C 10B**

## Aula 2

# O Sistema Internacional de Unidades e as Constantes Fundamentais da Natureza

Figura 25 - Relógio Astronômico de Praga



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzMw&ctype=1-metrologia-pexels-andrea-piacquadio-820735+%282%29.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a50d2e771\\_581d2adbb4f25110934c6%40ip-10-81-5-121.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=2926062&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzMw&ctype=1-metrologia-pexels-andrea-piacquadio-820735+%282%29.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a50d2e771_581d2adbb4f25110934c6%40ip-10-81-5-121.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=2926062&accountId=0)

**Tema:** O Sistema Internacional de Unidades e as Constantes Fundamentais da Natureza

**Área:** Ciência da Natureza e suas Tecnologias

**Disciplina:** Física

**Ano/Série:** 3º ano do Ensino Médio

**Duração da aula:** 1 tempo de 40 minutos

**Objetivos Gerais:**

- Despertar o aluno à investigação científica
- Apresentar qualitativamente conteúdos da Física sob a óptica da História da Ciência
- Mostrar o protagonismo da Ciência e Tecnologia na atualidade.

**Objetivos Específicos:**

- Apresentar o desenvolvimento da metrologia em um contexto histórico
- Descrever a Convenção do Metro de 1875
- Apresentar o Sistema Internacional de Unidades
- Definir o que é uma grandeza física fundamental
- Definir Constante Fundamental
- Apresentar a importância da teoria quântica no SI

**Recursos utilizados:**

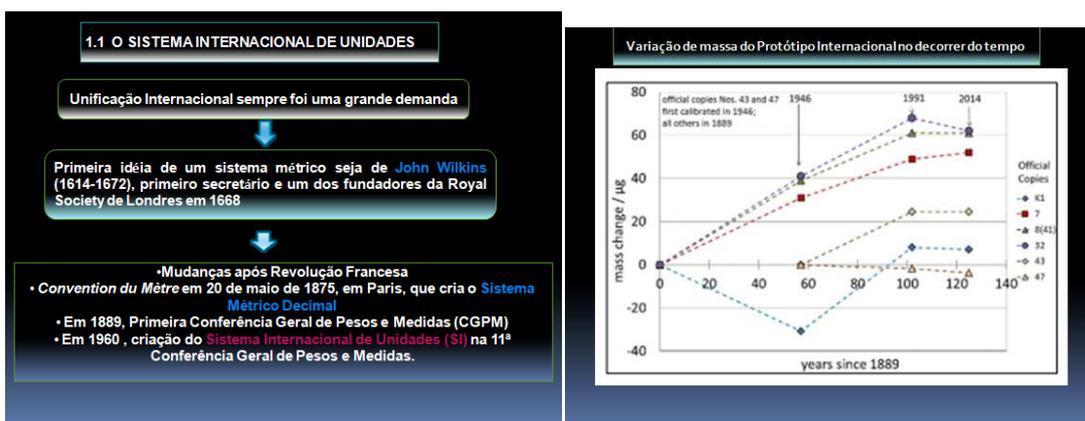
- Computador
- Projetor
- Slides utilizando o software Power Point

Esta aula consiste em 22 slides e abaixo temos alguns como exemplos:

**Constantes Fundamentais da Natureza**

<b>h</b>	hifigrose (variável auxiliar) $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$	Concebida por Planck em 1900 e corroborada por Einstein em 1905, é a maior fundamental das constantes fundamentais.
<b>c</b>	celeritas (rapidez) $c = 299.792.458 \text{ m/s}$	Definida por Maxwell em 1864 e confirmada por Michelson em 1926.
<b>G</b>	Cte Gravitação Univers $G = 6,674184 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$	Instituída por Newton em 1687 e medida em 1798 por Cavendish.
<b>Kb</b>	Cte de Boltzmann $Kb = 1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$	Estabelecida por Planck em 1900 e batizada por Bohr em 1913.

Segundo George Matias do IFT/UNESP, as Constantes Fundamentais da Natureza buscam "escrever a física padrão da forma mais econômica possível, eliminando o desnecessário para enxergar mais longe".



O acesso à totalidade da aula com todos os slides encontra-se no link abaixo:

[2ª Apresent- Sist Int, CnstFundamentais](#)

Está disponível no link abaixo um Tutorial, abordando na percepção do autor, uma forma de apresentação da aula, com as ideias e a teoria presentes nos slides quando das suas concepções.

<https://drive.google.com/file/d/1jvCy8IgJIXR4SY2QdyOxSTNr9u1XymIp/view?usp=sharing>

Questionário apresentado após a aula:

### Quiz 2 - O Sistema Internacional de Unidades e as Constantes Fundamentais

**1) Qual sistema de unidades serviu de base para o desenvolvimento do SI?**

- Sistema Métrico Decimal
- Sistema Antropométrico Inglês
- Sistema Grego de Euclides
- Sistema Babilônico

**2) Qual é a unidade do Sistema Internacional de Unidades (SI) para Intensidade Luminosa?**

- ampère
- candela
- tesla
- gaussiano

**3) Por que é importante definir a unidade de massa utilizando constantes fundamentais?**

- a) Cumprir apenas a tradição da Royal Society, estabelecida por Sir Isaac Newton.
- b) Padronizar unidades científicas, conforme solicitado por Lord Kelvin.
- c) Garantir que as unidades sejam alteradas apenas por especialistas.
- d) Evitar a dependência de objetos físicos que, por exemplo, possam variar sua massa em função do tempo.

**4) Quais grandezas físicas não fazem parte das grandezas fundamentais do SI?**

- a) Intensidade da corrente elétrica
- b) Massa
- c) Temperatura
- d) Velocidade

**5) O quilograma é a unidade SI para medir massa. Em que se baseia a definição recente do quilograma?**

- a) A massa de um litro de água
- b) A massa de um cilindro específico de platina-irídio
- c) A constante de Planck
- d) A massa de uma barra de ouro padrão

**6) O metro é uma unidade SI fundamental usada para medir comprimento. Em que se baseia a definição recente do medidor?**

- a) Um cilindro de platina-irídio
- b) O comprimento de onda de uma transição atômica específica
- c) A circunferência da Terra
- d) O comprimento do pé de um rei

**7) Qual constante fundamental da natureza é usada para definir o quilograma (massa) em unidades SI?**

- a) Constante de Planck
- b) Velocidade da luz no vácuo
- c) Constante de Boltzmann

d) Número de Avogadro

**8) O Kelvin é a unidade SI para temperatura. Em que se baseia a definição recente de Kelvin?**

- a) A temperatura do zero absoluto
- b) O ponto de ebulição da água
- c) A velocidade da luz no vácuo
- d) A constante de Boltzmann

**9) A candela é a unidade SI para medir a intensidade luminosa. Em que se baseia a definição recente de candela?**

- a) A luz emitida por uma vela específica
- b) O brilho de uma lâmpada
- c) A constante de Planck e velocidade da luz no vácuo
- d) Constante solar

**10) Qual é o nome da constante não usada para definir as novas unidades do SI?**

- a) A constante de Boltzmann
- b) A constante de Planck
- c) A constante de Newton
- d) A constante de velocidade de luz

**GABARITO**

**1A 2B 3D 4D 5C 6B 7A 8D 9C 10C**

### Aula 3

## Radiação do Corpo Negro

Figura 26 - A Radiação do Corpo Negro



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzMw&ctype=2-corponegro-pexels-mikhail-nilov-6530546+%282%29.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a50d3057f\\_581d2adbb4f2511093556%40ip-10-81-5-121.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=3416436&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzMw&ctype=2-corponegro-pexels-mikhail-nilov-6530546+%282%29.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a50d3057f_581d2adbb4f2511093556%40ip-10-81-5-121.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=3416436&accountId=0)

**Tema:** *Radiação do Corpo Negro*

**Área:** Ciência da Natureza e suas Tecnologias

**Disciplina:** Física

**Ano/Série:** 3º ano do Ensino Médio

**Duração da aula:** 2 tempos de 40 minutos cada

**Objetivos Gerais:**

- Despertar o aluno à investigação científica
- Apresentar qualitativamente conteúdos da Física sob a óptica da História da Ciência
- Mostrar o protagonismo da Ciência e Tecnologia na atualidade.

**Objetivos Específicos:**

- Apresentar o momento histórico da física no século XIX e sua aparente completude
- Citar as teorias que antecederam Planck para a explicação da radiação do corpo negro
- Mostrar a descoberta da energia quantizada e o início da Teoria Quântica
- Descrever os desdobramentos do quantum

**Recursos utilizados:**

- Computador
- Projetor
- Slides utilizando o software Power Point

Esta aula consiste em 67 slides e abaixo temos alguns como exemplos:

**Radiação de Corpo Negro**  
O nascimento da Mecânica Quântica.

**Rayleigh-Jeans**  
$$I(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2 k_B T}{c^3}$$

**Quantização**

**Wilhelm Wien**   **Rayleigh-Jeans**   **Max Planck**

$E = nh\nu$   
 $n = 1, 2, 3 \dots$   
 $h = \text{hilfsgrösse (variável auxiliar)}$   
Para Planck  $h$  era um artifício matemático

**14 de dezembro de 1900**  
Planck apresenta à Sociedade de Física de Berlim, os valores de  $c_1$ ,  $c_2$  e  $h$ .  $k = \text{cte}$  de Boltzmann

$$I(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)}$$
  
 $c_1 = hc^2$     $c_2 = \frac{hc}{k}$   
 $h = 6,55 \times 10^{-27} \text{ erg}\cdot\text{s}$   
**Hoje:**  
 $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

O acesso à totalidade da aula com todos os slides encontra-se no link abaixo:

### [3ª Apresent- Radiação de Corpo Negro](#)

Está disponível no link abaixo um Tutorial, abordando na percepção do autor, uma forma de apresentação da aula, com as ideias e a teoria presentes nos slides quando das suas concepções.

<https://drive.google.com/file/d/13psWr5u4IOQrsyqeUNp3dZQ30IZlzxqu/view?usp=sharing>

Questionário apresentado após a aula:

#### Quiz 3 – Radiação do corpo negro

**1) Qual foi a principal contribuição de Max Planck para a compreensão da radiação do corpo negro e para o surgimento da mecânica quântica?**

- Utilizando conceitos da Termodinâmica, descobriu que uma teoria poderia explicar os dados experimentais se fosse adotado um caráter descontínuo para a energia.
- Descobriu, em parceria com Richard Feynman, que a constante cosmológica tem origem na mecânica quântica.
- Ele descobriu a dualidade onda-partícula.

d) Descobriu a constante de estrutura fina, que motivou a descoberta do telégrafo sem fio.

**2) A idéia revolucionária de Planck, publicada em 1900, foi imediatamente aceita, sem resistência, pela comunidade científica?**

a) Sim, no ano seguinte, em 1901, houve consenso na Sociedade Alemã de Física.

b) Sim, mas só em 1905, com a publicação do artigo de Einstein explicando o efeito fotoelétrico, Planck obteve pleno reconhecimento.

c) Não, porque o próprio Planck não estava convencido, e só depois de provas subseqüentes Planck recebeu o Prêmio Nobel de Física por este feito, somente em 1918.

d) Não, dados os trabalhos de Bohr, Millikan e Compton, as idéias de Planck nunca foram aceitas.

**3) Como as compreensões da radiação do corpo negro e do efeito fotoelétrico levaram ao desenvolvimento de uma nova teoria, a mecânica quântica?**

a) Planck, em 1900, definiu a idéia de que a energia radiante era quantizada em unidades discretas, que chamou de quanta. Einstein explicou o efeito fotoelétrico em 1905 propondo que a luz também era quantizada em pacotes de energia, que dependem da freqüência. Mais tarde, eles foram chamados de fótons.

b) Tanto a explicação da radiação do corpo negro como o esclarecimento do efeito fotoelétrico dependem exclusivamente das equações de Maxwell.

c) A radiação do corpo negro e o efeito fotoelétrico não influenciaram o surgimento da mecânica quântica porque suas explicações dependem exclusivamente da Física Clássica.

d) Apesar dos esclarecimentos sobre a radiação do corpo negro e do efeito fotoelétrico que estabelecem o conceito de quântico, a mecânica quântica teve seu nascimento filosófico com Montesquieu em 1755 e experimental com Sadi Carnot em 1832.

**4) Quem primeiro introduziu o conceito de corpo negro e radiação de corpo negro?**

a) Albert Einstein (1879 – 1955)

- b) Max Planck (1858 – 1947)
- c) Joseph Black (1728 - 1799)
- d) Gustav Kirchhoff (1824 - 1887)

**5) Por que a radiação do corpo negro é importante no campo da astrofísica e da cosmologia?**

- a) Ajuda na produção de fontes de luz artificial.
- b) Explica o comportamento dos buracos negros.
- c) É utilizado no projeto de telescópios espaciais.
- d) Fornece informações sobre a temperatura e composição das estrelas e a radiação cósmica de fundo em micro-ondas.

**6) O que é um corpo negro no contexto da radiação do corpo negro?**

- a) Um corpo completamente preto
- b) Um objeto teórico que absorve toda a radiação incidente e emite radiação
- c) Um corpo extremamente quente
- d) Um corpo que não emite radiação

**7) Qual é o nome do fenômeno que ocorre quando objetos quentes emitem radiação?**

- a) Efeito Fotoelétrico
- b) Capacidade térmica específica
- c) Radiação de Corpo Negro
- d) Radioatividade

**8) Qual é a relação entre a temperatura de um corpo negro e o comprimento de onda máximo da sua radiação, conforme descrito pela Lei do Deslocamento de Wien?**

- a) O comprimento de onda do pico é diretamente proporcional à temperatura.
- b) O comprimento de onda do pico é inversamente proporcional à temperatura.
- c) O comprimento de onda do pico não está relacionado com a temperatura.
- d) O comprimento de onda do pico é igual à temperatura.

**9) De acordo com a lei de Planck, como a energia irradiada por um corpo negro é distribuída em diferentes comprimentos de onda?**

- a) Teremos um pico de intensidade de energia em determinado comprimento de onda, que dependerá da temperatura do corpo negro.
- b) Está distribuído uniformemente em todos os comprimentos de onda.
- c) Está concentrado em comprimentos de onda mais curtos.
- d) Está concentrado em comprimentos de onda mais longos.

**10) De acordo com a equação de Planck,  $E = hf$ , o que “E” representa?**

- a) Energia do elétron
- b) Energia da luz
- c) Velocidade da luz
- d) Constante de Planck

**GABARITO**

**1A 2C 3A 4D 5D 6B 7C 8B 9A10B**

## Aula 4

# Efeito Fotoelétrico

Figura 27 - O Efeito Fotoelétrico



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzNA&ctype=3-fotoeletrico-pexels-tom-fisk-9893729+%283%29.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a6212b113\\_4f392b0ca9da7128106db%40ip-10-81-5-31.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=6953896&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzNA&ctype=3-fotoeletrico-pexels-tom-fisk-9893729+%283%29.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a6212b113_4f392b0ca9da7128106db%40ip-10-81-5-31.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=6953896&accountId=0)

**Tema:** Efeito Fotoelétrico

**Área:** Ciência da Natureza e suas Tecnologias

**Disciplina:** Física

**Ano/Série:** 3º ano do Ensino Médio

**Duração da aula:** 2 tempos de 40 minutos cada

**Objetivos Gerais:**

- Despertar o aluno à investigação científica
- Apresentar qualitativamente conteúdos da Física sob a óptica da História da Ciência
- Mostrar o protagonismo da Ciência e Tecnologia na atualidade.

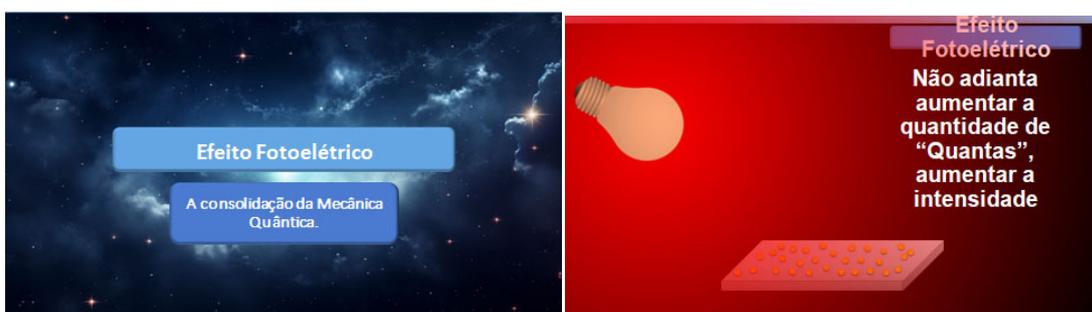
**Objetivos Específicos:**

- Visualizar a descoberta do efeito fotoelétrico
- Compreender a teoria incompleta do Efeito fotoelétrico de Philipp Lenard
- Compreender a solução de Albert Einstein para o Efeito fotoelétrico
- Compreender a consolidação do quantum com o Efeito fotoelétrico
- Citar as aplicações do Efeito fotoelétrico

**Recursos utilizados:**

- Computador
- Projetor
- Slides utilizando o software Power Point

Esta aula consiste em 54 slides e abaixo temos alguns como exemplos:





O acesso à totalidade da aula com todos os slides encontra-se no link abaixo:

#### [4ª Apresent Efeito Fotoelétrico](#)

Está disponível no link abaixo um Tutorial, abordando na percepção do autor, uma forma de apresentação da aula, com as ideias e a teoria presentes nos slides quando das suas concepções.

<https://drive.google.com/file/d/1UDnDBgT5h71fkeB8TNXKljYpjL6OFUZT/view?usp=sharing>

Questionário apresentado após a aula:

#### Quiz 4 – Efeito fotoelétrico

##### **1) O que é o efeito fotoelétrico?**

- É o efeito quando os metais submetidos a altas temperaturas adquirem características dielétricas (isolantes).
- É a emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando recebe radiação de ondas eletromagnéticas de frequências específicas.
- É a absorção de elétrons por determinados materiais quando expostos à luz de qualquer frequência.
- É o movimento de elétrons no interior de certos materiais quando exposto à luz de qualquer frequência.

##### **2) Como Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico usando a teoria quântica da luz?**

- Einstein propôs que o feixe de luz incidente sobre um material não é uma onda contínua que se propaga, mas pacotes de ondas discretas (fótons). Elétrons serão

emitidos do material se o a "colisão" ocorre com fótons com energia específica (frequência).

b) A emissão de elétrons de um determinado material, geralmente metais, só acontece quando exposto a alta intensidade luminosa.

c) Einstein utiliza a equação de Stefan-Boltzmann e conclui que a emissão de elétrons de um determinado material acontecerá se ele for exposto a alguma radiação, mas apenas em temperaturas específicas.

d) Einstein propôs uma equação que explica a emissão de elétrons dos metais, que depende da massa e da temperatura do material. Nesta equação, a constante e a constante de Boltzmann ganha destaque.

**3) Embora o efeito fotoelétrico tenha sido observado pela primeira vez na segunda metade do século e explicado por Einstein em 1905, quem estabeleceu o termo fóton em 1926?**

a) Gilbert Lewis

b) Edmilson Juvêncio

c) Germán Cano

d) Paul Dirac

**4) O que é frequência limite no contexto do efeito fotoelétrico?**

a) A frequência na qual a luz tem a energia mais alta

b) A frequência mínima de luz necessária para causar o efeito fotoelétrico

c) A frequência máxima da luz que pode causar o efeito fotoelétrico

d) A frequência na qual a luz tem a energia mais baixa

**5) Qual é o efeito da intensidade da luz na energia cinética dos elétrons emitidos no efeito fotoelétrico?**

a) A intensidade da luz não afeta a energia cinética dos elétrons.

b) Aumentar a intensidade da luz significa aumentar a velocidade dos elétrons.

c) O aumento da intensidade da luz provoca uma diminuição na velocidade dos elétrons.

d) Aumentar a intensidade da luz aumenta a frequência dos elétrons emitidos.

**6) Qual a constante fundamental relacionada ao efeito fotoelétrico?**

- a) Constante de Avogadro
- b) Constante de Planck
- c) Constante de Gravitação Universal
- d) Constante de Coulomb

**7) Quem foi o cientista que ganhou o Prêmio Nobel de Física em 1921 por suas contribuições ao estudo do efeito fotoelétrico?**

- a) Albert Einstein (1879 – 1955)
- b) Max Planck (1858 -1947)
- c) Thomas Edison (1848 – 1931)
- d) Henrich Rudolf Hertz (1857 – 1894)

**8) O que é necessário para que ocorra o efeito fotoelétrico?**

- a) Luz de alta intensidade.
- b) Luz com baixa intensidade.
- c) Luz com frequência acima de um valor limite.
- d) Qualquer luz visível.

**9) Que tipo de partículas são emitidas durante o efeito fotoelétrico?**

- a) Elétrons
- b) Prótons
- c) Nêutrons
- d) Fótons

**10) Qual propriedade da luz determina se o efeito fotoelétrico ocorre ou não?**

- a) Comprimento de onda
- b) Frequência
- c) Amplitude
- d) Velocidade

**GABARITO**

**1B 2A 3A 4B 5A 6B 7A 8C 9A 10B**

## Aula 5

# Capacidade Térmica dos sólidos

Figura 28 - Capacidade Térmica dos sólidos



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzNA&ctype=4-calorespecifico-pexels-mitchell-henderson-2004385+%283%29.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a6212c442\\_4f392b0ca9da71281078a%40ip-10-81-5-31.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=1386610&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzNA&ctype=4-calorespecifico-pexels-mitchell-henderson-2004385+%283%29.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a6212c442_4f392b0ca9da71281078a%40ip-10-81-5-31.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=1386610&accountId=0)

**Tema:** Capacidade Térmica dos sólidos

**Área:** Ciência da Natureza e suas Tecnologias

**Disciplina:** Física

**Ano/Série:** 3º ano do Ensino Médio

**Duração da aula:** 2 tempos de 40 minutos cada

**Objetivos Gerais:**

- Despertar o aluno à investigação científica
- Apresentar qualitativamente conteúdos da Física sob a ótica da História da Ciência
- Mostrar o protagonismo da Ciência e Tecnologia na atualidade.

**Objetivos Específicos:**

- Apresentar os conceitos de calor específico e capacidade térmica
- Descrever o comportamento anômalo da capacidade térmica dos sólidos em temperaturas extremas
- Apresentar a solução quantizada de Albert Einstein para a capacidade térmica de sólidos
- Apresentar o protagonismo de Walther Nernst na realização da primeira Conferência de Solvay de 1911 e a apresentação de Einstein para a comunidade científica

**Recursos utilizados:**

- Computador
- Projetor
- Slides utilizando o software Power Point
- 

Esta aula consiste em 32 slides e abaixo temos alguns como exemplos:

**Capacidade Térmica**

A consolidação da Mecânica Quântica.

**Modelo: Dulong-Petit**

Capacidade Térmica em função da Temperatura

Lei Dulong-Petit

Altas temperaturas  $\rightarrow T (K)$

A lei de Dulong Petit afirma que a capacidade térmica molar de um elemento sólido cristalino é aproximadamente constante e igual a  $3R \approx 25 \text{ J/mol}^\circ\text{K}$

**Modelo: Einstein**

**Modelo Teórico**

- Osciladores Independentes
- Quantização da Energia
- Mesma Frequência para todos

$$C_V = 3Nk_B \left( \frac{\epsilon}{k_B T} \right)^2 \frac{e^{\frac{\epsilon}{k_B T}}}{\left( e^{\frac{\epsilon}{k_B T}} - 1 \right)^2}$$

**Modelo: Debye**

**Modelo de Debye explica com precisão a variação da Capacidade térmica.**

**Modelo pautado em princípios da Mecânica Quântica.**

O acesso à totalidade da aula com todos os slides encontra-se no link abaixo:

### [5ª Apresent - Capacidade Térmica](#)

Está disponível no link abaixo um Tutorial, abordando na percepção do autor, uma forma de apresentação da aula, com as ideias e a teoria presentes nos slides quando das suas concepções.

<https://drive.google.com/file/d/1Xg5YqiJhCXmXPjYHKewii6PYmqoBOt64/view?usp=sharing>

Questionário apresentado após a aula:

#### Quiz 5 – Calor específico

**1) O calor específico de uma substância pode ser expresso em:**

- Joules por grama por grau Celsius (J/g°C)
- Watts por metro quadrado (W/m<sup>2</sup>)
- Calorias por mol (cal/mol)
- Quilogramas por litro (kg/L)

**2) Se você aquecer igualmente duas substâncias com a mesma massa, mas uma tiver um calor específico maior que a outra, qual delas sofrerá uma maior mudança de temperatura?**

- Aquela com maior calor específico
- Aquela com menor calor específico
- Ambas experimentarão a mesma variação de temperatura
- Depende da temperatura inicial das substâncias

**3) Quando um cubo de gelo a  $-10^{\circ}\text{C}$  é colocado em um copo de água a  $20^{\circ}\text{C}$ , qual substância ganha calor e qual perde calor?**

- a) O gelo ganha calor e a água perde calor
- b) O gelo perde calor e a água ganha calor
- c) Tanto o gelo quanto a água ganham calor
- d) Tanto o gelo quanto a água perdem calor

**4) Em 1911, por iniciativa do famoso cientista alemão Walther Nernst (1864-1941) e do apoio financeiro de Ernest Solvay (1838-1922), houve grande encontro que reuniu notáveis acadêmicos na cidade de Bruxelas. Qual foi o impacto da apresentação de Einstein neste encontro, chamado de Conferência de Solvay de 1911, para a comunidade científica?**

- a) Ele demonstrou a existência de vida extraterrestre.
- b) Ele propôs a teoria da relatividade restrita e abriu caminho para a teoria da relatividade geral que lhe conferiu o prêmio Nobel de 1921.
- c) Ele trouxe novas idéias sobre a física nuclear e provou quantitativamente que o calor específico dos sólidos é constante para qualquer variação de temperatura.
- d) Ele reforçou a validade da teoria quântica apresentando uma solução para o problema do calor específico dos sólidos.

**5) Qual é o problema do calor específico dos sólidos que foi resolvido por Einstein em 1907?**

- a) A discrepância entre o calor específico dos sólidos e dos líquidos.
- b) A relação entre a densidade e a condutividade térmica dos sólidos.
- c) A discrepância entre as variações teóricas e experimentais do calor específico dos sólidos.
- d) A relação entre o calor específico e a temperatura dos sólidos.

**6) Qual teoria foi fundamental para a compreensão do calor específico de sólidos, levando à solução proposta por Albert Einstein?**

- a) Teoria da Relatividade Especial
- b) Mecânica Quântica
- c) Teoria da Gravitação de Newton
- d) Teoria da Termodinâmica

**7) Qual material, quando aquecido, teria o aumento de temperatura mais lento devido à sua alta capacidade de calor específico?**

- a) Cobre
- b) Madeira
- c) Mercúrio
- d) Etanol

**8) Qual afirmação é verdadeira sobre a relação entre a capacidade térmica específica dos sólidos e mudança de temperatura?**

- a) O valor da capacidade térmica específica diminui à medida que a temperatura aumenta.
- b) O valor da capacidade térmica específica é inversamente proporcional à mudança de temperatura.
- c) O valor da capacidade térmica específica vale zero quando a temperatura é zero absoluto e aumenta com o aumento da temperatura até um valor limite.
- d) O valor da capacidade térmica específica não está relacionada com a mudança de temperatura.

**9) Qual das alternativas a seguir tem a maior capacidade de calor específico?**

- a) água
- b) Ferro
- c) Alumínio
- e) Vidro

**10) O que é capacidade térmica?**

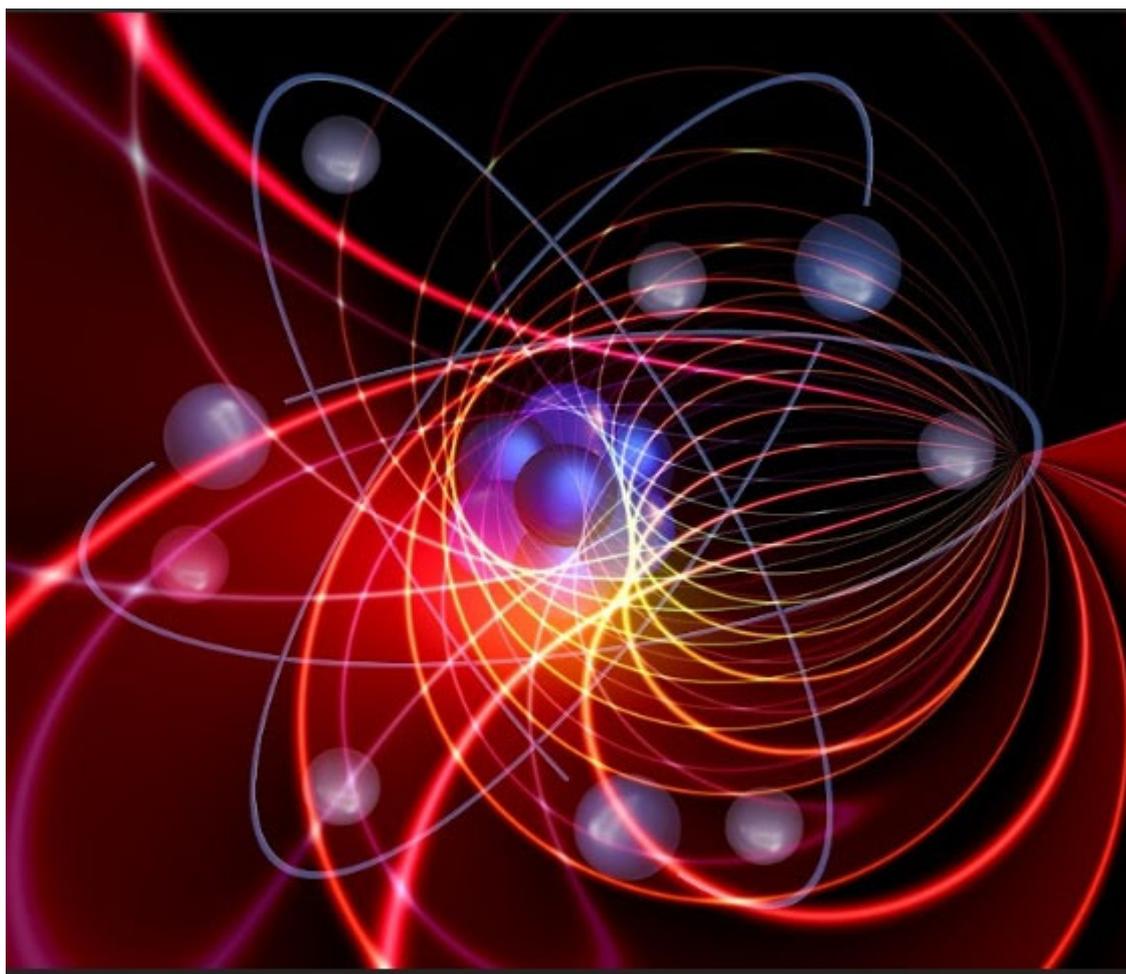
- a) A quantidade de calor fornecida para aumentar a temperatura de uma substância em 1°C
- b) A quantidade de calor fornecida para baixar a temperatura de uma substância em 1°C
- c) A quantidade de calor necessária para transformar uma substância de sólida em líquida.
- d) A quantidade de calor necessária para transformar uma substância de líquido em gasoso.

**GABARITO -1A 2B 3A 4D 5C 6B 7B 8C 9A 10A**

## Aula 6

# Radioatividade

Figura 29 - Abstração do mundo em escalas atômicas



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzNQ&ctype=Radioatividade-Image+by+Gerd+Altmann+from+Pixabay+physics-3871216+%282%29.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a6a365822\\_68dc2b06e610b108968ec%40ip-10-81-5-43.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=1922116&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzNQ&ctype=Radioatividade-Image+by+Gerd+Altmann+from+Pixabay+physics-3871216+%282%29.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a6a365822_68dc2b06e610b108968ec%40ip-10-81-5-43.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=1922116&accountId=0)

**Tema:** Radioatividade

**Área:** Ciência da Natureza e suas Tecnologias

**Disciplina:** Física

**Ano/Série:** 3º ano do Ensino Médio

**Duração da aula:** 2 tempos de 40 minutos cada

**Objetivos Gerais:**

- Despertar o aluno à investigação científica
- Apresentar qualitativamente conteúdos da Física sob a óptica da História da Ciência
- Mostrar o protagonismo da Ciência e Tecnologia na atualidade.

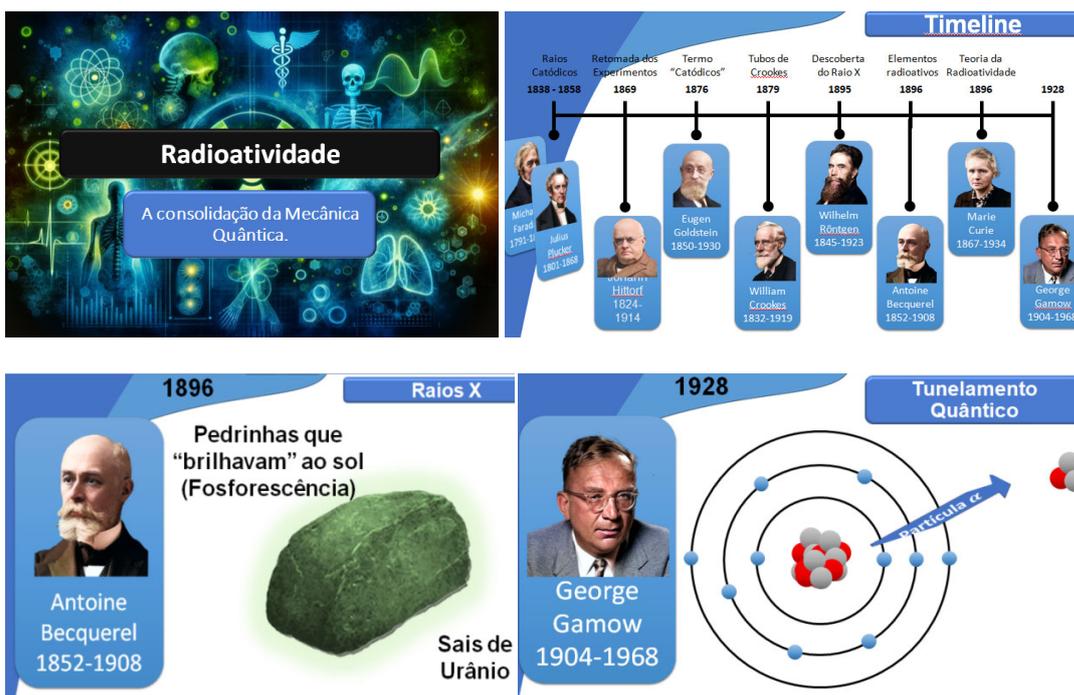
**Objetivos Específicos:**

- Apresentar o momento histórico que antecedeu a descoberta da Radioatividade
- Descrever raio catódico e raios x
- Apresentar a descoberta de Becquerel
- Apresentar o protagonismo do casal Curie
- Descrever a participação de Rutherford na teoria de radioatividade
- Descrever as radiações alfa, beta e gama
- Citar a descoberta de George Gamow na Radioatividade

**Recursos utilizados:**

- Computador
- Projetor
- Slides utilizando o software Power Point

Esta aula consiste em 40 slides e abaixo temos alguns como exemplos:



O acesso à totalidade da aula com todos os slides encontra-se no link abaixo:

### [6ª Aparent - Radioatividade](#)

Está disponível no link abaixo um Tutorial, abordando na percepção do autor, uma forma de apresentação da aula, com as ideias e a teoria presentes nos slides quando das suas concepções.

<https://drive.google.com/file/d/1Qeo5FdLe3GXGOp3u9CBJWy9x9W8nBvef/view?usp=sharing>

Questionário apresentado após a aula:

### Quiz 6 – Radioatividade

#### 1) O que é radioatividade?

- A propriedade de qualquer substância de brilhar no escuro.
- A propriedade do núcleo de um átomo de emitir partículas ou radiação.
- Uma propriedade do átomo de ter alta densidade.
- A propriedade de estabilidade de alguns gases monoatômicos.

#### 2) A meia-vida de um material radioativo é:

- a) O tempo que leva para a radioatividade dobrar
- b) O tempo que leva para a radioatividade se tornar zero
- c) O tempo que leva para que a metade de sua massa, por radioatividade, reduza pela metade.
- d) O tempo que leva para a radioatividade aumentar pela metade

**3) Quem primeiro percebeu a radioatividade em 1896?**

- a) Henri Becquerel (1852-1908)
- b) Wilhelm Rontgen (1845-1923)
- c) Pierre Curie (1859-1906)
- d) Marie Curie (1869-1934)

**4) Qual tipo de radiação tem a maior capacidade de penetração e é mais perigosa para os tecidos vivos?**

- a) Radiação alfa
- b) Radiação beta
- c) Radiação gama
- d) Radiação de nêutrons

**5) Como a emissão alfa na radioatividade está relacionada à mecânica quântica?**

- a) A mecânica quântica não está relacionada à emissão alfa.
- b) A mecânica quântica descreve a emissão alfa como o resultado do tunelamento quântico, quando a partícula alfa atravessa uma barreira de potencial.
- c) A mecânica quântica descreve a emissão beta como a emissão de quarks.
- d) A mecânica quântica descreve a emissão alfa como a emissão de fótons.

**6) A quem é atribuída a descoberta da radioatividade?**

- a) Henry Becquerel (1852 – 1908)
- b) Albert Einstein (1879 – 1955)
- c) Max Planck (1858 – 1947)
- e) Isaac Newton (1642 – 1727)

**7) Qual dos seguintes materiais é comumente usado para proteger contra partículas alfa?**

- a) Chumbo
- b) Concreto
- c) Papel
- d) Plástico

**8) O que acontece com o núcleo de um átomo durante o decaimento radioativo?**

- a) Permanece inalterado
- b) Absorve mais prótons
- c) Torna-se mais instável
- d) Sofre uma transformação, emitindo partículas e/ou energia

**9) Qual das alternativas a seguir não é um tipo de decaimento radioativo?**

- a) Decaimento alfa
- b) Decaimento beta
- c) Decaimento gama
- d) Decaimento magnético

**10) Qual isótopo radioativo é comumente usado na datação por carbono para determinar a idade de materiais orgânicos antigos?**

- a) Urânio-235
- b) Carbono-14
- c) Radônio-222
- d) Plutônio-239

**GABARITO**

**1B 2C 3A 4C 5B 6A 7C 8D 9D 10B**

## Aula 7

# Espectros de Emissão e Absorção

Figura 30 - O espectro visível do sol



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzNQ&ctype=5-espectra-pexels-ben-mack-5707570+%282%29.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a6a368454\\_68dc2b06e610b1089691%40ip-10-81-5-43.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=5882078&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzNQ&ctype=5-espectra-pexels-ben-mack-5707570+%282%29.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a6a368454_68dc2b06e610b1089691%40ip-10-81-5-43.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=5882078&accountId=0)

**Tema:** Espectros de Emissão e Absorção

**Área:** Ciência da Natureza e suas Tecnologias

**Disciplina:** Física

**Ano/Série:** 3º ano do Ensino Médio

**Duração da aula:** 2 tempos de 40 minutos cada

**Objetivos Gerais:**

- Despertar o aluno à investigação científica
- Apresentar qualitativamente conteúdos da Física sob a óptica da História da Ciência
- Mostrar o protagonismo da Ciência e Tecnologia na atualidade.

**Objetivos Específicos:**

- Definir espectroscopia e localizar o momento histórico da descoberta do espectroscópico
- Definir espectro de emissão e de absorção
- Conhecer os espectros de emissão e absorção do átomo de Hidrogênio
- Conhecer a explicação das linhas espectrais a partir do modelo atômico de Bohr

**Recursos utilizados:**

- Computador
- Projetor
- Slides utilizando o software Power Point

Esta aula consiste em 56 slides e abaixo temos alguns como exemplos:

**Linhas Espectrais**  
A consolidação da Mecânica Quântica.

**Espectro Eletromagnético**  
ISAAC NEWTON (1643 – 1727)

**Espectroscopia**  
Joseph V. Fraunhofer (1787 – 1826)

**Espectroscopia**  
Gustav Kirchhoff (1824 – 1887)  
Espectro Contínuo  
Espectro de Absorção  
Espectro de Emissão

**Espectroscopia**  
Johann J. Balmer (1825 – 1898) Matemático  
$$\lambda = B \left( \frac{n^2}{n^2 - m^2} \right)$$
  
Espectro de Emissão  
Espectro de Absorção

**Quantização**  
Restrição  
Niels Bohr (1885 – 1962)

O acesso à totalidade da aula com todos os slides encontra-se no link abaixo:

[7ª Aparent - Espectros de Emissão e Absorção](#)

Está disponível no link abaixo um Tutorial, abordando na percepção do autor, uma forma de apresentação da aula, com as ideias e a teoria presentes nos slides quando das suas concepções.

<https://drive.google.com/file/d/1qHHwiubbvGqc-1LB8Gu1iMRW2YXmdL-A/view?usp=sharing>

Questionário apresentado após a aula:

### Quiz 7 – Espectro Atômico

**1) Quem foi o cientista conhecido por seu trabalho sobre espectros atômicos e por criar o primeiro modelo da mecânica quântica do átomo?**

- a) Ernest Rutherford (1871 – 1937)
- b) Max Planck (1858 – 1947)
- c) Niels Bohr (1885 – 1962)
- d) Albert Einstein (1879 – 1955)

**2) O estudo dos espectros atômicos forneceu evidências valiosas para a compreensão de qual conceito científico?**

- a) Mecânica Quântica
- b) Indução eletromagnética
- c) Relatividade geral
- d) Termodinâmica

**3) Qual é a principal causa dos espectros de linha observados nos espectros atômicos?**

- a) O reflexo da luz
- b) A interferência das ondas de luz
- c) A quantização dos níveis de energia no átomo
- d) O efeito Doppler

**4) Como o modelo atômico de Bohr difere do modelo clássico de Rutherford?**

- a) O átomo de Rutherford prevê elétrons orbitando em níveis de energia quantizados em torno de um grande núcleo. Bohr estabelece o conceito de átomo que tem seu núcleo orbitado por células aceleradas por elétrons que perdem energia e colapsam neste núcleo
- b) O átomo de Rutherford prevê um pequeno núcleo orbitado por elétrons acelerados que perdem energia e colapsam em espiral com o núcleo. O átomo de Bohr possui elétrons orbitando em níveis quantizados.

c) A única diferença entre estes dois modelos atômicos é que no átomo de Bohr; o elétron não possui órbita definida, transitando em vários raios orbitais sem alterações energéticas.

d) Dados os dois modelos atômicos da Física clássica, praticamente não há diferenças. A única diferença evidente é que no modelo de Rutherford o núcleo é maior.

**5) Qual dos seguintes espectros atômicos está associado à transição de elétrons de níveis de energia mais altos para níveis de energia mais baixos?**

- a) Espectro de absorção
- b) Espectro de emissão
- c) Espectro contínuo
- d) Espectro de linha

**6) O que é um espectro atômico?**

- a) Uma exibição colorida de fogos de artifício
- b) Um padrão único de luz emitida ou absorvida pelos átomos
- c) Um tipo de decaimento radioativo
- d) A estrutura do núcleo do átomo

**7) Que tipo de espectro atômico consiste em linhas brilhantes e discretas sobre um fundo escuro?**

- a) Espectro contínuo
- b) Espectro de absorção
- c) Espectro de emissão
- d) Espectro de linha

**8) No modelo de Bohr, o que representam os diferentes níveis em um átomo?**

- a) O número de elétrons no átomo.
- b) As órbitas dos elétrons no átomo.
- c) As diferentes energias do elétron.
- d) A probabilidade de captura de elétrons.

**9) Num espectro de emissão, o que cada linha representa?**

- a) A absorção de comprimentos de onda específicos de luz
- b) Os comprimentos de onda da luz emitida por elétrons excitados que retornam a níveis de energia mais baixos
- c) Os comprimentos de onda da luz que são transmitidos através de um material
- d) Os comprimentos de onda da luz refletida por uma superfície

**10) O que acontece quando os elétrons em um átomo absorvem energia e passam para níveis de energia mais elevados?**

- a) Os elétrons retornam ao nível mais estável, emitindo luz
- b) O átomo esfria
- c) O átomo se contrai em tamanho
- d) O átomo perde elétrons

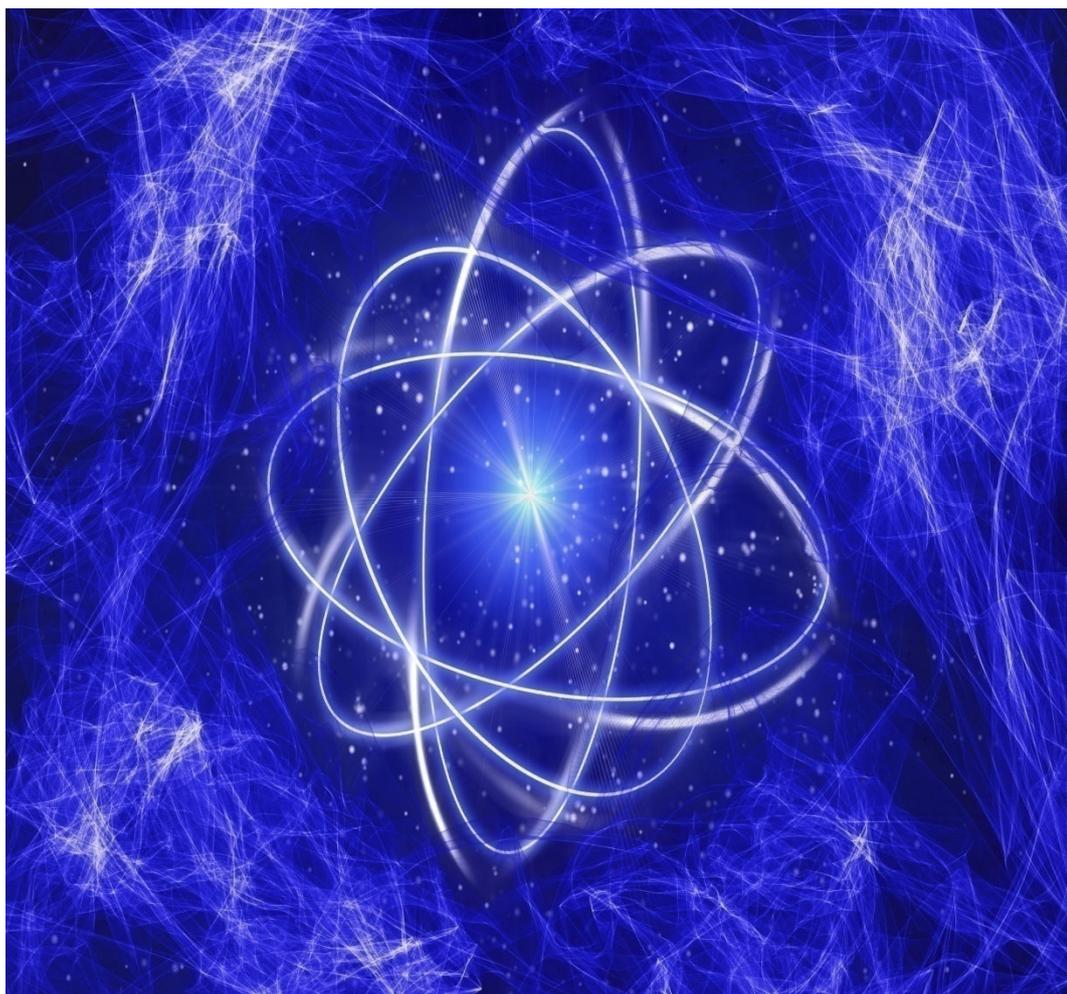
**GABARITO**

**1C 2A 3C 4B 5B 6B 7C 8C 9B 10A**

## Aula 8

# A Mecânica Quântica

Figura 31 - A segunda Revolução Científica



Fonte: [https://bmail.uol.com.br/attachment?msg\\_id=NzAzNQ&ctype=Quantica-Image+by+Gerd+Altmann+from+Pixabay+waves-7854066.jpg&disposition=attachment&content\\_id=%3C65c1a6a36f2c3\\_68dc2b06e610b108970b9%40ip-10-81-5-43.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=15012482&accountId=0](https://bmail.uol.com.br/attachment?msg_id=NzAzNQ&ctype=Quantica-Image+by+Gerd+Altmann+from+Pixabay+waves-7854066.jpg&disposition=attachment&content_id=%3C65c1a6a36f2c3_68dc2b06e610b108970b9%40ip-10-81-5-43.ec2.internal.mail%3E&folder=Itens%20Enviados&attsize=15012482&accountId=0)

**Tema:** A Mecânica Quântica

**Área:** Ciência da Natureza e suas Tecnologias

**Disciplina:** Física

**Ano/Série:** 3º ano do Ensino Médio

**Duração da aula:** 2 tempos de 40 minutos cada

**Objetivos Gerais:**

- Despertar o aluno à investigação científica
- Apresentar qualitativamente conteúdos da Física sob a óptica da História da Ciência
- Mostrar o protagonismo da Ciência e Tecnologia na atualidade.

**Objetivos Específicos:**

- Citar os cinco problemas não resolvidos pela Teoria Clássica
- Definir o que é quantum
- Apresentar a dualidade onda-partícula
- Citar o trabalho de Louis de Broglie
- Citar o Princípio da Incerteza
- Definir o que é Interpretação de Copenhagen
- Mostrar as aplicações da Mecânica Quântica na atualidade

**Recursos utilizados:**

- Computador
- Projetor
- Slides utilizando o software Power Point

Esta aula consiste em 42 slides e abaixo temos alguns como exemplos:

**"2ª" Revolução Científica - 1900**

Fiz uma gambiarra para criar uma equação que explicasse como os corpos aquecidos irradiam e acabei por perceber que radiação e energia se propagam por pacotes. ( $E = hf$ ) Levei algum tempo para acreditar na minha descoberta em 1900.

Gênio é você!

Pois é, em 1905 eu expliquei o Efeito Fotoelétrico, problema não resolvido desde 1887, utilizando o seu pacote de energia ou quantum e Planck ainda ficou meio bobado! Acerta cara, você é um gênio!

Eu também usei o conceito de energia quantizada do Planck para estabelecer um modelo para o átomo de hidrogênio e ele todo humilde.

Max Planck (1858-1947)  
Nobel de Física de 1918

Albert Einstein (1879-1955)  
Nobel de Física de 1921

Max Born (1882-1970)  
Nobel de Física de 1927

Walter Gerlach (1889-1979)  
Nobel de Física de 1927

**Dualidade da Luz no século XX**

A **dualidade da luz** (onda-partícula) retornou no século XX com o surgimento da **Mecânica Quântica**.

Partícula de Luz (fóton) x Onda luminosa

Eu que criei o termo **fóton** em 1926!!!

Planck - 1900

Lenard - 1902

Einstein - 1905

Bahr - 1913

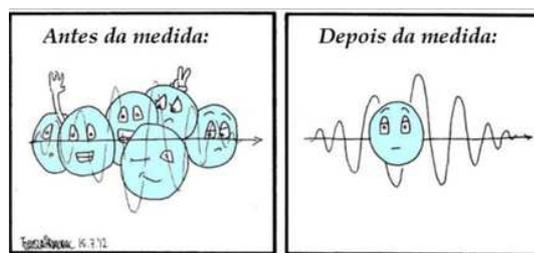
Compton - 1923

Louis de Broglie - 1924

Detecto esse cara!  
Calma

Eu comprei pioneiros!

Esta roupa estava em promoção!



### Problemas da medição na Mecânica Quântica



Max Born (1882-1970)  
Nobel de Física em 1954

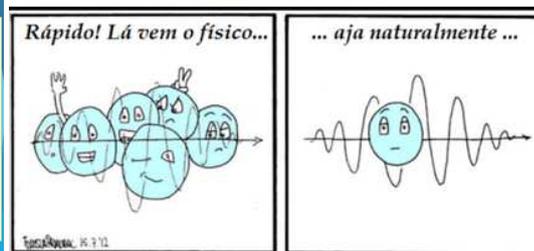
• Em 1922 Otto Stern (1888-1969), assistente de Max Born, e Walther Gerlach (1889-1979) realizaram um experimento e descobriram o spin do elétron e a aleatoriedade na medição.

• Em 1924 Max Born cunhou o termo "Mecânica Quântica"

• Em 1926, Max Born afirmou que não é possível descrever o porquê dos Observáveis Quânticos possuírem os valores medidos.

• O ferramental experimental utilizado para se efetuar medidas, que faz o Sistema Quântico se decidir qual valor se manifestará.

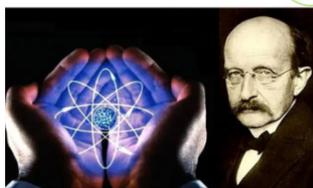
Na verdade, o que ocorre:



No nosso mundo real de dimensões visíveis, uma visão clássica foi sedimentada pelas previsões concretas motivadas por observações lógicas, incluindo um determinismo incontestável nos pensadores e produtores de ciência, diante de regras impostas pela natureza, simples e seguras.

Porém se adentrarmos nas escalas atômicas e subatômicas da estrutura da matéria, as certezas desaparecem e a realidade desafia o senso comum.

Estamos no mundo da **Mecânica Quântica**, que rompe paradigmas e a cada descoberta neste novo e pequeno universo, surgem fantásticas aplicações.



<https://sigreosdomundo.17.com/max-planck-pai-da-fisica-quantica/>

O acesso à totalidade da aula com todos os slides encontra-se no link abaixo:

### [8ª Aparent - Mecânica Quântica](#)

Está disponível no link abaixo um Tutorial, abordando na percepção do autor, uma forma de apresentação da aula, com as ideias e a teoria presentes nos slides quando das suas concepções.

[https://drive.google.com/file/d/11zamY\\_NA96sHfGk8wuVOR26qkE-DgR9f/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/11zamY_NA96sHfGk8wuVOR26qkE-DgR9f/view?usp=sharing)

Questionário apresentado após a aula:

## Quiz 8 – Mecânica Quântica

### **1) O que é a dualidade onda-partícula na mecânica quântica?**

- a) Refere-se à propriedade da luz e dos elétrons de se comportarem ora como partículas, ora como ondas. Esta propriedade foi comprovada com o experimento de difração de elétrons realizado em 1926. por G. P. Thompson.
- b) Disputa sobre a natureza da luz liderada por Newton e Huygens, quando o primeiro afirmou que a luz era uma partícula e o segundo que a luz era uma onda. A experiência de Thomas Young no século 18 resolveu esta dúvida.
- c) Disputa sobre a definição da natureza da luz liderada por Newton e Huygens. O primeiro afirmava que a luz era uma onda e o segundo que a luz era uma partícula. A experiência da dupla fenda de Young no século 18 resolveu a disputa.
- d) É a propriedade física que permite que matéria de qualquer dimensão se comporte visivelmente como uma onda.

### **2) Qual é a compreensão do determinismo e da previsibilidade na mecânica quântica?**

- a) Podemos fazer previsões confiáveis sobre a localização e velocidade das partículas pertencentes a um sistema, simultaneamente, tanto na mecânica clássica, quanto na mecânica quântica.
- b) Não podemos medir simultaneamente, a localização e a velocidade de partículas no universo quântico.
- c) O Princípio da Incerteza de Heisenberg de 1927 confirma o determinismo e a previsibilidade exatamente como na mecânica clássica.
- d) As equações cinemáticas clássicas podem fazer previsões simultâneas de localização e velocidade dos elétrons.

### **3) Qual experimento demonstrou que a luz (radiação eletromagnética) interage com partículas carregadas como elétrons, demonstrando que também pode se comportar como partículas (fótons) apoiando a idéia da dualidade onda-partícula da luz da mecânica quântica?**

- a) Experiência de queda de óleo de Millikan

- b) Experimento de Dispersão Compton
- c) Experimento da Folha de Ouro de Rutherford
- d) Experimento Edmilson-Tiquinho

**4) Qual cientista é conhecido por seu trabalho sobre a dualidade onda-partícula dos elétrons, demonstrando que eles exibem comportamento tanto de onda quanto de partícula?**

- a) Max Planck (1858-1947)
- b) Albert Einstein (1879-1955)
- c) Niels Bohr (1885-1942)
- d) Louis de Broglie (1892-1987)

**5) Quais dispositivos tecnológicos ou aplicações abaixo dependem dos princípios da mecânica quântica?**

- a) célula fotovoltaica, LED, termômetro de testa, smartphone.
- b) laser, ressonância magnética, sensor de presença e telégrafo sem fio.
- c) máquina a vapor, chip, leitores ópticos, telescópios
- d) microscópios, computadores, equipamentos de raios X e aspiradores de pó.

**6) No contexto da mecânica quântica, o que afirma o Princípio da Incerteza de Heisenberg?**

- a) Quanto mais você sabe sobre a posição de uma partícula, menos você sabe sobre seu momento.
- b) A posição e a velocidade de uma partícula podem ser conhecidas com absoluta certeza.
- c) Os elétrons só podem existir em níveis de energia discretos.
- d) A mecânica quântica é determinística e previsível.

**7) Qual cientista é conhecido por sua equação de onda, fundamental para a mecânica quântica e que descreve o comportamento dos elétrons nos átomos?**

- a) Max Planck (1858-1947)
- b) Erwin Schrodinger (1887-1961)
- c) Niels Bohr (1885-1962)

d) Paul Dirac (1902-1984)

**8) Qual é o nome do princípio da mecânica quântica que afirma que dois elétrons em um átomo não podem ter o mesmo conjunto de números quânticos?**

- a) Princípio de Exclusão de Pauli
- b) Princípio de Bohr
- c) Princípio de Schrödinger
- d) Princípio de Heisenberg

**9) De acordo com a Física Quântica, as partículas em movimento comportam-se como ondas, de modo que podemos associar-lhes um comprimento de onda. Quem descobriu este importante princípio quântico?**

- a) J. J. Thomson (1856-1940)
- b) Robert Millikan (1868-1953)
- c) Luis de Broglie (1892-1987)
- d) Erwin Schrodinger (1887-1961)

**10) Todas as partículas fundamentais possuem uma propriedade quântica chamada spin. Em 2012, os cientistas descobriram a única partícula fundamental conhecida sem spin. Qual é o nome desta partícula?**

- a) Méson de Yukawa
- b) Bóson de Higgs
- c) Férmion de Dirac
- b) Gráviton de Edmilson

**GABARITO - 1A 2B 3B 4D 5A 6A 7B 8A 9C 10B**

**Produto Educacional - Terceira parte:**

# A constante de Planck em um contexto pedagógico:

Atividade experimental introdutória  
à Mecânica Quântica

## 1. FUNDAMENTOS

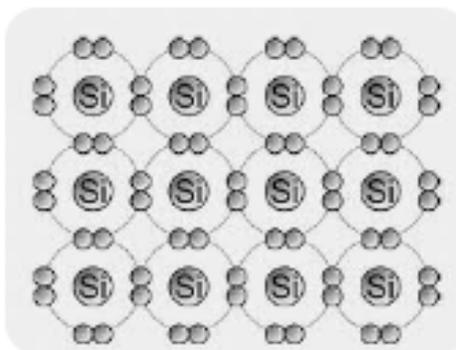
Primeiramente ressaltamos que LED se trata de uma sigla, a saber: Light Emitting Diode ou diodo emissor de luz, concebido por Nick Holonyac Jr. em 1962 no laboratório da General Eletric nos Estados Unidos. Com baixo consumo de energia e grande vida útil, possui várias aplicações como sinalizador de passagem de corrente elétrica, iluminação, além do seu uso em TVs e monitores. Produzidos a partir de materiais semicondutores, os LEDs podem emitir luzes de frequências diferentes em função de diferentes modificações efetuadas na composição dos diodos.

Peruzzo (2013) afirma que quanto à condução elétrica, classificamos os materiais em isolantes, semicondutores e condutores, aonde o primeiro praticamente não conduz e o último se mostra bom condutor de corrente elétrica. Para a existência desta corrente, pressupõe a existência de elétrons livres, abundantes nos condutores e praticamente inexistentes nos isolantes (dielétricos). No entanto, sob certas condições, se aumentarmos a temperatura ou incidirmos luz em um semicondutor até mesmo puro, podemos nele estabelecer uma corrente elétrica.

De acordo com Maganha (2014), semicondutores, como o Germânio, o Silício e o Carbono possuem uma resistência elétrica de valor intermediário entre os valores dos condutores e dos dielétricos. Atualmente na fabricação de componentes eletrônicos, o Silício é o semicondutor predominantemente utilizado até pela sua abundância na natureza. Este grupo de semicondutores possui quatro elétrons em sua camada de valência, a última e a mais importante camada do átomo, que vai interagir com outros átomos. Assim, quando na camada de valência existir oito elétrons, temos um átomo de Silício, por exemplo, estabilizado.

Quando associamos vários átomos de Silício, seus quatro elétrons de suas camadas de valência irão interagir por compartilhamento, constituindo uma ligação covalente e culminando na estabilidade de cada átomo de Silício com oito elétrons na camada de valência. Temos assim, uma estrutura cristalina de Silício, ou cristal de Silício semicondutor intrínseco ou puro.

Figura 32 - Cristal semiconductor puro de Silício



Fonte: [https://4.bp.blogspot.com/-](https://4.bp.blogspot.com/-UFRtfHnJhVI/TmGb98P2iKI/AAAAAAAAAjM/Oxr8NbuXO48/s1600/celulaFotovoltaicaTeoria_3.gif)

[UFRtfHnJhVI/TmGb98P2iKI/AAAAAAAAAjM/Oxr8NbuXO48/s1600/celulaFotovoltaicaTeoria\\_3.gif](https://4.bp.blogspot.com/-UFRtfHnJhVI/TmGb98P2iKI/AAAAAAAAAjM/Oxr8NbuXO48/s1600/celulaFotovoltaicaTeoria_3.gif)

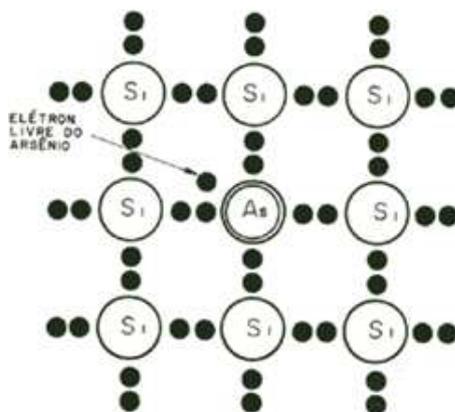
Peruzzo (2013) descreve que, sob a óptica de níveis de energia em um átomo, adota-se o conceito de bandas, a de valência (BV) e a de condução (BC). Na primeira estão elétrons pertencentes a níveis de energia mais distantes do núcleo e na segunda, o local mais provável de elétrons livres. Assim, a condutividade de um semiconductor cresce com o aumento da temperatura ou com incidência de luz face da excitação de elétrons da BV para a BC. A saída de um elétron de uma região cria uma ausência equivalente a uma carga positiva na outra, ou seja, a ida de um elétron para a BC cria uma carga positiva na BV e isto pode ser provocado por exemplo por um fóton, dando mobilidade para as lacunas e os elétrons no semiconductor. Uma maneira de potencializar a condutividade de semicondutores é adicionar impurezas ou promover uma chamada dopagem.

Os semicondutores são classificados em intrínsecos e extrínsecos, e para Maganha (2014), o semiconductor intrínseco ou puro é um material isolante. Para que ele possa conduzir eletricidade de maneira bem eficaz e sem a necessidade de aquecimento ou luz, podemos transformá-lo em um semiconductor extrínseco ou semiconductor impuro ou dopado. Como acima descrito, dopar um semiconductor é o mesmo que adicionar convenientemente, outros componentes no cristal semiconductor. As impurezas são átomos com três ou cinco elétrons na camada de valência. Podemos citar o Boro, o Alumínio e o Gálio como trivalentes, e o Antimônio, o Arsênio e o Fósforo como pentavalentes.

Quando adicionamos no cristal de Silício, uma impureza com cinco elétrons na camada de valência, como o Fósforo ou Arsênio, produziremos uma camada com nove elétrons e este elétron em excesso será chamado de elétron livre. Temos

então, o que chamamos de cristal semiconductor dopado do tipo N, de negativo, diante do citado excesso ocasionado pela introdução da impureza no cristal. Quanto maior for o número de impurezas, mais negativo ficará o cristal semiconductor em face do aumento de elétrons livres.

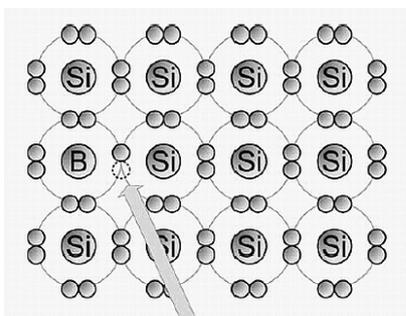
Figura 33 - Cristal de Silício dopado com Arsênio



Fonte: [https://www.geocities.ws/afonsobejr/semicondutores.html\\_clip\\_image008.gif](https://www.geocities.ws/afonsobejr/semicondutores.html_clip_image008.gif)

Quando adicionamos uma impureza trivalente como o Boro, no cristal de Silício, teremos agora sete elétrons na camada de valência e uma lacuna, ao invés de uma estabilidade com oito elétrons. Assim, teremos um semiconductor dopado do tipo P, de positivo, em face da ausência de elétrons, ou existência de lacunas, ocasionada pela inserção do Boro no cristal.

Figura 34 - Cristal de Silício dopado com Boro



Fonte: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSYRi1q0sN3zWjYVSgK-EXPW9lkykp-5Px9ZQ&usqp=CAU>

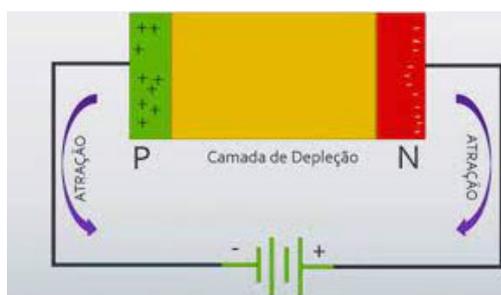
Tanto o cristal semiconductor dopado do tipo P, quanto do tipo N podem conduzir eletricidade, mas estes semicondutores isolados não possuem funções na

eletrônica. Quando combinados, a junção PN, protagoniza a base da eletrônica. Boylestad (2013) define a existência de dois tipos de portadores de carga, os portadores majoritários e os minoritários. Os primeiros são elétrons no semiconductor tipo N e lacunas no tipo P. Já os portadores minoritários são elétrons nos semicondutores tipo P e lacunas nos semicondutores tipo N. Ressaltemos que o semiconductor dopado tipo P protagoniza uma capacidade de receber elétrons como se estivesse carregado positivamente e o tipo N, analogamente, manifesta uma capacidade de doar elétrons como se estivesse carregado negativamente. Porém o diodo está eletricamente neutro, pois os átomos componentes do diodo, incluindo os dopantes, possuem o mesmo número de prótons e elétrons.

Na região da fronteira dos cristais, as lacunas do semiconductor tipo P irão atrair os elétrons livres do semiconductor tipo N. Ou seja, na região próxima da junção, haverá um efeito chamado de recombinação, com lacunas preenchidas por elétrons livres. Haverá então, uma neutralidade com oito elétrons nas camadas de valência dos átomos desta região fronteira. A junção PN ou diodo, após a recombinação, terá esta região central chamada de Camada de Depleção ou Barreira de Potencial.

Boylestad (2013) relata ainda três condições de operação de um diodo, a ausência de polarização ou diodo desligado, a polarização reversa e a polarização direta. Podemos conectar o diodo (junção PN) aos pólos de um gerador de maneira reversa, ou seja, ligar o pólo negativo no cristal P e o positivo no cristal N. Assim as lacunas do cristal P serão atraídas pelo pólo negativo e os elétrons livres do cristal N serão atraídos pelo pólo positivo do gerador. Como conseqüência, surgirá um aumento da Camada de Depleção ou Barreira de Potencial. Assim, este diodo polarizado reversamente não conduzirá corrente elétrica.

Figura 35 - Polarização reversa de um diodo

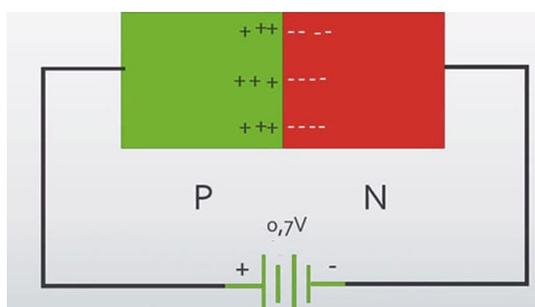


Fonte: <https://www.oficinadanet.com.br/imagens/post/14684/2.jpg>

Podemos também conectar o diodo aos pólos de um gerador de maneira direta, ou seja, ligar o pólo positivo do gerador no cristal P e o pólo negativo no cristal N. Ao contrário da polarização reversa, haverá uma repulsão nos dois lados do diodo. O pólo positivo do gerador repelirá as lacunas do cristal P e o pólo negativo repelirá os elétrons livres do cristal N. Surgirá então, segundo Lorenz (2016), uma diminuição da Camada de Depleção, e se aumentarmos a tensão elétrica no gerador, a Barreira de Potencial irá diminuir ainda mais. Existirá uma tensão que fará a Camada de Depleção tender a zero e com as cargas positivas e negativas dos cristais P (anodo) e N (catodo) respectivamente, se recombinarem. Assim, com a polarização direta teremos com esta tensão elétrica específica, a possibilidade de condução elétrica neste diodo, apenas em um sentido.

Podemos então concluir que um diodo, a partir de uma tensão elétrica específica em uma polarização direta, passa de dielétrico a condutor. Na condição de condutor, só permite a corrente elétrica somente em um só sentido.

Figura 36 - Polarização direta de um diodo



Fonte: <https://www.oficinadanet.com.br/imagens/post/14684/3.jpg>

Assim, podemos caracterizar o diodo como um componente ativo por promover a corrente elétrica em um só sentido e diferentemente, classificamos um resistor como componente passivo por não impedir corrente em nenhum sentido. Lorenz (2016) descreve que o LED é um dispositivo tem um processo contrário ao de uma célula solar, transformando energia elétrica em luz na junção PN de um semiconductor quando sob tensão direta. Quando esta tensão é aplicada através desta junção PN, elétrons e lacunas recombinam-se na região de depleção, promovendo a eletroluminescência, ou emissão de luz. Na transposição por parte do

elétron, da barreira de potencial para ocupação das lacunas, ocorre tunelamento quântico (COMO FUNCIONA [...], 2021). Ressaltemos que os diodos comuns percorridos por corrente elétrica já emitiam radiação no espectro do infravermelho, e com o desenvolvimento da pesquisa outros materiais foram utilizados, passando os diodos a emitir luz visível. A luz emitida não é monocromática, mas com faixa relativamente estreita, que depende do cristal e da impureza de dopagem com que os componentes do diodo são fabricados, que promoverão a emissão de fótons com aproximadamente a mesma frequência.

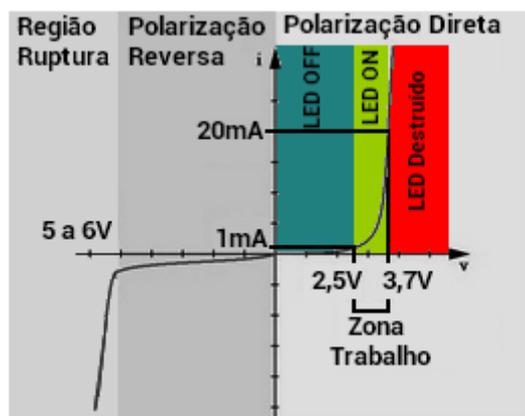
Figura 37 - Tabela com características de LEDs

Cor	Comprimento de onda	Material típico
Infravermelho	850 a 950 nm	GaAs / AlGaAs
Vermelho	621 a 700 nm	GaAsP
Laranja	605 a 620 nm	AlGaInP
Amarelo	585 a 590 nm	GaAsP
Verde	527 a 570 nm	InGaN
Azul	470 a 475 nm	ZnSe
Ultravioleta	385 a 405 nm	BN / Diamante / AlGa <sub>x</sub> N

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=nIPmGZa2dnl&t=753s>

Podemos então resumir, de acordo com Tipler (1995) que um diodo, no caso específico o LED, quando submetido a uma polarização reversa, tem a corrente elétrica impedida de se estabelecer e com o aumento da tensão entre seus terminais, pode-se chegar à ruptura do mesmo. Quando o LED é submetido a uma polarização direta, e convenientemente aumentarmos a tensão entre seus terminais, existirá uma tensão em que o LED começará a emitir luz. Da mesma forma que na submissão à polarização reversa, se continuarmos a aumentar a tensão elétrica nos terminais do LED sob polarização direta, chegará a um valor que o diodo emissor de luz será destruído.

Figura 38 - Zona de funcionamento do LED



Fonte: [https://www.electronica-pt.com/led#google\\_vignette](https://www.electronica-pt.com/led#google_vignette)

Podemos citar outro dispositivo semicondutor, responsável pela revolução da eletrônica: o transistor, usado para amplificar ou chavear sinais eletrônicos e potência elétrica. Foi inventado em 1947 por John Bardeen (1908-1991), Walter Brattain (1902- 1987) e William Shockley (1910-1989), todos laureados com Nobel de Física em 1956, “por suas pesquisas sobre semicondutores e sua descoberta do efeito do transistor”. Cabe ressaltar que John Bardeen foi agraciado com o prêmio Nobel duas vezes, sendo o segundo prêmio obtido em 1972, “pelo desenvolvimento da teoria quântica da supercondutividade”. Os diodos permitem que a corrente flua em uma direção, enquanto os transistores amplificam e comutam os sinais eletrônicos. O diodo converte a corrente alternada em corrente contínua enquanto o transistor transfere os sinais de entrada do circuito de baixa resistência para o circuito de alta resistência, e ainda, o diodo apresenta a junção de dois materiais, um do tipo P e um do tipo N, enquanto que o transistor apresenta a junção de três materiais, dois do tipo P e um do tipo N ou o contrário, dois do tipo N e um tipo do P.

Mas, a maior importância do transistor está no fato de ter sido o motivo para o surgimento do Vale do Silício. O’ Mara (2019) relata que em 1956, William Shockley deixa os Laboratórios Bell em Nova Jersey, local de descoberta do transistor, e migra para Mountain View onde fica hoje o Campus da Google, há apenas 10 km da cidade onde ele foi criado, Palo Alto, Califórnia. Shockley contrata vários universitários de Stanford, também em Palo Alto e cria a Shockley Semiconductor Laboratory. Seu temperamento difícil, contraditório e controverso pode ter sido

desencadeador para, segundo O' Mara (2019), que oito funcionários deixassem a empresa em 1957 seguindo destinos próprios e ficando eternizados como “os oito traidores”. Robert Noyce (1927-1990), desenvolvedor do primeiro circuito integrado do mundo, funda no mesmo ano em San Jose a Fairchild Semiconductor. De acordo com Shurkin (2006), em 1967 a Fairchild teve sua própria rebelião, liderada por seu diretor de fabricação Charlie Sporck, que fundou sua própria empresa, a Nacional Semiconductor, demitindo antes, vários funcionários da Fairchild.

Após um ano, Noyce juntamente com o outro “traidor” Gordon Moore (1929-2023), criam em Mountain View a Integrated Electronics (Intel) em 1968.

O termo *Vale do Silício* é uma alusão a uma região próxima à baía de São Francisco, local onde já nesta época, existiam a Intel e a AMD, consumidoras do semicondutor silício para a produção de componentes eletrônicos. Frederick Terman (1900-1982), reitor de Stanford entre 1955 e 1965, e William Shockley são considerados os pais do vale do Silício, termo foi cunhado pelo jornalista Don Hoefler (1922-1986) em 1971. O'Mara (2019) relata ainda que em 1972 Nolan Bushnell (1943 - ...) e Ted Dabney (1937-2018) fundam a Atari em Sunnyvale, em 1976 Steve Jobs (1955-2011), Steve Wozniak (1950-...) e Ronald Wayne (1934-...) concebem a Apple em Cupertino, em 1977 Larry Ellison (1944-...), Bob Miner (1941-1994) e Ed Oates (1946-...) instituem a Oracle em Santa Clara e, então a região passa a ser um pólo de atração de empresas do ramo de tecnologia até os dias de hoje.

## 2. OBTENÇÃO DA CONSTANTE DE PLANCK ATRAVÉS DE EXPERIMENTO UTILIZANDO LED

Podemos admitir que a energia do fóton emitido depende da tensão do circuito e da frequência da luz emitida, o que nos leva à obtenção da constante de Planck.

$$\text{Energia do fóton} = eV_0 = hf \quad (78)$$

$$hf = eV_0$$

$$h \frac{c}{\lambda} = eV_0$$

$$h = \left( \frac{e \lambda}{c} \right) V_0 \quad (79)$$

Onde:

$h$  = Constante de Planck  
 $e$  = Carga elétrica elementar ( $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ )  
 $V_0$  = Energia fornecida pelo circuito = Potencial de corte  
 $\lambda$  = Comprimento de onda da luz emitida pelo LED  
 $c$  = Velocidade da luz no vácuo

## 2.1 LED vermelho

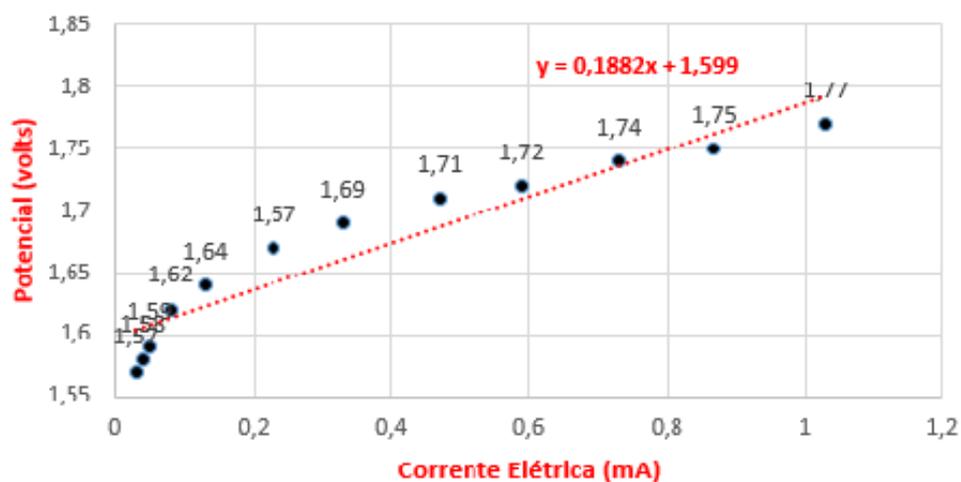
Tabelas 5 e 6 - Dados referentes ao LED vermelho

I(mA)	V <sub>0</sub> (volts)
0,03	1,57
0,04	1,58
0,05	1,59
0,08	1,62
0,13	1,64
0,23	1,67
0,33	1,69
0,47	1,71
0,59	1,72
0,73	1,74
0,87	1,75
1,03	1,77

I(mA)	V <sub>0</sub> (volts)
0,23	1,67
0,33	1,69
0,47	1,71
0,59	1,72
0,73	1,74
0,87	1,75
1,03	1,77

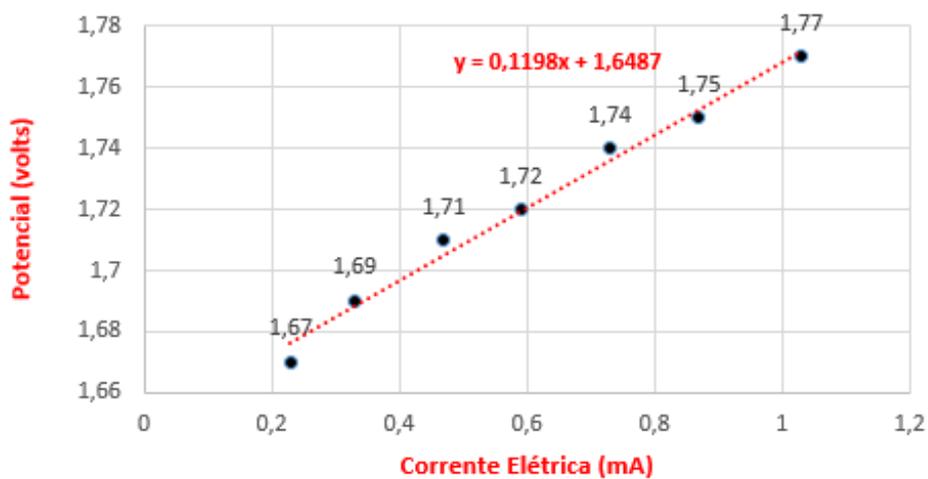
Fonte: O autor

Gráfico13 - Primeira tomada de dados do LED vermelho

**LED Vermelho 1**

Fonte: O autor

Gráfico 14 - Segunda tomada de dados do LED vermelho

**LED Vermelho 2**

Fonte: O autor

Figura 39 - Aparato experimental para o LED vermelho



Fonte: O autor

### Constante de Planck com dados somente do LED Vermelho

$$h = \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 1,6487 \times 635 \times 10^{-9}}{3,0 \times 10^8}$$

$$\boxed{h = 5,59 \times 10^{-34} \text{ Js}}$$

### Erro

$$e = \left( 1 - \frac{h_{\text{exper}}}{h_{\text{teórico}}} \right) \times 100\% \quad (80)$$

$$e = \left( 1 - \frac{5,59 \times 10^{-34}}{6,62 \times 10^{-34}} \right) \times 100\%$$

$$\boxed{e_{\text{vermelho}} = 15,55 \%}$$

## 2.2 LED Laranja

Tabelas 7 e 8 - Dados referentes ao LED laranja

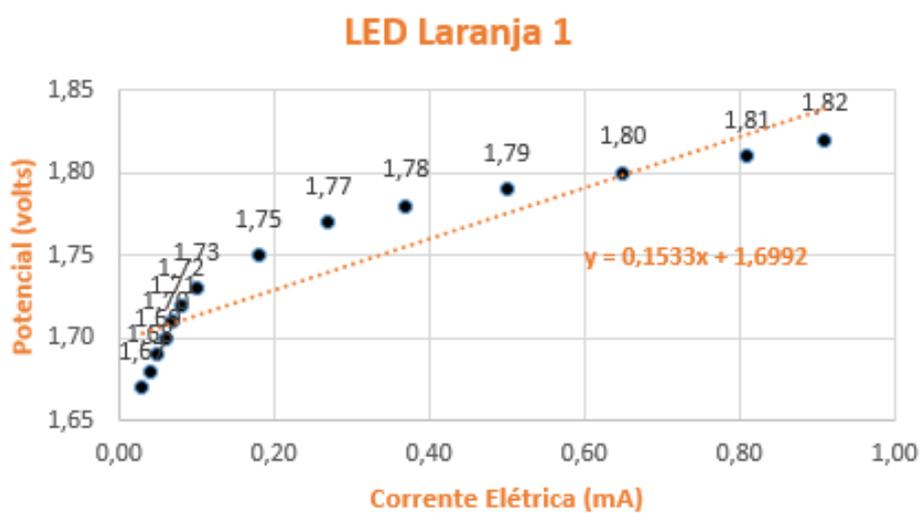
I(mA)	V <sub>e</sub> (volts)
0,03	1,67
0,04	1,68
0,05	1,69
0,06	1,70
0,07	1,71
0,08	1,72
0,10	1,73
0,18	1,75
0,27	1,77
0,37	1,78
0,50	1,79
0,65	1,80
0,81	1,81
0,91	1,82

I(mA)	V <sub>e</sub> (volts)
0,18	1,75
0,27	1,77
0,37	1,78
0,50	1,79
0,65	1,80
0,81	1,81
0,91	1,82

Fonte: O autor

Gráfico 15 - Primeira tomada de dados do LED laranja



Fonte: O autor

Gráfico 16 - Segunda tomada de dados do LED laranja

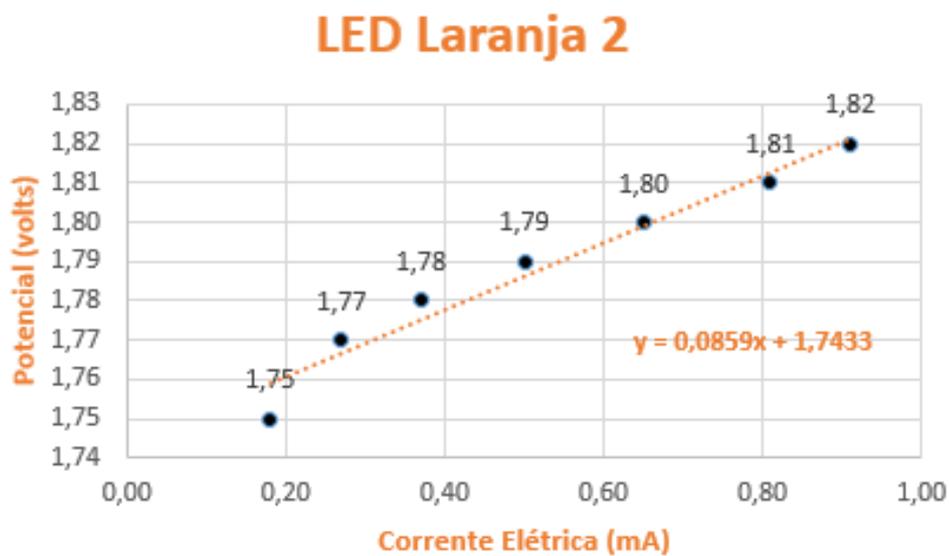


Figura 40 - Aparato experimental para o LED laranja



Fonte: O autor

### Constante de Planck com dados somente do LED Laranja

$$h = \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 1,7433 \times 605 \times 10^{-9}}{3,0 \times 10^8}$$

$$h = 5,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

### Erro

$$e = \left(1 - \frac{h_{\text{exper}}}{h_{\text{teórico}}}\right) \times 100\%$$

$$e = \left(1 - \frac{5,63 \times 10^{-34}}{6,62 \times 10^{-34}}\right) \times 100\%$$

$$e_{\text{laranja}} = 14,99 \%$$

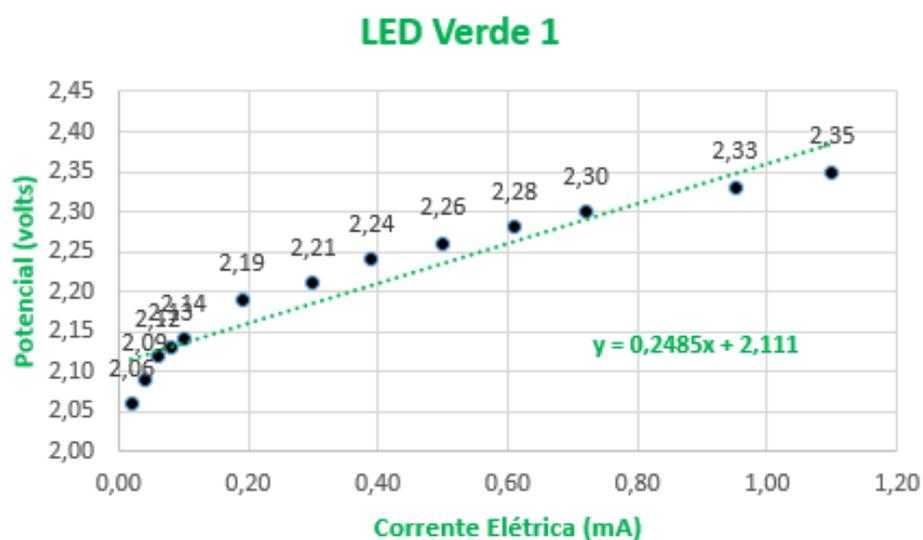
## 2.3 LED Verde

Tabelas 9 e 10 - Dados referentes ao LED verde

I(mA)	V <sub>o</sub> (volts)	I(mA)	V <sub>o</sub> (volts)
0,02	2,06	0,19	2,19
0,04	2,09	0,30	2,21
0,06	2,12	0,39	2,24
0,08	2,13	0,50	2,26
0,10	2,14	0,61	2,28
0,19	2,19	0,72	2,30
0,30	2,21	0,95	2,33
0,39	2,24	1,10	2,35
0,50	2,26		
0,61	2,28		
0,72	2,30		
0,95	2,33		
1,10	2,35		

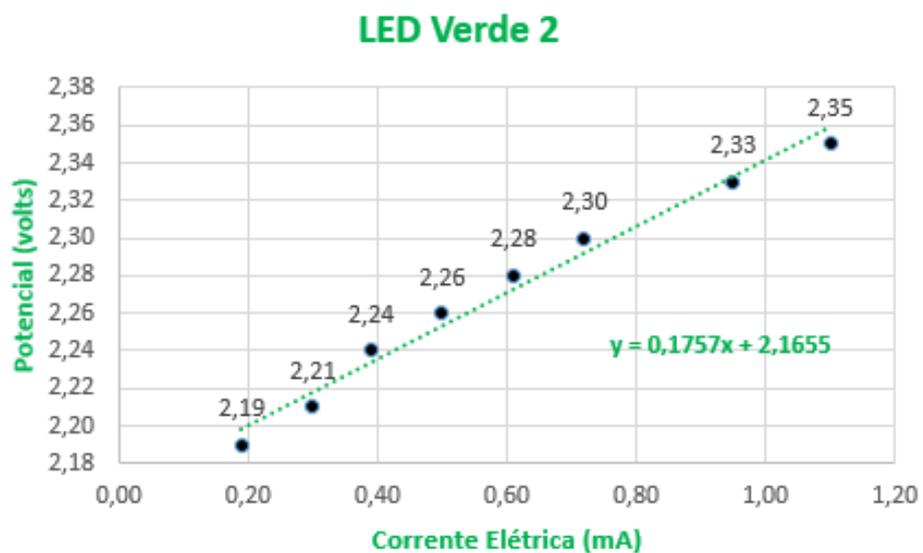
Fonte: O autor

Gráfico 17 - Primeira tomada de dados do LED verde



Fonte: O autor

Gráfico 18 - Primeira tomada de dados do LED verde



Fonte: O autor

Figura 41 - Aparato experimental para o LED verde



Fonte: O autor

### Constante de Planck com dados somente do LED Verde

$$h = \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 2,1655 \times 540 \times 10^{-9}}{3,0 \times 10^8}$$

$$\boxed{h = 6,24 \times 10^{-34} \text{ Js}}$$

### Erro

$$e = \left(1 - \frac{h_{\text{exper}}}{h_{\text{teórico}}}\right) \times 100\%$$

$$e = \left(1 - \frac{6,24 \times 10^{-34}}{6,62 \times 10^{-34}}\right) \times 100\%$$

$$\boxed{e_{\text{verde}} = 5,74 \%}$$

## 2.4 LED Azul

Tabelas 11 e 12 - Dados referentes ao LED azul

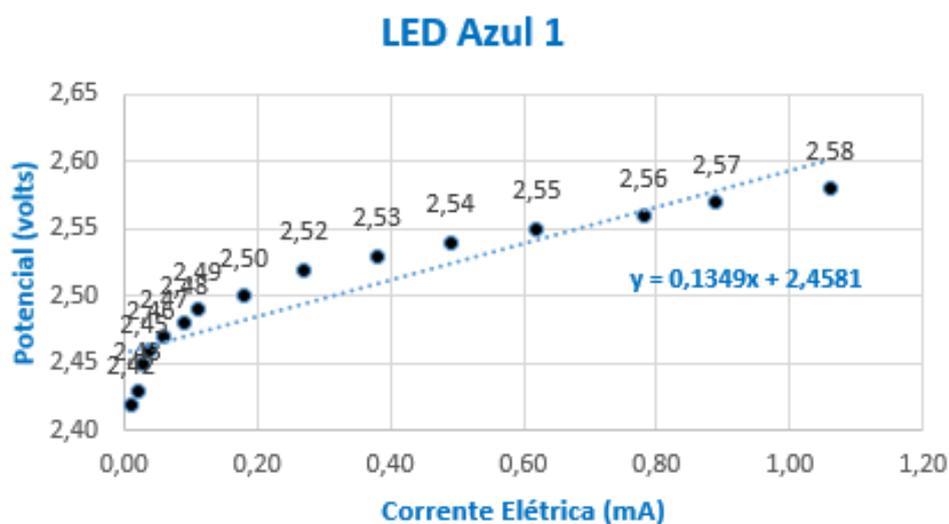
I(mA)	V <sub>o</sub> (volts)
0,01	2,42
0,02	2,43
0,03	2,45
0,04	2,46
0,06	2,47
0,09	2,48
0,11	2,49
0,18	2,50
0,27	2,52
0,38	2,53
0,49	2,54
0,62	2,55
0,78	2,56
0,89	2,57
1,06	2,58

I(mA)	V <sub>o</sub> (volts)
0,18	2,50
0,27	2,52
0,38	2,53
0,49	2,54
0,62	2,55
0,78	2,56
0,89	2,57
1,06	2,58

Fonte: O autor

Gráfico 19 - Primeira tomada de dados do LED azul



Fonte: O autor

Gráfico 20 - Segunda tomada de dados do LED azul

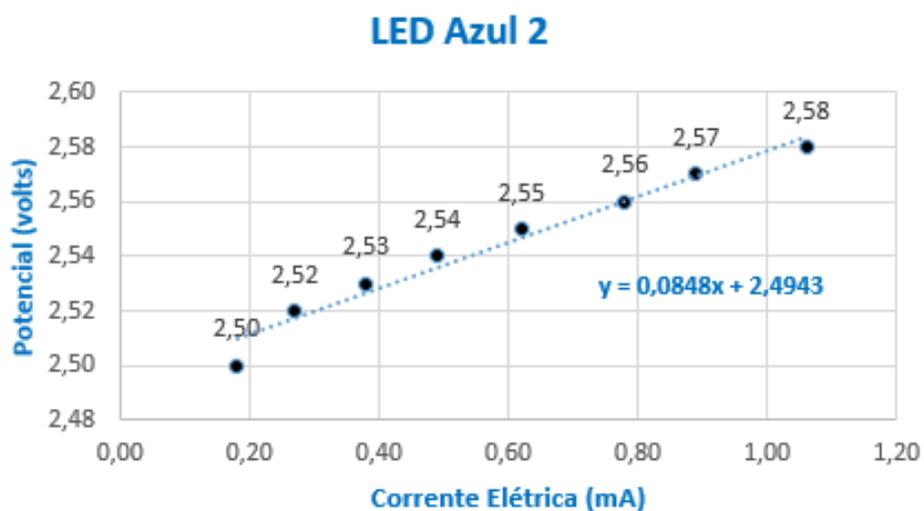


Figura 42 - Aparato experimental para o LED azul



Fonte: O autor

[Constante de Planck com dados somente do LED Azul](#)

$$h = \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 2,4943 \times 485 \times 10^{-9}}{3,0 \times 10^8}$$

$$\boxed{h = 6,46 \times 10^{-34} \text{ J.s}}$$

Erro

$$e = \left(1 - \frac{h_{\text{exper}}}{h_{\text{teórico}}}\right) \times 100\%$$

$$e = \left(1 - \frac{6,46 \times 10^{-34}}{6,62 \times 10^{-34}}\right) \times 100\%$$

$$\boxed{e_{\text{azul}} = 2,41\%}$$

Tabela 13 - Erros percentuais da constante de Planck

<b>LED</b>	<b><i>h</i></b>	<b>Erro (%)</b>
<i>Azul</i>	$6,46 \times 10^{-34} \text{ J.s}$	2,41
<i>Verde</i>	$6,24 \times 10^{-34} \text{ J.s}$	5,74
<i>Laranja</i>	$5,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$	14,99
<i>Vermelho</i>	$5,59 \times 10^{-34} \text{ J.s}$	15,55

Fonte: O autor

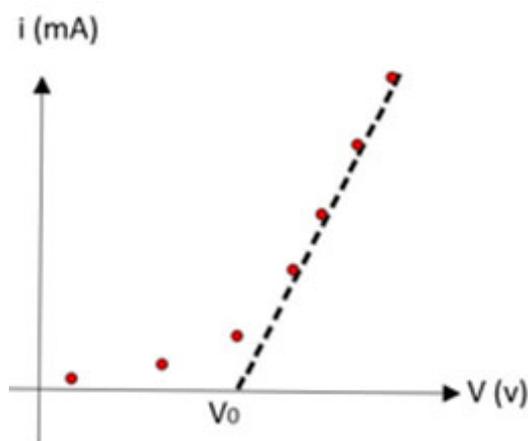
**2.5 CONSIDERAÇÕES FINAS SOBRE O EXPERIMENTO**

O tratamento dos dados experimentais foi submetido ao Excel. Pode ser verificado que quanto menor o comprimento de onda da luz emitida pelo LED, menor foi o erro obtido no experimento, sendo mais próximo o valor da constante de Planck experimental da cor azul, com o valor teórico.

O Potencial de corte de um LED é imprescindível para a obtenção da Constante de Planck, objeto deste trabalho. Assim, Para a obtenção do Potencial de corte de cada LED (cada cor), em uma primeira tentativa, foi utilizado o gráfico Intensidade de corrente elétrica versus Potencial elétrico. Assim, o Potencial de

corde para cada cor de LED foi obtido para uma intensidade de corrente tendendo a zero.

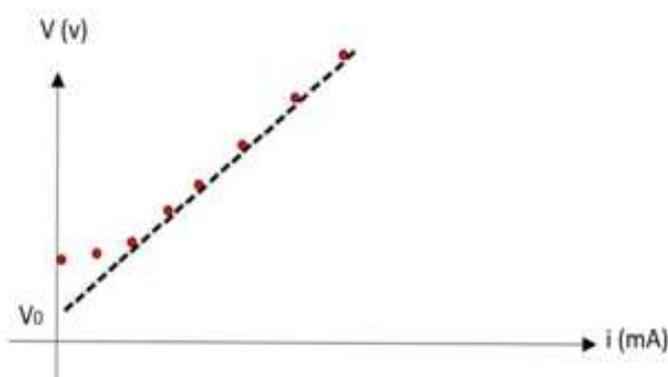
Gráfico 21 - Intensidade de corrente elétrica versus Potencial elétrico



Fonte: O autor

Porém, resultados melhores para o Potencial de corte para todas as cores de LED, foram obtidos quando utilizamos o diagrama Potencial versus Intensidade de corrente elétrica, proporcionando erros menores em todas as cores. O Potencial de corte de cada cor (LED) equivalia ao coeficiente linear da função que surgia a partir dos dados, fornecida pelo próprio Excel.

Gráfico 22 - Potencial elétrico versus intensidade de corrente



Fonte : O autor

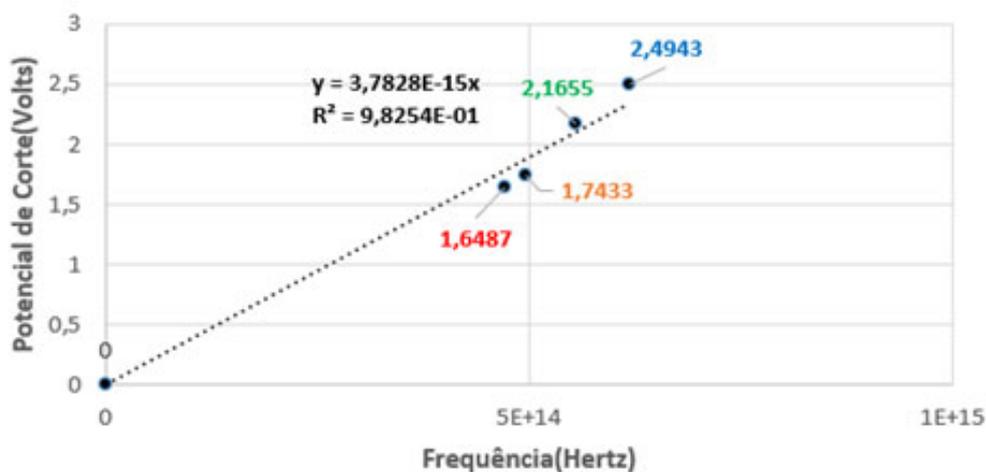
Posteriormente obtivemos o gráfico Potencial de corte versus frequência para os quatro LEDs utilizados neste experimento.

Tabela 4 - Potencial de corte em função da frequência

$\lambda$ (nanômetros) $\times 10^{-9}$	$f$ ( $\times 10^{14}$ hz)	$V_0$ (volt)
0	0	0
635 - vermelho	4,72441	1,6487
605 - laranja	4,95868	1,7433
540 - verde	5,55556	2,1655
485 - azul	6,18557	2,4943

Fonte : O autor

Gráfico 23 - Potencial de corte em função da frequência



Fonte: O autor

Retomando a equação (78):

$$hf = eV_0$$

$$V_0 = \frac{h}{e} f \quad (81)$$

Que é uma equação de 1º grau:  $y = ax + b$ . (82)

Podemos verificar que  $b$  é o coeficiente linear, que vale zero e  $a$  é o coeficiente angular que vale  $\frac{h}{e}$ . Assim:  $tg\theta = \frac{h}{e}$  ou:

$$h = e tg\theta. \quad (83)$$

$$h = 1,6 \times 10^{-19} \times 3,7828 \times 10^{-15}$$

$$\boxed{h = 6,048 \times 10^{-34} \text{ J.s}}$$

Erro

$$e = \left(1 - \frac{h_{\text{exper}}}{h_{\text{teórico}}}\right) \times 100\%$$

$$e = \left(1 - \frac{6,048 \times 10^{-34}}{6,62 \times 10^{-34}}\right) \times 100\%$$

$$\boxed{e = 8,64 \%}$$

Diante dos resultados obtidos com LEDs de algumas frequências, sugerimos para turmas de Ensino Médio, a utilização de LED azul com seu diagrama Potencial elétrico versus Intensidade de corrente elétrica, para a obtenção experimental da constante de Planck, pela maior acurácia em face do erro experimental de apenas 2,41%.

Cabe lembrar também o cuidado que devemos ter na utilização do aplicativo Spectrometer em sua versão gratuita, para a obtenção do comprimento de onda ou frequência da luz emitida pelo LED com a maior precisão possível. O próprio aplicativo tece as orientações a serem seguidas durante as medições.

Figura 43 - Aplicativo para obtenção do comprimento de onda



Fonte: O autor

Ressaltemos também a necessidade de um potenciômetro no circuito, isto porque o LED funciona com baixos valores de tensão elétrica que variam segundo Zanatta (2013) entre 1,2V e 4,0V. Apesar de utilizarmos uma fonte de apenas 3V, o potenciômetro tem a incumbência de variar sua resistência elétrica, variando a diferença de potencial elétrico entre os terminais do LED de maneira conveniente.

Neste experimento usamos um reostato (potenciômetro) capaz de variar sua resistência elétrica em  $50.000 \Omega$ .

### 3. ROTEIRO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Objetivos:

Calcular a Constante de Planck utilizando materiais de baixo custo existentes em um laboratório didático de Física de um Estabelecimento de Educação que promova o Ensino Médio e o aplicativo Spectrometer, em sua versão gratuita.

#### 3.2 Materiais:

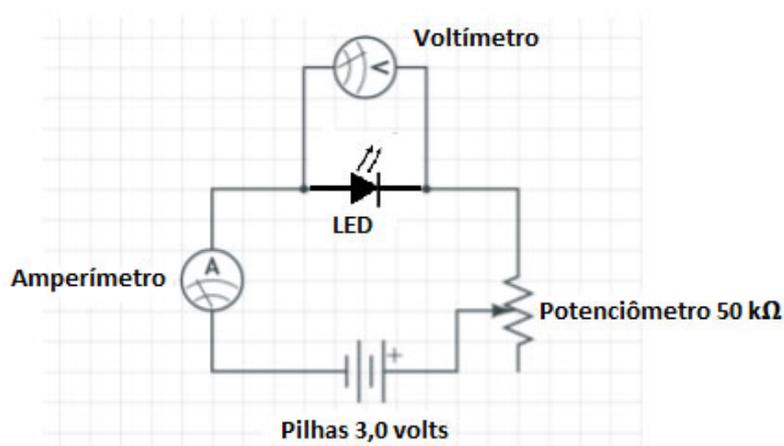
- ✓ 2 multímetros;
- ✓ 1 potenciômetro de  $50 \text{ k}\Omega$ ;
- ✓ 4 LEDs nas cores Vermelho, Laranja, Verde e Azul;
- ✓ 1 telefone celular com o aplicativo Spectrometer;
- ✓ 2 pilhas AA de 1,5 volts cada;
- ✓ Suporte para 2 pilhas AA;
- ✓ Fios conectores;
- ✓ Folha de papel A4 branca;

#### 3.3 Montagem:

Conecte as pilhas no suporte, ligando o fio vermelho (positivo) à perna maior do LED. Na mesma perna, conectar a um multímetro, em paralelo, calibrado em 20 volts, servindo como voltímetro. Conectar o fio preto de saída do multímetro (negativo) na menor perna do LED. Com um outro fio, conectar a menor perna do LED ao terminal do meio do potenciômetro de  $50 \text{ k}\Omega$ . Conectar um fio vermelho do terminal esquerdo do potenciômetro ao segundo multímetro, calibrado em 20

miliAmperes, servindo de amperímetro. Conectar a saída do multímetro ao fio preto (negativo) do suporte das pilhas. Este circuito está mostrado no desenho abaixo:

Figura 44 - Esquema do Circuito Elétrico



Fonte: O autor

### 3.4 Medida do Comprimento de Onda do LED:

Com todo o circuito montado e os multímetros (Volímetro e amperímetro) ligados, abrir o aplicativo Spectrometer em seu telefone celular. Iluminar com o LED a folha de papel A4 branca. Mirar a câmera do telefone celular na folha de papel e anotar a medida do comprimento de onda dado pelo aplicativo. Fazer essa medida com os 4 LEDs e anotar na tabela abaixo:

Cor	Vermelho	Laranja	Verde	Azul
Comprimento de Onda ( $\lambda$ ): (nanômetros)				

### 3.5 Calculando as frequências das ondas:

Com base em seus conhecimentos de Física, calcule as frequências de cada cor de LED: (Utilize  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s)

Frequências (em THz - $\times 10^{12}$ Hz)			
Vermelho	Laranja	Verde	Azul

### 3.6 Tomando as medidas:

Coloque o potenciômetro de forma que indique o maior valor tanto no voltímetro quanto no amperímetro. Agora, gire o potenciômetro para obter diferentes valores de corrente elétrica e de diferença de potencial, e anote na tabela abaixo:

I (amperes)	V (volts)

### 3.7 Traçando os gráficos utilizando o Excel da Microsoft:

Coloque os dados da tabela acima em uma planilha do Excel. Selecione todos os dados e, na aba INSERIR, selecione o gráfico no modelo “DISPERSÃO”.

Após aparecer o gráfico, clique com o botão direito em cima de um ponto qualquer do mesmo, e selecione linha de tendência. Na caixa de opções que será aberta, selecione as opções “Linear”, “Exibir Equação no gráfico” e “Exibir valor de R-quadrado no gráfico”.

Agora, a equação do gráfico será exibida como uma função do primeiro grau, na forma:

$$f(x) = ax + b$$

### 3.8 Calculando a Constante de Planck:

Sabendo que o valor de “b”, da equação do gráfico fornecida pelo Excel, é o Potencial de Corte, e utilizando a relação:

$$h = \left( \frac{e \lambda}{c} \right) V_0$$

Onde:

$$\begin{aligned}
 h &= \text{Constante de Planck} \\
 e &= \text{Carga elétrica elementar } (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) \\
 V_0 &= \text{Energia fornecida pelo circuito} = \text{Potencial de corte} \\
 \lambda &= \text{Comprimento de onda da luz emitida pelo LED} \\
 c &= \text{Velocidade da luz no vácuo}
 \end{aligned}$$

### 3.9 Erro experimental:

$$e = \left( 1 - \frac{h_{\text{exper}}}{h_{\text{teórico}}} \right) \times 100\%$$

$$\begin{aligned}
 h_{\text{exper}} &= \text{Constante de Planck experimental} \\
 h_{\text{teórico}} &= \text{Constante de Planck teórico} = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s}
 \end{aligned}$$

Encontrando a Constante de Planck  $h$  e erro experimental para cada cor de LED:

<b>LED</b>	<b><math>h</math></b>	<b>Erro (%)</b>
<b>Vermelho</b>		
<b>Laranja</b>		
<b>Verde</b>		
<b>Azul</b>		

### 3.10 Montando o gráfico Potencial de Corte em função da Frequência, utilizando o Excel da Microsoft:

$\lambda$ (nanômetros) $\times 10^{-9}$	$f$ ( $\times 10^{14}$ hz)	$V_0$ (volt)

$$hf = eV_0$$

$$V_0 = \frac{h}{e} f$$

$$y = ax + b$$

Podemos verificar que  $b$  é o coeficiente linear, que vale zero e  $a$  é o coeficiente angular que vale  $\frac{h}{e}$ . Assim:  $tg \theta = \frac{h}{e}$  ou  $h = e tg \theta$ .

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em nosso mundo de dimensões visíveis, uma visão clássica da ciência foi ao longo do tempo, sedimentada com previsões concretas, fruto de observações lógicas, que incutiram um pensamento determinista nos pensadores e produtores de ciência com regras simples e seguras.

Porém, se penetrarmos em um universo de escalas subatômicas da estrutura da matéria, as certezas desaparecem e a realidade desafia o senso comum. Estamos no fascinante mundo da Mecânica Quântica, onde a cada descoberta deste probabilístico e pequeno mundo, surgem fantásticas aplicações.

Em face da importância e dimensão do tema deste trabalho sob o título Prelúdio do Quantum: As Cinco Rachaduras na Física Clássica que levaram à Teoria Quântica; este professor-pesquisador segmentou este Produto Educacional em três partes. A primeira parte sob a forma de *e-book* foi destinada ao professor-leitor, descrevendo de maneira qualitativa e quantitativa o supracitado tema. Na segunda parte foi proposta uma sequência didática voltada para alunos do Ensino

Médio com links das oito aulas desenvolvidas por este professor-pesquisador, além de links de tutorias das mesmas aulas, para o professor-leitor. Na terceira parte reservamos uma sintética teoria de semicondutores e uma prática experimental em laboratório didático de Física, quando foi calculada a constante de Planck utilizando-se LEDs e um aplicativo de telefone celular.

Este trabalho se ancorou em uma região fronteira entre duas correntes filosóficas: o cognitivismo e o humanismo, capitaneados por Ausubel, Novak, Freire e Moreira. Na percepção deste professor-pesquisador, o tema desenvolvido coadunou perfeitamente com a teoria da Aprendizagem Significativa e também pode configurar-se em uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) proposta por Moreira (2011). Este potencial se converteu em sucesso, o que pode ser comprovado com os altíssimos percentuais de acertos em avaliações posteriores às aulas, conforme tabelas anexadas a este trabalho.

O conteúdo de Física apresentado neste trabalho estava inserido em uma atmosfera em que a Filosofia e a História da Ciência eram componentes, pois sabemos do potencial destes conhecimentos em atrair até os mais indiferentes. Tornam a aula mais sedutora, mais alcançável, pulverizando o medo da equação mais complexa. Diminuem a frieza dos modelos matemáticos e aproximam o incauto aluno das grandezas físicas do cotidiano, antes obscuras ou invisíveis.

Por fim, desejamos que este Produto Educacional, concebido com muito esforço e carinho, seja um significativo incremento educacional na compreensão do tópico Mecânica Quântica, nesta nobre e difícil tarefa de ensinar Física no Ensino Médio.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALARCÃO, I. **Escola reflexiva e nova racionalidade**. Porto Alegre: Artmed, 2001.

ANGELO, M. S. **George Gamow: O Universo Primordial**. 2016. Disponível em: <http://lilith.fisica.ufmg.br/~dsoares/ensino/1-07/mateus-gamow.htm>. Acesso em: 16 set. 2023.

ARTHURY, L. H. M. Avaliação de dois Documentários sobre Física Quântica e seu Possível uso no Ensino Médio. **Revista do Professor de Física**, v. 7, n. 1, p. 1-19, Brasília, 2023.

ÁTOMO de Bohr: Níveis de Energia. Produzido por Jorge Sá Martins. [s.l. s.n.], 5 mar. 2014. 1 vídeo (14 min). Publicado no Canal: FísicaModernaUFF. Disponível em: [https://youtu.be/Kc3\\_GZJiV4?si=yWwAi6NTP7CJp2hm](https://youtu.be/Kc3_GZJiV4?si=yWwAi6NTP7CJp2hm). Acesso em: 18 out. 2023.

AURANI, K. M.; As idéias iniciais de Clausius sobre entropia e suas possíveis contribuições à formação de professores. **Revista Brasileira de História de Ciências**, v. 11, n.1, p 155-163, 2018.

AUSUBEL, D. P. **Algunos aspectos psicológicos de La estructura del conocimiento**. Buenos Aires: El Ateneo, 1973.

AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J.; HANESIAN, H. **Psicologia Educacional**. Rio de Janeiro: Editora Interamericana, 1980.

BASSALO, J. M. F. **Curiosidades da Física. Aspectos Curiosos do Trabalho Científico entre Gamow e Bohr**. 2019. Disponível em: <https://seara.ufc.br/wp-content/uploads/2019/03/folclore472.pdf>. Acesso em 16 set. 2023.

BAYER, A.; NUNES, C. S.; MANASSI, N. P. Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) para o Ensino de Estatística na Educação Básica. **XIV CIAEM-IACME**, Chiapas, México, 2015.

BLACK Body Radiation - Understanding the black body spectra using classical and quantum physics. Produzido por Edouard Reny. [s.l.;s.n.], 7 mar.2021. 1 vídeo (10 min) Publicado no canal: Physics Made Easy. Disponível em: <https://youtu.be/ugsvADj1wts?si=2pxtBFVlhZAXuLaR>. Acesso em: 4 maio 2023.

BLACKBODY Radiation: The Laws of Stefan, Wien and Planck. Produzido por Pierre-Marie Robitaille. [s.l.;s.n.], 8 ago. 2017. 1 vídeo (8 min) Publicado pelo Canal: Sky Scholar. Disponível em: <https://youtu.be/h5jOAw57OXM?si=mOjHelitVulvKOE>. Acesso em: 6 maio 2023.

BORBA, M.C; ALMEIDA, H. R. F. L; GRACIAS, T. A. S. **Pesquisa em ensino e sala de aula: Diferentes vozes em uma investigação.** 2ª Ed. Belo Horizonte: Autêntica Editora, 2020.

BOYA, L. J.; The Thermal Radiaton Formula of Planck arXiv:physics/0402064 [physics.hist-ph] **Rev. Academia de Ciencias**, Zaragoza. 58 (2003) 91-114.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria dos Circuitos** 11ª Ed. São Paulo: Pearson Educations do Brasil, 2013.

BRAGA, J. P. O colapso da eqüipartição da energia. **Química Nova**, v. 24, n. 5, p. 693-699, 2001.

CACAIS, F. A. L; LOAYZA, V. M. **Cadernos de Metrologia – Especial SI/2019** Adoção Mundial da Redefinição do Quilograma em 2019. Disponível em :<http://www.inmetro.gov.br/imprensa/releases/cadernos-de-metrologia.pdf>. Acesso em 10 out. 2023.

**Cadernos de Metrologia – Especial SI/2019.** Disponível em :<http://www.inmetro.gov.br/imprensa/releases/cadernos-de-metrologia.pdf>. Acesso em 10 out. 2023.

CAVALCANTI, P. J. M. **Fundamentos de eletrotécnica.** 22ª Ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos Editora, 2012.

CHIBENI, S.S. **O surgimento da Física Quântica.** Disponível em: <https://www.unicamp.br/~chibeni/textosdidaticos/fisquantica.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.

COELHO, H. T.; FERREIRA, R.; *Annus Mirabilis* de Einstein: artigos que revolucionaram a Física. **Gazeta de Matemática**, n. 150, p. 29-39, 2006.

COMO FUNCIONA um LED. Produzido por Kellen Skol. [s.l. s.n.], 5 jan. de 2021. 1 vídeo (11 min) Publicado no canal: Skola de Física. Disponível em: <https://youtu.be/aIZLyWTik4w?si=bej27FcKtHKPktml>. Acesso em: 9 dez. 2023.

**Conferência Geral de Pesos e Medidas – CGPM, 2023.** Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/metrologia-cientifica/foruns-comites-e-redes/cgpm>. Acesso em 14 set 2023.

CONNOR, N. **O que é a teoria do decaimento alfa – tunelamento quântico – definição.** Disponível em: <https://www.radiation-dosimetry.org/pt-br/o-que-e-a-teoria-do-decaimento-alfa-tunelamento-quantico-definicao>. Acesso em 14 set. 2023.

**Constantes fundamentais da Física.** Disponível em <https://www.blogs.unicamp.br/universofisico/2009/01/02/estudo-esclarece-constantas-fundamentais-da-fisica>. Acesso em: 17 maio 2023.

CORRÊA, C. Modelo atômico de Rutherford. **Revista de Ciência Elementar**, v.2, n. 2, Porto, 2014.

DAHMEN, S. R. R.; Ludwig Boltzmann: vida e obra. **Gazeta de Física**, v. 30, fascículo 2, p. 16-22, 2007.

DE PLANCK a Rayleigh-Jeans- Catástrofe do Ultravioleta. Produzido por Virgílio P. Siqueira. [s.l.;s.n.], 20 jan. 2022. 1 vídeo (9 min) Publicado no canal: ABF AstroBioFísica. Disponível em: <https://youtu.be/3l3XildxaTc>. Acesso em: 30 dez. 2022.

DE PLANCK a Wien. Produzido por Virgílio P. Siqueira. [s.l. s.n.], 21 jan.2022. 1 vídeo (23 min) Publicado no canal: ABF AstroBioFísica. Disponível em: <https://youtu.be/01oaLNCLVEc> . Acesso em: 30 dez. 2022.

DUFF, M. J.; OKUN, L. B.; VENEZIANO, G. **Trílogo sobre o número de constantes fundamentais**, 2002. Disponível em <https://doi.org/10.48550/arXiv.physics/0110060>. Acesso em 12 maio 2023.

EFEITO Fotoelétrico: Postulados de Einstein. Produzido por Jorge Sá Martins. [s.l.;s.n.], 9 ago. 2011. 1 vídeo (13 min). Publicado no Canal: FísicaModernaUFF. Disponível em: [https://youtu.be/gYTUfq5\\_z7M?si=BwIzIAF8APcJVyV7](https://youtu.be/gYTUfq5_z7M?si=BwIzIAF8APcJVyV7). Acesso em: 25 ago. 2023.

EINSTEIN, A. A. A teoria da radiação de Planck e a teoria do calor específico, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.27, n.1, p. 63-67, 2005.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 29. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1979.

ESPECTROS Atômicos e Fórmula de Balmer-Rydberg. Produzido por Jorge Sá Martins. [s.l. s.n.], 23 mai. 2011. 1 vídeo (15 min). Publicado no Canal: FísicaModernaUFF. Disponível em: [https://youtu.be/lrZrVappmUs?si=XN9na4\\_eeRuoMJ\\_q](https://youtu.be/lrZrVappmUs?si=XN9na4_eeRuoMJ_q). Acesso em: 18 out. 2023.

FAYNGOLD, M; FAYNGOLD V. **Quantum Mechanics and Quantum Information - The Failure of Classical Physics**. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.

FELDENS, B.; DIAS, P. M. C.; SANTOS, W. M. S. E assim se fez o quantum. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 2, p. 1-11, 2010.

FEYNMAN, R. P; LEIGHTON, R.B; SANDS, M. **Lições de física de Feynman**, vol 2 p.430, Porto Alegre : Bookman, 2008.

**Física Moderna IF-UFRGS**. O Ano Miraculoso de Albert Einstein. Disponível em: [https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m\\_s03.html](https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m_s03.html). Acesso em 30 abr. 2023.

FREIRE, P. Pedagogia da autonomia – saberes necessários à prática educativa. 1ª ed. São Paulo: Editora Paz e Terra, 1996.

FREIRE, P. Pedagogia do Oprimido. 12ª ed. São Paulo: Editora Paz e Terra, 1983.

FUNÇÃO Trabalho. Produzido por Jorge Sá Martins. [s.l. s.n.], 9 ago. 2011. 1 vídeo (8 min). Publicado no Canal: FísicaModernaUFF. Disponível em: <https://youtu.be/n-jOh0Qr2tQ?si=IsQL80Z7DrYiPcrF>. Acesso em: 25 ago. 2023.

GEIGER, H; MARSDEN, E. On a Diffuse Reflection of the  $\alpha$ -Particles. **The Royal Society**, vol. 82, n. 557, p. 495-500, 1909.

GERHARD, T.E; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C.; **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7ª Ed. Barueri: Atlas, 2023.

GILLIES, G. T. The Newtonian gravitational constant: recent measurements and related studies. Reports on Progress in Physics - **IOP Publishing**, 1996. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/60/2/001/pdf>. Acesso em: 14 dez. 2023.

GONTIJO, L. A.; RODRIGUES, C. G.; Radiação Térmica e a fórmula de Planck. **Química Nova**, v. 45, n. 10, p.1303-1314, 2022. <https://youtu.be/ueqVVa4iA24>. Acesso em: 22 abr. 2023.

GONZALEZ, J. P. D. Datas e personagens na História da Espectroscopia. **Universidade de São Paulo Instituto de Física de São Carlos – IFSC**, 2013. Disponível em: <https://www.ifsc.usp.br/~donoso/espectroscopia/Historia.pdf>. Acesso em: 16 jan 2024.

GRIFFITHS, D. J. **Mecânica Quântica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

GUPTA, S.V. **Units of Measurement- History, Fundamentals and Redefining the SI Base Units** 2ª Ed. New Delhi: Springer, 2020.

HARPER, E. Getting a Bang Out of Gamow. **GW Magazine**, p. 14, 2000.

HASTENREITER, R. S. C. *et al.* Discussões a respeito da natureza da ciência em atividades experimentais – A “materialidade” das linhas de campo elétrico e das superfícies equipotenciais. **Enseñanza de las ciencias**, nº extraordinário, p. 1197-1202, 2017.

HENTSCHEL, K; GREENBERGER, D; WEINERT, F. **Compendium of Quantum Physics: Concepts, Experiments, History and Philosophy**. 1ª Ed. Berlin, 2009.

HODSON, H. Experiments in science and science teaching. **Educational Philosophy and Theory**, v. 20, p.53-66, 1988.

HOW the 3rd Law of Thermodynamics Made Einstein Famous. Produzido por Kathy Joseph. [s.l. s.n.], 10 jul. 2019. 1 vídeo (18 min). Publicado no Canal: Kathy LovesPhysics&History. Disponível em: <https://youtu.be/ueqVVa4iA24?si=B0C01ZgB53ibMWDk>. Acesso em: 3 mai. 2023.

JUNIOR, O. P. **Outros caminhos relacionados com a Física Quântica**, 2021. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7683302/mod\\_resource/content/1/HFQ-03.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7683302/mod_resource/content/1/HFQ-03.pdf). Acesso em 25 out. 2023.

KERR, A. S. **Espalhamento de Luz na Atmosfera**, 2006. Disponível em: [http://www.fap.if.usp.br/~akerr/texto\\_luz.pdf](http://www.fap.if.usp.br/~akerr/texto_luz.pdf). Acesso em: 22 out. 2023.

KRUGER, C. G.; MELLER, J. K. *et al.* Anarquismo Metodológico de Paul Feyerabend: abordagens na Ciência. **Revista Thema**, v. 15 n. 2 p. 539-552, 2018.

LANDIM, R. P; CARVALHO, H. R. **Cadernos de Metrologia – Especial SI/2019**. O Novo SI e Seu Impacto na Metrologia Elétrica no Brasil. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/imprensa/releases/cadernos-de-metrologia.pdf>. Acesso em 10 out. 2023.

LANDSMAN, K. **Foundations of Quantum Theory**– From Classical Concepts to Operator Algebras 1ª Ed. Cham: Springer, 2017.

LEDERMAN, N. G. **Concepções de alunos e professores sobre a natureza da ciência: uma revisão da pesquisa**, 1992. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tea.3660290404>

LEI DE DULONG-Petit e a equação de Einstein para as capacidades caloríficas. Produzido por Thiago. [s.l. s.n.], 27 mar. 2020. 1 vídeo (16 min). Publicado no Canal: Professor Thiago. Disponível em: <https://youtu.be/tIcMN0n2C5Y?si=cIRI5yJtlfHLzud>. Acesso em: 3 out. 0223.

LOPES, C. V. M.; MARTINS, R. A. **Uma lacuna na história dos modelos atômicos em livros didáticos: John William Nicholson e a astroquímica**, 2007. Disponível em: <https://fep.if.usp.br/~profis/arquivos/vienpec/CR2/p951.pdf>. Acesso em 13 jan 2024.

LOPES, C. V. M; MARTINS, R. A. Hans Geiger e Ernest Marsden em Manchester (1909-1910): 100 anos dos “experimentos de Rutherford” com partículas  $\alpha$ . **Sociedade Brasileira de Química**, 2010. Disponível em: <http://sec.s bq.org.br/cdrom/33ra/resumos/T1680-1.pdf>. Acesso em: 13 set. 2023.

LORENZ, K.; MARQUES, J. G.; MONTEIRO, T. Diodos emissores de luz e iluminação. **Gazeta de Física. Sociedade Portuguesa de Física**, v. 39, n. 1 e 2, p.50-54, 2016.

LOVEJOV. B. Quinze fatos curiosos na História da Radiação. **Revista Despertar Científico** - Democratizando a Ciência, 2020. Disponível em: <https://revistadespertarcientifico.wordpress.com/2020/07/13/15-fatos-curiosos-na-historia-da-radiacao/>. Acesso em 24 jan. 2024.

MARTINS, R. A. A descoberta dos raios X: O primeiro comunicado de Rontgen. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 20, n.4, 1998.

MARTINS, R. A. Como Becquerel não descobriu a radioatividade. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. v. 7, p.27-45, 1990.

MATTHEWS, M. R. "História, filosofia e ensino de ciências: a abordagem atual." **Revista de Pesquisa e Experiências de Ensino**, 1994, v.12, n.2, pp. 255-277.

MAX Planck Biography with Depth and Humor. Produzido por Kathy Joseph. [s.l. s.n.], 7 mar. 2020. 1 vídeo (17 min). Publicado no Canal: Kathy LovesPhysics&History. Disponível em: <https://youtu.be/9hzw622nMIs?si=pLiyaX6TV2KxMoO4>. Acesso em: 30 abr. 2023.

MAX Planck Quantum Theory. Produzido por Kathy Joseph. [s.l. s.n.], 21 fev. 2019. 1 vídeo (12 min). Publicado no Canal: Kathy LovesPhysics&History. Disponível em: [https://youtu.be/uMUi3o78qgQ?si=\\_eb56akBdcsvvy32](https://youtu.be/uMUi3o78qgQ?si=_eb56akBdcsvvy32) Acesso em: 30 abr. 2023.

MILYUKOV, V. Newtonian Gravitation Constant: History of Measurement and New Results. **International Conference on Precision Physics and Fundamental Physical Constants**, 2019. Disponível em: [https://indico.cern.ch/event/643043/contributions/3437463/attachments/1862313/3061059/Milyukov\\_FFK-2019.pdf](https://indico.cern.ch/event/643043/contributions/3437463/attachments/1862313/3061059/Milyukov_FFK-2019.pdf). Acesso em: 14 dez. 2023.

MODELO de Bohr para Espectros Atômicos. Produzido por Jorge Sá Martins. [s.l. s.n.], 7 jun 2011. 1 vídeo (8 min). Publicado no Canal: FísicaModernaUFF. Disponível em: [https://youtu.be/20drXpikjFA?si=iuh3e1NBKcQP\\_H7G](https://youtu.be/20drXpikjFA?si=iuh3e1NBKcQP_H7G). Acesso em: 18 out 2023.

MOREIRA, I. C. 1905: Um ano miraculoso, **Revista Ciência Hoje**, 2005. Disponível em: <https://cienciahoje.org.br/artigo/1905-um-ano-miraculoso/>. Acesso em 8 jun 2023.

MOREIRA, M. A.; MANSINI, E. F. S. Aprendizagem Significativa: a teoria de David Ausubel. 2. Ed. São Paulo: Centauro, 2006.

MOREIRA, M. A. **Teorias de Aprendizagem**. 2ª Ed ampl., São Paulo: EPU. 2019.

MOREIRA, M. A. Unidades de ensino potencialmente significativas - UEPS.

Aprendizagem Significativa em Revista, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 43-63, 2011. Disponível em: [http://www.if.ufrgs.br/asr/artigos/Artigo\\_ID10/v1\\_n2\\_a2011.pdf](http://www.if.ufrgs.br/asr/artigos/Artigo_ID10/v1_n2_a2011.pdf). Acesso em: 25 maio 2022.

MOREIRA, M. A. Partículas e Interações. **Física na Escola**, v. 5, n. 2, 2004.

MORRIS, M. **Uma Breve História do Infinito**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed, 1997.

MORTIMER, E. F. **Construtivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: Para onde vamos?** 1995. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/public/ensino/N1/2artigo.htm>. Acesso em 18 mar 2024.

MOURA, B. A. O que é natureza da Ciência e qual sua relação com a História e Filosofia da Ciência? **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 7, n. 1, p.32-46, 2014.

MUKUNDA, N. Max Planck – Founder of Quantum Theory. **Resonance**, p. 103-105, feb. 2008.

NAHAS, A. R. **Biologia Quântica**. Joinville: Clube de Autores, 2022.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: Ótica, Relatividade, Física Quântica**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1998.

O MILENAR caminho da luz - Da Luz ao Fóton, do Fóton à Mecânica Quântica. Produzido por José Abdalla Helayël-Neto. [s.l. s.n.], 24 out. 2021. 1 vídeo (81 min). Publicado no Canal: Professor Global. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=eT8gJBG\\_sK0&list=PL117KmmwT24ifF6qV2enxZh9leEyH3rwY&index=5](https://www.youtube.com/watch?v=eT8gJBG_sK0&list=PL117KmmwT24ifF6qV2enxZh9leEyH3rwY&index=5). Acesso em: 30 dez. 2022.

**O novo Sistema Internacional de Unidades**.SBM e SBF, 2019.Disponível em: [https://metrologia.org.br/wpsite/wpcontent/uploads/2019/07/Cartilha\\_O\\_novo\\_SI\\_29.06.2029.pdf](https://metrologia.org.br/wpsite/wpcontent/uploads/2019/07/Cartilha_O_novo_SI_29.06.2029.pdf) Acesso em 17 abr. 2023.

O Sistema Internacional de Unidades – Tradução Luso-Brasileira da 9ª Edição. **Inmetro e IPQ**, 2021. Disponível em: [https://www.gov.br/inmetro/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos-tecnicos-em-metrologia/si\\_versao\\_final.pdf](https://www.gov.br/inmetro/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos-tecnicos-em-metrologia/si_versao_final.pdf). Acesso em: 25 jan 2024.

O'MARA, M. **The code** – Silicon Valey and the Remaking of America. New York: Penguin Press, 2019.

OLIVEIRA, U. L. Abordagem da radioatividade nos livros didáticos de Química do PNLD 2015-2018, Campina Grande, 2019. Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática, UEPB.

OUDET, X. The Black Body and the Dulong and Petit Law, **Annales de la Fondation Louis de Broglie**, V. 30, no 1, 2005 P.97-107, 2005.

PARKHOMENKO, A.; SOBICZEWSKI, A. **Phenomenological formula for alpha-decay half-lives of heaviest nuclei**. Acta physica polonica B, v. 36, p. 3095, 2005.

PEREZ. S. **Mecânica Quântica**: Um curso para professores da Educação Básica. São Paulo: Editora Livraria de Física, 2016.

PERUZZO, J. **Experimentos de física básica: Eletromagnetismo, Física moderna e Ciências espaciais**. São Paulo: LF Editorial, 2013.

PIEDADE, M. **Raios catódicos**-Museu Faraday, 2023. Disponível em <https://museufaraday.ist.utl.pt/HistTechnology/Raios%20Cat%C3%B3dicos.pdf>. Acesso em 24 jan 2024.

PLANAS, O. Modelo atômico de Nagaoka, definição e características. **Energia Nuclear**, 2021. Disponível em: <https://pt.energia-nuclear.net/atomo/modelos-atomicos/nagaoka>. Acesso em 16 jan 2024.

POSTULADOS de Einstein. Produzido por Jorge Sá Martins. [s.l.; s.n.], 9 ago 2011. 1 vídeo (13 min). Publicado no Canal: FísicaModernaUFF. Disponível em: [https://youtu.be/gYTUfq5\\_z7M](https://youtu.be/gYTUfq5_z7M). Acesso em 18 out 2023.

PRASS, A. R. **A origem da palavra fóton**. Disponível em: <https://fisica.net/mecanica-quantica/mecanica-quantica-a-origem-da-palavra-foton.php>. Acesso em 26 abr. 2023.

RADIAÇÃO de Corpo Negro, Lei da Radiação de Planck. Produzido por Vanderlei Salvador Bagnato [São Carlos: s.n.], 7 mai. 2016. 1 vídeo (43 min). Publicado no Canal CePOF-IFSC/USP Disponível em: <https://youtu.be/I9FyckUlid0?si=cGGwNWrtm44RQJKz>. Acesso em 12 set. 2023.

**Radioatividade – Departamento de física Nuclear – Instituto de física da USP**. Disponível em: <https://portal.if.usp.br/fnc/pt-br/p%C3%A1gina-de-livro/radioatividade>. Acesso em 12 set. 2023.

RESSURREIÇÃO, S. S. **Contribuições de John William Nicholson para o átomo de Bohr**: O papel epistêmico do erro científico e suas implicações para o ensino de ciências, Salvador, 2020. Dissertação de Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências, p.67, UFBA.

RIBEIRO, D., Johan Jacob Balmer, **Revista de Ciência Elementar**, v2(02):295, 2014.

RIBEIRO, D., Ludwig Boltzmann, **Revista de Ciência Elementar**, v1(1):084, 2013.

RIBEIRO, P. Ernst Mach. **Revista Ciência Elementar**, v. 2, n. 2, p. 185, 2014

ROCHA, J. F. *et al.* **Origens e evolução das idéias da física** 2ª Ed. Salvador: EDUFBA, 2015.

ROMANOWSKI, R. I. L.; VOSGERAU, D. S. R.. Estudos de revisão: implicações conceituais e metodológicas. **Revista Diálogo Educacional**, v. 14, n. 41, p. 165-189, 2014.

RONAN, C. A. **História ilustrada da ciência** – Universidade de Cambridge, vol IV. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1987.

RUTHERFORD, E; SODDY, F. Radioactive Substances and Their Radiations. **Chemical Society Transactions**. Disponível em: <https://archive.org/details/radioactivesubst00ruthuoft>. Acesso em 13 set. 2023.

RUTHERFORD, E. The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and the Structure of the Atom. **Philosophical Magazine** .1911. Disponível em:

<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1910.0038>. Acesso em: 13 set. 2023.

SANCHEZ, J. N. G. Dificuldades de aprendizagem e intervenção psicopedagógica. Porto Alegre: Artmed, 2004.

SARAIVA M. F. S; FILHO, K. S. O; MULLER, A. M. **Espectroscopia**, 2014. Disponível em <https://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/Aula17-132.pdf>. Acesso em 04 set. 2023.

SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. Alfabetização científica: Uma revisão bibliográfica. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 16, p. 59-77, 2011.

SCHULZ, P. A. Duas nuvens ainda fazem sombra na reputação de Lorde Kelvin **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, p. 509-512, 2007.

SEMICONDUTORES. Produzido por Gabriel Vinícios Silva Maganha. [s.l.;s.n.], 8 fev. 2014. 1 vídeo (12 min). Publicado no canal: GV ensino. Disponível em: <https://youtu.be/snLCgz7W22Y?si=X18Lr3nljmexfjYB>. Acesso em: 9 dez. 2023.

SHURKIN, J. N. **Broken Genius: The Rise and Fall of William Shockley, Creator of the Electronic Age**. London: Palgrave MacMillan, 2006.

SILVA, D. B; JUNIOR, F. F. B. Decaimento alpha: uma abordagem por tunelamento quântico. **Revista Princípios**, n. 46, 2019.

SILVA, S. C. R.; SCHIRLO, A. C. Teoria da aprendizagem significativa de Ausubel: Reflexões para o ensino de física ante a nova realidade social. **Imagens da Educação**, v.4(1), p. 36-42, 2014.

**Sistema Internacional de Unidades – INMETRO 2012**. Disponível em: [http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/si\\_versao\\_final.pdf](http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/si_versao_final.pdf). Acesso em: 10 set. 2023.

SOLOMON, J. **Teaching children in the laboratory**. London: Croom Helm, 1980. SPECTROSCOPY Transformed Astronomy, Chemistry and Physics. Produzido por Kathy Joseph. [s.l. s.n.], 29 jan. 2019. 1 vídeo (12 min). Publicado no Canal: Kathy Loves Physics & History. Disponível em: <https://youtu.be/TFP55200MPY?si=OoviMGEU9B06tNL1>. Acesso em: 30 abr. 2023.

TEIXEIRA, E. S.; JUNIOR, O. F.; EL-HANI, C. N. A influência de uma abordagem contextual sobre as concepções acerca da natureza da ciência de estudantes de física. **Ciência e Educação**, v. 15, n.3, p. 529-556, 2009.

TEIXEIRA, O.; PINHEIRO, N. A. M.; BRANDALISE, M. A. T. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) e o processo de avaliação das aprendizagens: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Meta: Avaliação**: Rio de Janeiro, v. 49, p. 710-736, 2023.

TERMODINÂMICA de um gás e Lei de Dulong-Petit. Produzido por Vanderlei Salvador Bagnato [São Carlos: s.n.], 27 mai. 2020. 1 vídeo (24 min). Publicado no Canal CePOF-IFSC/USP Disponível em: <https://youtu.be/EKDnqZXcFAs?si=F--m7fa9cbmDmw3Y>. Acesso em 12 set. 2023.

TIPLER, P. A. **Física**: para cientistas e engenheiros, vol 4, 3ª Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1995.

TUNELAMENTO de Barreira. Produzido por Jorge Sá Martins.[s.l. s.n.], 4 mar. 2014. 1 vídeo (7 min). Publicado no Canal: Física Moderna UFF. Disponível em: <https://youtu.be/DAFD9UZixhQ?si=8Kow6zCA6wVQDeuw>. Acesso em: 25 ago. 2023.

ZANATTA, A. R.; COBO M. F. **Constante de Planck**, 2013. Disponível em: [https://www.ifsc.usp.br/~lavfis/lavfiswp/wp-content/uploads/2017/06/CtePlanck\\_1.pdf](https://www.ifsc.usp.br/~lavfis/lavfiswp/wp-content/uploads/2017/06/CtePlanck_1.pdf). Acesso em 17 out 2023.