

Fernando Lázaro Bernardo

ANÁLISE PRAXEOLÓGICA DE TÓPICOS DE FÍSICA  
MODERNA EM LIVROS DIDÁTICOS DO PROGRAMA  
NACIONAL DO LIVRO DIDÁTICO

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Educação Científica  
e Tecnológica da Universidade Federal  
de Santa Catarina para a obtenção do  
Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Firmo  
de Souza Cruz.

Florianópolis  
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bernardo, Fernando Lázaro  
Análise praxeológica de tópicos de física moderna em  
livros didáticos : do Programa Nacional do Livro Didático  
/ Fernando Lázaro Bernardo ; orientador, Prof. Dr.  
Frederico Firmo de Souza Cruz Souza Cruz - Florianópolis,  
SC, 2015.  
234 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas.  
Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica.

Inclui referências

1. Educação Científica e Tecnológica. 2. Ensino de Física.  
3. Livros Didáticos. 4. Física Moderna. 5. Teoria  
Antropológica da Didática. I. Souza Cruz, Prof. Dr.  
Frederico Firmo de Souza Cruz. II. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Educação  
Científica e Tecnológica. III. Título.

Fernando Lázaro Bernardo

ANÁLISE PRAXEOLÓGICA DE TÓPICOS DE FÍSICA  
MODERNA EM LIVROS DIDÁTICOS DO PROGRAMA NACIONAL  
DO LIVRO DIDÁTICO

Essa dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Educação Científica e Tecnológica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica.

Florianópolis, 28 de agosto de 2015.

---

Prof. Dr. Carlos Alberto Marques  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora: Universidade Federal de Santa Catarina**

---

Prof. Dr. Frederico Firmo de Souza Cruz  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Tatiana da Silva  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Mikael Frank Rezende Junior  
Universidade Federal de Itajubá



## **AGRADECIMENTOS**

Aos mestres orientadores do grupo de pesquisa Prof. Dr. Frederico Firmo de Souza Cruz, Prof. Dr. Paulo Sena dos Santos e Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Sonia Maria Correa de Souza Cruz, sempre pacientes.

Aos membros da banca avaliadora que despenderam de seu precioso tempo e contribuíram com suas nobres ideias para esse trabalho.

Aos professores do PPGET pela competência na arte de ensinar e aos colegas da turma de mestrado de 2012.

Aos familiares, amigos e colegas que fizeram e fazem parte dessa existência.

E a todos que de alguma forma ajudaram na construção dessa investigação.



## RESUMO

A investigação dessa dissertação se desdobrou sobre a análise praxeológica dos tópicos de Física Moderna presentes em cinco livros didáticos do Programa Nacional do Livro Didático. Nesse sentido, foram analisados os textos e os exercícios presentes nesses materiais didáticos. A Teoria Antropológica da Didática, de Ives Chevallard, serviu de aporte teórico e metodológico para essa investigação, visando, assim, inferir sobre o saber a ser ensinado. Foi possível evidenciar a transposição didática dos conhecimentos e a maneira como estes são abordados pelos livros, assim como as tarefas propostas pelos exercícios e as técnicas para sua realização. Os principais conceitos presentes nesses livros são a Radiação Térmica, o Efeito Fotoelétrico, o Modelo Atômico, a Dualidade onda-partícula e o Princípio da Incerteza. O número de exercícios analisados totaliza cento e noventa, com trezentas e trinta e quatro tarefas. A análise desse levantamento permitiu, também, esclarecer algumas divergências entre esses materiais didáticos e as perspectivas defendidas na literatura do Ensino de Física Moderna, assim como os Parâmetros Curriculares Nacionais. A estrutura proposta nos livros didáticos parece apontar em uma direção e essas perspectivas em outra, pois a maioria dessas tarefas não requer reflexão sobre o conceito, fenômeno, modelos e experimentos. Destaca-se, assim, a axiomatização, em relação à abordagem epistemológica, na apresentação do conhecimento sobre a Física Quântica, e a preferência dos livros didáticos na repetição das atividades de cálculo que levam à mecanização dessas tarefas.

Palavras-chaves: Ensino de Física, Livro Didático e Teoria Antropológica da Didática.





## ABSTRAT

The research of this dissertation unfolded on the praxeological analysis of Modern Physics topics present in five textbooks of the National Textbook Program. In this sense, the texts and exercises present in these textbooks were analyzed. The Anthropological Theory of the Didactic, Ives Chevallard, served as the theoretical and methodological contribution to this research, aiming thus inferring the knowledge to be taught. The results showed the didactic transposition of knowledge and how these are addressed by the books, as well as the tasks proposed by the exercises and techniques for its realization. The main concepts present in these books are the Thermal Radiation, the Photoelectric Effect, the Atomic Model, the duality wave-particle and the Uncertainty Principle. The number of analyzed exercises totaling one hundred ninety, with three hundred thirty-four tasks. The analysis of this survey allowed also clarify some differences between these teaching materials and the prospects of the literature on Physics Teaching and Curriculum Parameters. The structure proposed in textbooks seems to point in one direction and these perspectives in another, for most of these tasks requires no reflection on the concept, phenomenon, models and experiments. It is noteworthy, therefore, the axiomatization, in relation to the epistemological approach in the presentation of knowledge about quantum physics, and the preference of textbooks from the repeated calculation of activities leading to the mechanization of these.

Keywords: Physics Education, Textbook and Theory Anthropological didactics.



## LISTAS DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Gráfico de representação do espectro da radiação de corpo negro.....	52
<b>Figura 2</b> – Representação de experiências imaginadas por Maxwell.....	70
<b>Figura 3</b> – Esquema de antenas emissoras para representar pulsos de ondas eletromagnéticas .....	71
<b>Figuras 4</b> – Representação esquemática do experimento de Hertz.....	75
<b>Figura 5</b> – Esquema para representar o experimento de dupla fenda.....	77



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Livros Didáticos do Programa Nacional do Livro Didático submetidos à análise.....	50
<b>Tabela 2</b> – Categorias das tarefas – Livro Didático 1.....	63
<b>Tabela 3</b> – Técnicas e categorias das tarefas – Livro Didático.....	64
<b>Tabela 4</b> – Tipos de tarefas – Livro Didático 1.....	66
<b>Tabela 5</b> – Categorias das tarefas – Livro Didático 2.....	92
<b>Tabela 6</b> – Técnicas e categorias das tarefas – Livro Didático 2.....	93
<b>Tabela 7</b> – Tipos de tarefas – Livro Didático 2.....	95
<b>Tabela 8</b> – Categorias das tarefas – Livro Didático 3.....	106
<b>Tabela 9</b> – Técnicas e categorias das tarefas – Livro Didático 3.....	107
<b>Tabela 10</b> – Tipos de tarefas – Livro Didático 3.....	108
<b>Tabela 11</b> – Categorias das tarefas – Livro Didático 4.....	122
<b>Tabela 12</b> – Técnicas e categorias das tarefas – Livro Didático 4.....	123
<b>Tabela 13</b> – Tipos de tarefas – Livro Didático 4.....	126
<b>Tabela 14</b> – Categorias das tarefas – Livro Didático 5.....	142
<b>Tabela 15</b> – Técnicas e categorias das tarefas – Livro Didático 5.....	143
<b>Tabela 16</b> – Tipos de tarefas – Livro Didático 5.....	145



## **LISTA DE ABREVIATURAS**

**EM** – Ensino Médio  
**FMC** – Física Moderna e Contemporânea  
**IMZ** – Interferômetro de Mach-Zehnder  
**TAD** – Teoria Antropológica da Didática  
**PCN** – Parâmetros Curriculares Nacionais  
**PNLD** – Programa Nacional do Livro Didático  
**OBA** – Olimpíadas Brasileiras de Astronomia  
**UFMG** – Universidade Federal de Minas Gerais  
**ENEM** – Exame Nacional do Ensino Médio  
**LD** – Livro Didático  
**MEC** – Ministério da Educação





## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	21
1.1. Trabalhos de Física Moderna e Contemporânea na formação de professores.....	23
1.2. Trabalhos sobre Física Moderna e Contemporânea no ensino médio.....	27
1.3. Delineamento da investigação.....	30
2. PROBLEMA DE PESQUISA .....	33
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	37
4. METODOLOGIA.....	43
4.1. Elementos para análise praxeológica do texto.....	45
4.2. Elementos para análise praxeológica das tarefas.....	47
4.3. Elementos para a apresentação dos Livros Didáticos do PNLD.....	48
5. LIVRO DIDÁTICO 1 – CURSO DE FÍSICA .....	51
5.1. Radiação Térmica.....	51
5.1.1. Considerações.....	53
5.2. Efeito Fotoelétrico.....	53
5.2.1. Considerações.....	53
5.3. Modelo Atômico.....	55
5.3.1. Considerações.....	56
5.4. Dualidade.....	56
5.4.1. Considerações.....	58
5.5. Princípio da Incerteza.....	59
5.5.1. Considerações.....	60
5.6. Princípio da Correspondência e Princípio da Complementaridade .....	61
5.6.1. Considerações.....	61
5.7. Barreira de Potencial.....	62
5.7.1. Considerações.....	62
5.8. Categorização das tarefas – Livro Didático.....	63

5.9. Técnicas para resolver as categorias das tarefas – Livro Didático 1.....	64
5.10. Classificação dos tipos de tarefas – Livro Didático 1.....	65
5.11. Conclusões.....	66
6. LIVRO DIDÁTICO 2 – COMPREENDENDO A FÍSICA .....	69
6.1. Radiação Eletromagnética.....	69
6.1.1. Considerações.....	73
6.2. Efeito Fotoelétrico.....	74
6.2.1. Considerações.....	75
6.3. Dualidade.....	76
6.3.1. Considerações.....	78
6.4. Radiação Térmica.....	79
6.4.1. Considerações.....	83
6.5. Modelo Atômico.....	85
6.5.1. Considerações.....	88
6.6. Dualidade – Modelo Atômico.....	89
6.6.1. Considerações.....	91
6.7. Princípio da Incerteza.....	91
6.7.1. Considerações.....	92
6.8. Categorias das tarefas – Livro Didático 2.....	92
6.9. Técnicas para resolver as categorias das tarefas – Livro Didático 2.....	93
6.10. Classificação do tipos de tarefas – Livro Didático 2.....	95
6.11. Conclusões.....	95
7. LIVRO DIDÁTICO 3 – CONEXÕES COM A FÍSICA .....	97
7.1. Radiação Térmica.....	97
7.1.1. Considerações.....	100
7.2. Efeito Fotoelétrico.....	101
7.2.1. Considerações.....	102
7.3. Radiação Térmica – Efeito Fotoelétrico.....	102
7.3.1. Considerações.....	105
7.4. Categorização das tarefas – Livro Didático 3.....	106

7.5. Técnicas para resolver as categorias das tarefas – Livro Didático 3.....	106
7.6. Classificação dos tipos de tarefas – Livro Didático 3.....	107
7.7. Conclusões.....	108
8. LIVRO DIDÁTICO 4 – QUANTA FÍSICA .....	109
8.1. Radiação Eletromagnética.....	109
8.1.1. Considerações.....	111
8.2. Modelo Atômico.....	111
8.2.1. Considerações.....	114
8.3. Radiação Térmica.....	115
8.3.1. Considerações.....	116
8.4. Efeito Fotoelétrico – Modelo Atômico.....	116
8.4.1. Considerações.....	117
8.5. Dualidade.....	118
8.5.1. Considerações.....	120
8.6. Princípio da Incerteza.....	121
8.6.1. Considerações.....	121
8.7. Categorização das tarefas – Livro Didático.....	122
8.8. Técnicas para resolver as categorias das tarefas – Livro Didático 4.....	123
8.9. Classificação dos tipos de tarefas – Livro Didático 4.....	126
8.10. Conclusões.....	127
9. LIVRO DIDÁTICO 5 – FÍSICA.....	129
9.1. Radiação Eletromagnética.....	129
9.1.1. Considerações.....	130
9.2. Radiação Térmica.....	130
9.2.1. Considerações.....	132
9.3. Efeito Fotoelétrico.....	133
9.3.1. Considerações.....	136
9.4. Dualidade.....	137
9.4.1. Considerações.....	137
9.5. Modelo Atômico.....	137

9.5.1. Considerações.....	140
9.6. Dualidade – Modelo Atômico.....	141
9.6.1. Considerações.....	142
9.7. Categorização das tarefas – Livro Didático 5.....	142
9.8. Técnicas para resolver as categorias das tarefas – Livro Didático 5.....	143
9.9. Classificação dos tipos de tarefas – Livro Didático 5.....	145
9.10. Conclusões.....	146
10. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	147
11. REFERÊNCIAS .....	153
12. ANEXO A – LIVROS DO PNLD .....	157
13. ANEXO B – EXERCÍCIOS – LIVRO DIDÁTICO 1 .....	159
14. ANEXO C – EXERCÍCIOS – LIVRO DIDÁTICO 2 .....	165
15. ANEXO D – EXERCÍCIOS – LIVRO DIDÁTICO 3.....	175
16. ANEXO E – EXERCÍCIOS – LIVRO DIDÁTICO 4.....	181
17. ANEXO F – EXERCÍCIOS – LIVRO DIDÁTICO 5.....	213

## INTRODUÇÃO

Ao lançar um olhar sobre a realidade, uma observação investigativa impregnada de critérios de interpretação, caminha-se para saciar a sede de compreensão que toda mente humana carrega consigo, sobre si mesma e sobre os objetos que a rodeiam. Desta e de outras formas a humanidade procura interpretar, entender, reproduzir toda espécie de conhecimento que a própria mente pode criar. Independente das quimeras do pensamento procurou-se, há muito tempo, separar as superstições e obscurantismos, que cada indivíduo ou grupo destes carrega, de um saber que se refere ao conhecimento científico.

O conhecimento científico apresenta-se como um fenômeno cultural de forte impacto na vida diária de praticamente toda sociedade atual. Os desdobramentos tecnológicos do último século foram, em partes, possíveis com o desenvolvimento de teorias da Física Moderna e Contemporânea. O entendimento acerca do comportamento das partículas em escala atômica foi, mas, sobretudo, está sendo compreendido pelos modelos da Mecânica Quântica.

Ao perpassar do tempo a Ciência continua evoluindo desde empirismo aristotélico até o realismo científico, aprimorando-se no desenvolvimento de seus critérios. As implicações do conhecimento científico se refletem em toda sociedade, fornecendo outras visões de mundo, ajudando a interpretar a realidade e possibilitando a construção de novas tecnologias, atribuindo à Ciência o status de Cultura. Particularmente, no intuito de compreender o Universo, os conhecimentos da Física possibilitaram, neste e no último século, um desenvolvimento tecnológico, e referente à compreensão da natureza, nunca vista na história conhecida da humanidade. Como negar as implicações da Relatividade frente à interpretação do Universo macroscópico – contração do espaço e dilatação do tempo – ou mesmo a criação de armamento bélico e novas fontes de energia; a explicação de fenômenos microscópicos e a criação de novas tecnologias através da Mecânica Quântica. Nesse sentido o conhecimento científico é parte da Cultura, reflexo da sede de conhecimento do sujeito sobre o mundo, e fundamenta o desenvolvimento de novas tecnologias entre outros aspectos.

Na compreensão da realidade poucas teorias científicas alteraram a perspectiva de mundo como a Relatividade e a Mecânica Quântica. As afirmações newtonianas de tempo e espaço absolutos são no mínimo

limitadas e a interpretações do comportamento dos objetos clássicos e quânticos apresentam marcantes diferenças.

A relevância da introdução de uma discussão mais efetiva que a atual dos temas de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio (EM) pode ser verificada em muitos trabalhos de pesquisa em Ensino de Ciências e nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) referentes ao ensino de Física. Mas por que ensinar Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio? Nesse sentido vários trabalhos de pesquisa apontam possíveis respostas para esta pergunta, propondo abordagens com temas gerais e/ou com propostas particulares.

O trabalho de Terrazan (1992) defende que alguns aparelhos tecnológicos, costumeiramente, utilizados podem ter seu funcionamento descrito por meio dos conceitos da Física desenvolvida a partir do século XX. Além de assumir a importância desse conhecimento para a compreensão de fenômenos naturais e para um entendimento da sociedade atual, esse autor afirma que o grande reflexo que as teorias dessa parte de Física têm no mundo atual exige a introdução da FMC no EM.

Os PCN+ (BRASIL, 2002) propõem o Ensino de Física mais contextualizado histórica e socialmente, relacionado, também, a fatores tecnológicos e a características referentes à construção dos modelos na representação da realidade, visando, assim, à formação de um cidadão mais crítico e reflexivo e que possa contribuir para a sociedade. Ao chamar a atenção para a indispensabilidade de aspectos da Física Moderna na compreensão de propriedades que descrevem a matéria, esses parâmetros assumem o estudo da *matéria e radiação* como “... capaz de organizar as competências relacionadas à compreensão do mundo material microscópico.” (BRASIL, 2002, p.70).

Os trabalhos apresentados nos dois parágrafos anteriores trazem perspectivas gerais acerca da introdução da FMC no ensino básico. Embora essa justificativa já tenha reflexos nos Livros Didáticos do Programa Nacional do Livro Didático (PNLD), fomentando um crescente número de publicações científicas nos últimos anos, parece que a real discussão desses conceitos da Física esteja distante das salas de aula no EM.

Os estudos na tentativa de diminuir a distância existente entre a FMC e o EM são objetivados de diversas formas. Nesse sentido são apresentados nos próximos parágrafos trabalhos que abordam a FMC no EM e na formação de professores de Física. Pois se assume o sistema

didático como sendo composto pelo conhecimento, o professor e o aluno. Assim, investiga-se a relação do saber com os estudantes do ensino médio e com a formação de professores. Embora existam muitos trabalhos englobando tais temas, procurou-se identificar aspectos gerais relacionados à FMC e o Ensino de Física, tentando ressaltar pontos, considerados nessa dissertação, relevantes para a discussão do assunto. E, também, apresentar uma breve revisão sobre o tema.

### 1.1 TRABALHOS DE FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES

Holbrow, Galvez e Parks (2001) desenvolveram materiais que foram empregados em sala de aula da graduação em Física. Eles utilizaram o interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ) com o intuito de expor efeitos não-clássicos e aspectos como a superposição quântica, visando uma aproximação de aspectos tecnológicos com a computação quântica. Para a compreensão e descrição do experimento é apresentado o formalismo matemático da mecânica matricial relacionado à descrição do sistema quântico de dois estados. Para entender desse experimento, nessa perspectiva, seriam necessárias modificações no curso de Mecânica Quântica, defendida pelos autores em seu tratamento de um divisor de feixe de fótons.

Para Cavalcante e Tavolaro (2001) a introdução da FMC no EM justifica-se frente à necessidade dos estudantes de compreender e interpretar fatores tanto de origem natural quanto tecnológico. Os autores apontam a diferença fundamental da Mecânica Quântica em relação à Mecânica Clássica ao descrever o comportamento de objetos quânticos com duas perspectivas (onda e partícula), relatando a notória ausência, no geral, da instrução de fenômenos ondulatórios nesse nível de ensino. A partir de estudos prévios foram construídos materiais didáticos de baixo custo, cuja instrução foi ministrada a professores por meio de oficinas, visando à compreensão dos fenômenos da interferência, difração e o comportamento corpuscular da radiação. A relação dos modelos corpuscular e ondulatório, na perspectiva do Princípio da Complementaridade de Niels Bohr (1885-1962), descrevendo a mesma realidade, permite, para esses autores, uma abordagem que possibilita entender a linguagem contemporânea, melhorando os conhecimentos sociais e filosóficos, e fomentando o exercício da cidadania.

Na pesquisa de Araújo e Rodrigues (2001) foram comparadas as disciplinas de Física Moderna, que utilizam o livro Física Quântica (1988) de Eisberg e Resnick presente na graduação de bacharéis e licenciados em Física, e Mecânica Quântica, cujo principal referencial é o livro de Gasiorowicz, Física Quântica (1979), somente presente no curso de bacharelado em Física. Essa inferência faz-se a partir dos livros textos mais utilizados nessas disciplinas, considerando, sobretudo, a formação dos licenciandos. Como resultado pode-se apontar que os conteúdos dos dois cursos são muito semelhantes. A maior diferença está na profundidade do estudo do formalismo matemático no curso de Mecânica Quântica, não havendo, segundo os autores, nenhuma perda conceitual na formação dos licenciandos por não terem o formalismo nos mesmos moldes da formação de bacharéis.

No trabalho de Ostermann e Ricci (2004) são apresentados os resultados da implementação de uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica, aplicado no curso de Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, na disciplina de *Tópicos de Física Moderna e Contemporânea I*. Essa abordagem foi proposta com o intuito de introduzir o assunto no EM, pois, para os autores, existem carências desse tipo de discussão, frente às características conceituais e filosóficas, na formação de professores. A disciplina foi estruturada em três unidades – *unidade conceitual, unidade formal e unidade de aplicação* – após a aplicação de questionários para inferir aspectos acerca da Mecânica Quântica. A aprendizagem foi avaliada e os resultados apontaram que os professores-alunos possuem algumas lacunas em sua formação sobre conceitos básicos de Mecânica Quântica. Com a aplicação da unidade conceitual, foi possível observar mudanças nas concepções destes, sobretudo, em relação à diferença de objetos clássicos e quânticos.

Na mesma linha de pesquisa Ostermann, Prado e Ricci (2006) utilizaram um *software* que representa o fenômeno de interferência em relação à dualidade onda-corpúsculo no IMZ. Dessa forma, realizou-se a descrição do regime clássico e, posteriormente, a descrição do comportamento para o caso quântico e suas interpretações nas perspectivas ondulatória e corpuscular. Os autores defendem que esse interferômetro é um ótimo instrumento para trabalhar a relação entre essas duas perspectivas na formação de professores de Física.

Ostermann e Prado (2005) apresentam, também, nesse trabalho a utilização do IMZ para estudar as interpretações epistemológicas acerca



dos fundamentos de Teoria Quântica sobre a dualidade onda-corpúsculo. Em diferentes arranjos do interferômetro são apresentadas as perspectivas que descrevem esse fenômeno, apontando as limitações no entendimento do comportamento de objetos quânticos, suas diferentes interpretações, assim como a descrição do formalismo matemático deste. Para inferir as diferenças entre os objetos nos regimes quântico e clássico, empregou-se um *software* tipo bancada virtual do IMZ. Para os autores o resgate de abordagens conceituais da Mecânica Quântica, relacionada aos aspectos ontológicos e epistemológicos, podem ser alcançados, nas formações inicial e continuada de professores, ao se utilizar esse interferômetro.

No trabalho de Montenegro e Pessoa Jr. (2002) investigam-se as interpretações particulares dos estudantes do curso de graduação em Física sobre os conceitos da Mecânica Quântica ligados ao experimento da dupla fenda, princípio da incerteza, estado quântico, retrodição e postulado da projeção. Segundo os autores existem lacunas na formação dos estudantes em relação a esses assuntos. No artigo são apresentadas as diferentes interpretações possíveis de alguns arranjos experimentais para o estudo de objetos quânticos. A partir da classificação de quatro interpretações teóricas da Mecânica Quântica (Corpuscular, Ondulatória, Dualista Realista e Dualista Positivista), foi possível inferir acerca das interpretações “privadas” dos estudantes por meio de um questionário com respostas “abertas”, respostas “fechadas” e algumas entrevistas. Os questionários inferem as concepções dos educandos, e apontam que estes utilizaram perspectivas diferentes, e até mesmo contraditórias, das interpretações para resolver os problemas propostos.

Pereira, Ostermann e Cavalcanti (2009) utilizaram o interferômetro virtual de Mach-Zehnder como ferramenta de mediação para uma atividade didática com o objetivo de investigar as interações discursivas de estudantes de licenciatura em Física. Ao utilizar como referencial teórico a perspectiva sociocultural de Vygotsky, os autores inferem e avaliam como são desenvolvidos os enunciados dos estudantes em sala de aula por meio da linguagem e instrumentos semióticos. Os resultados apontam os seguintes aspectos, nas palavras dos autores:

- (a) em atividades colaborativas com outros colegas, um dos alunos sempre assume a função do parceiro mais capaz; (b) as ações explicativas dos parceiros mais capazes geralmente contêm traços de fala egocêntrica; (c) alguns debates entre os

alunos são marcados por um processo análogo ao fenômeno da cognição socialmente distribuída; (d) alguns enunciados constituem gêneros do discurso de situações típicas de instrução de física quântica; (e) as ações mediadas pelo uso do interferômetro virtual atuaram, na maior parte das vezes, na zona de desenvolvimento proximal, viabilizando a construção e a negociação de novos significados. (PEREIRA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2009, p.376).

Na análise das interações discursivas dos estudantes foi utilizado o referencial de Bakhtin. Sendo, dessa forma, o aporte teórico-metodológico fundamentado nas teorias de Vygotsky e Bakhtin. A abordagem parece apontar para uma forma colaborativa na construção de significados ligados a esses conceitos, fomentando o desenvolvimento cognitivo.

No trabalho de Ricci, Ostermann e Prado (2007) empregou-se o interferômetro virtual de Mach-Zehnder para estudar o fenômeno ondulatório da luz no regime clássico – assumindo que isto facilitará o entendimento do processo no regime quântico – na formação de estudantes de Física. Essa abordagem tem como objetivo a construção de material didático, que sirva de apoio para professores em formação, partindo da ótica ondulatória para discussões no regime quântico. A descrição dos fenômenos de interferência e difração, em diferentes arranjos, foi tratada por meio do formalismo matemático.

No trabalho de Pereira *et. al.* (2012) abordam-se os postulados da Física Quântica, relacionando o formalismo matemático à linguagem “operacional” e envolvendo aspectos tanto conceituais quanto fenomenológicos. Para as discussões utiliza-se o IMZ como ferramenta de simulação virtual do fenômeno quântico. O objetivo é transcrever o formalismo em uma linguagem para ser utilizadas por professores do EM, mas podendo ser instruída, também, na formação destes. São apresentados os postulados e depois, a partir da discussão clássica do IMZ, chega-se ao regime quântico. Posteriormente, ilustram-se os postulados. Segundo os autores sua abordagem conceitual pode contribuir para possíveis transposições didáticas para a escola básica.

Na pesquisa de Resende Jr. e De Souza Cruz (2009) é inferida a formação de professores de física, abordando as opiniões destes sobre a introdução da FMC no EM. Esse trabalho analisa a formação de

professores por meio de entrevistas de 31 licenciandos em Física de instituições públicas, pois se assume que essa introdução será realizada mais efetivamente a partir de docentes na prática em sala de aula. O resultado da análise aponta que quase todos os entrevistados tencionam levar a FMC ao EM, porém os autores chamam a atenção para a tendência dos sujeitos de acreditar que isto deva ocorrer no final do ensino básico, refletindo a repetição estrutural de pré-requisitos, inerentes em sua formação. Contudo, os temas propostos pelos sujeitos de pesquisa para introdução no EM não apresentam um ordenamento que poderia justificar a perspectiva de trabalhar a FMC no final dessa fase do ensino. Embora as entrevistas indiquem que o tema deva ser abordado de forma informativa, apontando, ainda, para falta de material didático específico, os autores chamam a atenção que a maioria dos sujeitos de pesquisa teve dificuldades em diferenciar aspectos formativos e informativos.

## 1.2 TRABALHOS SOBRE A FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NO ENSINO MÉDIO

Na pesquisa de Silva e Kawamura (2001) infere-se acerca da questão da natureza da luz, dentro do conteúdo de Ótica, utilizando material de divulgação científica. Segundo eles esse material estabelece um vínculo entre a curiosidade dos leitores e a realidade que os cerca, ao menos na perspectiva científica, faltando na Física apresentada nas aulas do EM características frente à relação direta com o mundo. O entendimento referente à natureza da luz pode ser descrito com a utilização da Teoria Quântica. Temas científicos atuais, como mostrado na pesquisa, parecem despertar a curiosidade das pessoas em geral, podendo o ensino da Física Moderna e Contemporânea na escola básica, suprir essa demanda.

Na pesquisa de Olsen (2002) argumenta-se que mesmo após cem anos da introdução na Física da constante de Planck  $h$ , o ensino dessa Ciência continua se concentrando nos conceitos clássicos. Embora o estudo tenha ocorrido na Noruega, reflete uma tendência que ocorre também no Brasil. Segundo o autor, o conceito da Física Moderna que mais romperia com a concepção clássica de mundo seria a descrição do comportamento de objetos quânticos relacionados à dualidade onda-corpusculo. Assim, seria possível ressignificar concepções do mundo macroscópico dos estudantes pré-universitários em relação ao mundo microscópico na perspectiva científica, e, também, mostrar a Ciência

como uma construção contínua em constante desenvolvimento e não acabada.

No trabalho de Marques e Silva (2005) relata-se uma experiência de ensino por meio de um projeto intitulado Olimpíadas Brasileira de Astronomia (OBA). A abordagem do projeto foi mais conceitual, não havendo preocupação com o formalismo matemático. Nesse sentido, foram disponibilizados textos para consulta que traziam temas de Astronomia com características mais conceituais, devido à ausência de tal material. Para a preparação dos estudantes interessados em participar da prova da V OBA, foram ministradas aulas no contra turno visando esclarecer dúvidas e aprofundar alguns aspectos inerentes à avaliação e a tópicos apresentados nas aulas relacionados à astronomia. Segundo os autores, a participação dos estudantes foi significativa, alguns se interessaram em conhecer mais sobre os temas e, a maioria, ao resolverem as provas anteriores, levantou questões sobre FMC, assunto já presente nas edições passadas da OBA. O estudo conclui que a Astronomia pode fomentar a discussão de temas atuais da Física na escola básica. O interesse dos estudantes por temas da Teoria Quântica pode ser observado nesse estudo, influenciado pela curiosidade de cada indivíduo e pelo objetivo de realizar a prova.

Lobato e Greca (2005) apresentam os resultados da literatura sobre a investigação das concepções dos educandos do EM acerca da estabilidade do átomo, princípio da incerteza, dualidade onda-partícula e outros temas da Teoria Quântica. Segundo os autores em alguns desses temas foram encontradas, também, dificuldades de compreensão por parte de estudantes pesquisadores de diversos níveis e modalidades de ensino. Nesse sentido, foram analisados os currículos de Física do EM presente nos sites oficiais dos governos de diversos países (Espanha, França, Reino Unido, Dinamarca, Suécia, Canadá e Austrália) como principal fonte de pesquisa, assumindo o currículo como uma concretização da cultura humana, ensinável e disponível. A abordagem por meio da via histórica, utilizando a hipótese de Planck, efeito fotoelétrico, princípio da incerteza e dualidade onda-corpúsculo, foi encontrada nos currículos de Itália, Espanha, Portugal e Finlândia. No Reino Unido a introdução à Teoria Quântica aparece por meio dos diagramas de Feynman. Na Dinamarca, Suécia, Canadá e Austrália a Teoria Quântica é introduzida de maneira integrada em relação à experimentação, modelização teórica e às consequências para a sociedade e o ambiente. Ao observar as evidências da presença dos conceitos da FMC no ensino básico, Lobato e Greca

(2005) afirmam que o desafio estaria ligado a forma de ensinar os conceitos da Teoria Quântica.

Machado e Nardi (2007) utilizaram um sistema hipermídia construído para apoiar o ensino e a aprendizagem de temas de Física Moderna no EM. São considerados aspectos históricos e filosóficos da Ciência relacionados à Tecnologia, Sociedade e Ambiente com o intuito de fomentar a aprendizagem. Os resultados sintetizados a partir da avaliação desse recurso digital, realizadas por pesquisadores de Ensino de Física, licenciandos de Física e estudantes do EM, apontam o computador como fator de motivação, devido à diversidade de elementos digitais relacionados à descrição dos conceitos e à interpretação dos fenômenos.

Para Valadares e Moreira (1998) os estudantes do ensino básico precisam conhecer os fundamentos da tecnologia que utilizam, e assim aproximar a física da sala de aula com aspectos do seu cotidiano. O trabalho é focado em três temas – efeito fotoelétrico, laser e absorção e emissão de corpo negro – implementados por meio de experiências de baixo custo, integradas a objetos que compõem o dia-a-dia dos estudantes. Com essa abordagem os autores esperam resgatar o interesse pela Física, podendo fomentar a introdução desses conceitos no ensino básico.

O trabalho de Müller e Wiesner (2002), realizado na Alemanha, descreve a aplicação de um curso introdutório para o nível básico do ensino (semelhante ao EM). No curso são enfatizados aspectos conceituais da Mecânica Quântica vinculados ao laboratório virtual do interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ), representando, assim, as contradições entre as perspectivas clássica e quântica relacionadas, respectivamente, à descrição do comportamento de objetos clássicos e quânticos. Para a construção da abordagem foi realizado um questionário e entrevistas para inferir o conhecimento prévio dos estudantes sobre essa contradição, e da síntese dos resultados foi elaborada uma proposta de ensino. Após a aplicação da proposta, os estudantes responderam a outro questionário e entrevistas. Os resultados evidenciam que a maioria compreendeu a descrição do tema, possivelmente, evitando equívocos comuns presentes no ensino tradicional.

No estudo de Monteiro e Nardi (2008) foram analisados alguns discursos acerca da natureza da ciência, ou seja, aspectos relevantes na construção do pensamento científico, presente nos livros didáticos de Física do EM. Pois pesquisas mostram que esses textos não dispõem o conhecimento no sentido apontado pela perspectiva dos Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2002), e muitos ainda trazem

equivocos em algumas representações. Contudo tais livros são ferramentas importantes para os professores em sua prática em sala de aula. Foram focados, sobretudo, os tópicos referentes à FMC. No total analisaram-se seis livros, sendo que três deles são indicados pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD). Ao inferir os discursos presentes nestes, os autores utilizaram como referencial teórico e metodológico a análise de discurso da linha francesa, norteador o estudo no fundamento da natureza da ciência como referente da análise de discurso. O trabalho apresenta o atual ensino de conteúdos distantes das questões sociais e culturais, não cumprindo o papel da educação científica. Para os autores essa função pode ser fomentada ao se utilizar aspectos sobre a natureza da ciência. Nas considerações são apontadas tendências positivistas nos discursos dos livros didáticos, chamando a atenção para a avaliação referente aos livros do PNLD, sobretudo, relacionada à natureza da ciência nos temas da FMC.

### 1.3 DELINEAMENTOS DA INVESTIGAÇÃO

As perspectivas expostas anteriormente defendem, sobretudo, a introdução da FMC no EM, seja estudando e agindo na formação de professores, seja com a construção e implementação de propostas que trabalham esses assuntos no ensino básico, ou avaliação do currículo e/ou material didático. Embora existam outras formas de apresentar a FMC na escola básica, assume-se, nesse projeto, que as peculiaridades relacionadas à descrição de objetos quânticos podem fomentar discussões sobre concepções de realidade do ponto de vista ontológico e epistemológico. Nesse sentido, caracterizar aspectos relevantes na construção de modelos e do conhecimento científicos, contribuindo para fornecer instrumentos de investigação sobre o meio onde se encontra o sujeito, possibilitando, assim a formação de um pensamento mais crítico na formação de estudantes do EM.

Mesmo que os livros didáticos do PNLD tragam alguns conceitos de FMC, estes apresentam uma postura que muitas vezes negligencia fatores presentes na construção do conhecimento (MONTEIRO; NARDI, 2008). Ao comparar os cursos de Física Moderna, a partir dos livros utilizados nas graduações de bacharéis e licenciados em Física, Araújo e Rodrigues (2001) concluíram que a formação desses estudantes diferencia-se em relação ao formalismo matemático, sem ocorrer carências em relação aos conceitos devido a essa diferença. Porém,

muitos estudos apresentados aqui, apontam para lacunas na formação desses licenciados, sobretudo, relativos aos conceitos de FMC. Nesse sentido, várias propostas foram realizadas com o intuito de trabalhar de diferentes formas o estudo dos conceitos ligados a objetos quânticos, suas relações com a realidade e tecnologia. Utilizando ferramentas como IMZ são construídas diversas propostas: atuando no ensino básico, trabalhando as diferenças entre a Física Clássica e Física Quântica (MULLER; WIESNIER, 2002); explorando o formalismo matricial na formação de professores (HOLBROW; GALVE; PARKS, 2001); dentro do cenário nacional investigando a formação de professores de física (OSTERMANN, PRADO e RICCI, 2006; OSTERMANN e PRADO, 2005; PEREIRA, OSTERMANN e CAVALCANTI, 2009; RICCI, OSTERMANN e PRADO, 2007; PEREIRA *et. al.*, 2012) trazendo em paralelo, abordagens conceitual, fenomenológica, epistemológica e matemática. Ao constatar que os livros empregados na formação de professores, no geral, não abordam algumas perspectivas expostas anteriormente, menos ainda os livros do PNLD. Assim, parece que mesmo apesar de grandiosos esforços os conceitos de FMC estão distantes das salas de aula do ensino básico.

Como demonstrado no estudo de De Souza Cruz e Rezende Jr. (2009) existem intenções por parte dos licenciandos em Física em trabalhar os temas de FMC no ensino básico. Porém as discussões conceituais e filosóficas na formação de professores são escassas (OSTERMANN; RICCI, 2004), existindo, também, problemas em relação às interpretações de Mecânica Quântica na descrição de objetos quânticos (MONTENEGRO; PESSOA JR., 2002). Como é consenso para muitos pesquisadores que a marcante diferença entre os objetos clássicos e quânticos pode ser um ponto de partida promissor para a compreensão de mundo que a Física Quântica trouxe à tona, algumas mudanças devem ser efetuadas.

Algumas mudanças vêm ocorrendo, na Universidade Federal de Rio Grande do Sul a proposta de Ostermann e Ricci (2004) foi implementada no curso de Física para professores. Na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) algumas disciplinas – por exemplo, Introdução à Física Moderna e Tópicos de Matemática Básica para Física Geral – foram incorporadas no currículo dos licenciandos em Física com o intuito de aprimorar o ensino dos conceitos de FMC.

Nesse sentido essa dissertação de mestrado analisa os livros didáticos do PNLD que são disponibilizados nas unidades de ensino

básico, visto que esses textos são uma ferramenta importante na prática docente. É evidente que não se podem investigar todos os materiais aplicados para esse fim, por isso são estudados cinco livros dispostos pelo PNLD. Diferente do estudo de Monteiro e Nardi (2008) que verificou o discurso acerca da natureza da ciência, o problema dessa pesquisa se desdobra em relação a como esses materiais didáticos abordam a Física Moderna, ou seja, como se propõe a ensinar esse conhecimento.



## 2 PROBLEMA DE PESQUISA

Como foi apontada anteriormente, a introdução dos conceitos de FMC no EM é justificada tanto pelas proposições da legislação vigente (BRASIL, 2002) quanto por pesquisas científicas referentes ao Ensino de Ciências e, ainda, o próprio meio social e humano apresenta curiosidade em conhecer mais sobre os aspectos a Física Moderna. Até mesmo a forma como se ensina a Física na escola básica deve ser repensada segundo essas perspectivas. Porém, isto é um tema muito abrangente e fora do escopo desse trabalho, mas serve de ponto de partida para essa discussão.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2002) propõem, como competências para o Ensino de Física, uma perspectiva para a formação do cidadão contemporâneo, atuante e solidário, capaz de utilizar instrumentos cognitivos para compreender e modificar a visão da realidade. Nesse sentido, o Ensino de Física deve apresentar um conjunto de competências específicas relacionadas ao conhecimento que tenciona instruir, possibilitando o entendimento de fenômenos naturais e tecnológicos fundamentados em suas teorias, leis e modelos. Porém, segundo os próprios PCN+.

A seleção do conhecimento tem sido feita, tradicionalmente, em termos de conceitos considerados centrais em áreas de fenômenos de natureza física diferentes, delimitando os conteúdos de Mecânica, Termologia, Ótica e Eletromagnetismo a serem abordados. Isso resulta, quase sempre, em uma seleção tal que os índices dos livros didáticos de ensino médio se tornam, na verdade, uma versão abreviada daqueles utilizados nos cursos de física básica do ensino superior, ou uma versão um pouco mais estendida dos que vinham sendo utilizados na oitava série do ensino fundamental. (BRASIL, 2002, p. 61).

Embora esses parâmetros tenham aberto uma nova perspectiva para o ensino, estes não apresentam de que maneira podem ser alcançados os objetivos que veemente defendem. Muitas pesquisas e implementações de estratégias didáticas são construídas nesse sentido.

As abordagens desdobram-se das mais diferentes maneiras. Aspectos conceituais e fenomenológicos são relevados juntamente com aspectos filosóficos, tentando, assim, afastar-se da perspectiva tradicional ao considerar características e ferramentas utilizadas para a construção do conhecimento científico. A formação de professores, que serão os efetivos implementadores dos temas no EM, parece apontar para lacunas na formação frente a aspectos epistemológicos, fenomenológicos e conceituais, sobretudo, em relação a temas Física Moderna.

Ao relacionar a perspectivas levantadas por meio dos PCN+ (BRASIL, 2002), juntamente com as abordagens propostas descritas na literatura científica referentes ao Ensino de Ciências, observa-se que o ensino do comportamento de objetos quânticos é defendido por muitos pesquisadores do Ensino de Física. Nesse sentido, utilizando a perspectiva da Teoria Antropológica da Didática (TAD) para inferir acerca dos discursos e tarefas presentes nos Livros Didáticos do PNLD sobre as partes de Física Moderna relacionada à Teoria Quântica, se desdobrará essa dissertação. Ainda é considerada a introdução desse tema no EM, vinculando a presente pesquisa às perspectivas defendidas por esses estudos científicos, proposições legais e, até mesmo, ânsia da própria sociedade em conhecer a Teoria Quântica. Dessa maneira, assume-se a importância que essa ferramenta didática do ensino básico possui para os professores e para a imagem que a Física tem para os estudantes.

Nesse sentido, apresenta-se a questão de pesquisa sobre a análise dos livros didáticos que são utilizados por professores no EM. Mais profundamente se estabelece uma pergunta acerca da Relação Institucional dos Livros Didáticos ligada à organização praxeológica, visando o aprimoramento do Ensino de Física, segundo a perspectiva apresentada, para a abordagem da FMC no EM.

### **De que maneira os Livros Didáticos do Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) propõem o ensino em relação à Física Moderna?**

Para responder essa questão de pesquisa, levantam-se alguns objetivos a serem seguidos durante a análise do conteúdo referido.

- ♦ Objetivo 1: Verificar de que maneira os Livros Didáticos analisados apresentam a perspectiva epistemológica acerca da construção da Teoria Quântica frente à representação da realidade.

- ♦ Objetivo 2: Verificar de que maneira os Livros Didáticos analisados propõem a descrição fenomenológica e conceitual do comportamento de objetos quânticos em relação ao modelo.
- ♦ Objetivo 3: Ao analisar os livros didáticos investigar como são apresentados os aspectos referentes ao formalismo matemático relacionado aos resultados empíricos e fenômenos quânticos.

Na análise dos livros cabe esclarecer que são investigados os discursos e as tarefas, sobre a Teoria Quântica, abordados pelos livros de Física do PNLD referente ao EM, inferindo, assim, de que maneira estes utilizam seus recursos para propor o ensino e a aprendizagem desse conteúdo.

Ao investigar sobre a introdução da FMC no EM, infere-se que mesmo se os Livros Didáticos do EM contemplarem as perspectivas defendidas pelos PCN+ (BRASIL, 2002), trabalhos acadêmicos e carências da sociedade em compreender melhor a Física Quântica, será uma tarefa difícil para os docentes de Física se sua formação e as perspectivas citadas acima não estiverem apontando para o mesmo sentido. Em outras palavras, tanto a formação dos licenciandos em Física quanto os Livros Didáticos precisam estar em consonância, principalmente, em relação aos discursos e tarefas para melhor servirem de ferramenta para a prática docente. Ou seja, devem promover, também, as características defendidas nas perspectivas atuais. Considera-se, também, que a atuação do docente de física não depende somente do Livro Didático do PNLD, porém este é uma ferramenta importante em sua prática.



### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

O processo de ensino e aprendizagem, na perspectiva da Teoria Antropológica da Didática (TAD), concretiza-se por relações envolvendo professor, aluno e objeto do conhecimento, englobadas por um meio particular. Dessa forma, assume-se que esse processo está além das práticas escolares, remetendo-se às relações institucionais imbricadas nas relações desses três pilares. Segundo Chevallard (1992) quando um objeto do conhecimento é aceito e definido por uma instituição específica, este é, conseqüentemente, instruído a professores e alunos. Para investigar as relações institucionais, entre o professor, aluno e conhecimento se fundamentou a análise na Teoria Antropologia de Didática.

As instituições representam os interesses que englobam esses três sujeitos, além do meio onde estão inseridos. Nesse sentido, pode-se assumir o livro didático como resultado de algumas dessas relações institucionais. Das relações entre sujeitos, objetos e instituições são construídas as práticas sócias – conjunto de atividades humanas que se difere, em geral, de qualquer comportamento “natural” – os saberes são criados entre essas interações e, segundo Chevallard (1999), esta é uma forma específica de conhecimento, construída a partir dos resultados das ações institucionais e humanas. E a praxeologia apresenta-se como um instrumento que possibilita investigar essas relações institucionais.

Uma atividade humana caracteriza-se, no geral, pelo objetivo de realizar alguma tarefa específica  $t$ , que faz parte de um tipo mais geral de tarefa  $T$ . Ao cumprir a tarefa  $t$  utiliza-se uma técnica  $\tau$  que possibilita realizar a tarefa, sendo a técnica justificada por uma tecnologia  $\theta$  e fundamentada na teoria  $\Theta$ . A praxeologia é formada por esses quatro conceitos ( $T, \tau, \theta, \Theta$ ) que fundamentam sua particularidade, e permitem, assim, inferir como uma instituição propõe realizar certa tarefa. Utilizando essas relações é possível refletir sobre as técnicas, tecnologias e teorias que, conseqüentemente, são instruídas. A análise da relação institucional refere-se a um dado momento histórico-social, pois os aspectos que caracterizam essas interações também mudam. Ao analisar o Livro Didático deve-se considerar que as relações institucionais modificaram-se nos últimos 30 anos. Assim, a evolução da linguagem na instrução do conhecimento deve seguir as demandas sociais refletidas no meio onde se encontram esses três pilares antropológicos (professor, aluno e conhecimento), visando um contínuo aperfeiçoamento.

Para inferir uma relação institucional é necessário recorrer a uma praxeologia, dessa forma, são considerados diferentes momentos e contextos referentes à construção da relação institucional. Com o Livro Didático pode-se compreender a prática docente em relação a algum objeto do conhecimento e a relação institucional deste com o conhecimento. A realização de alguma tarefa pode ser considerada, de alguma forma, rotineira, realizada por meio de técnicas reproduzidas ao perpassar do tempo, muitas vezes sem reflexão por parte daqueles que as cumprem. Porém, no tratamento de novas tarefas podem surgir problemas, pois, talvez, exista a carência de técnicas para a realização, por parte do sujeito e/ou instituição, de tarefas nos moldes das novas perspectivas propostas para o ensino. Devido a não aplicabilidade das técnicas habituais para o cumprimento de novas tarefas específicas, muitas vezes distantes das instituições estabelecidas como o Livro Didático, podem ocorrer problemas frente à discussão dos conceitos de FMC no EM. Para alcançar resultados relativos a essa tarefa é necessário transformar uma técnica antiga ou construir uma nova, devendo-se, essa nova maneira, ser organizada e incorporada na instituição (CHEVALLARD, 1999).

Para realizar a análise das práticas sociais, relacionada aos três pilares (sujeito, objeto e conhecimento), emprega-se a praxeologia. Para Chevallard (1999) a praxeologia é composta pela tarefa  $t$  e técnica  $\tau$ , ligadas por características prático-técnico (*savoir-faire*). Ao assumir que um tipo de tarefa faz parte de uma dada instituição, deve-se utilizar uma estratégia que vise refletir acerca de sua realização, ou seja, investiga-se a técnica, fazendo sublimar os outros aspectos dessa praxeologia em particular. Nesse sentido, o *savoir* conecta os discursos construídos na justificação de uma técnica relacionada à instituição. O conjunto de técnicas, tecnologias e teorias, empregadas na realização de certas tarefas ou tipos de tarefas, constitui uma praxeologia específica e o conjunto destas pode objetivar uma praxeologia geral que depende das relações, que estas possuem em comum, acerca de suas tecnologias, teorias e/ou aspectos institucionais, fomentando a construção de conhecimento. Esse conhecimento (saber) apresentará sua validade se fomentar a reconstrução de tipos de técnicas relacionadas a um saber-fazer específico. Ou seja, as características desse objeto estão relacionadas à descrição das práticas institucionais, reunidas em organizações praxeológicas.

Em suma, a Teoria Antropológica da Didática possui como conceitos principais; o objeto  $O$ , sendo um conceito, valor; os sujeitos  $X$ ,

pessoas envolvidas com o objeto e a instituição e, conseqüentemente, a instituição  $I$ , organização com métodos e regras particulares que impõe suas ideias e conhecimento aos sujeitos (KURNAZ, 2009). Nessa perspectiva existem duas formas de relação entre essas unidades estruturais e o conhecimento (objeto), ou seja, a Relação Pessoal e a Relação Institucional.

Um objeto  $O$  faz parte de uma instituição por meio de suas práticas, dessa forma sendo reconhecida por esta. Essa relação é simbolizada por  $RI(O)$  ou  $R(I,O)$ . Nas palavras de Chevallard (apud KURNAZ, 2009, p. 74).

Relação Institucional define coisas como: o que uma instituição faz com certo tipo de conhecimento, como esse conhecimento é usado e como ele foi processado, etc. Em suma, é toda a vida de um pedaço de informação gasto em uma determinada instituição. (KURNAZ, 2009, p. 74) – *tradução própria*.

Na Relação Pessoal um objeto  $O$  existe na mente de um sujeito  $X$ , o sujeito conhece o objeto e possui uma relação com este. Segundo Chevallard (apud. KURNAZ, 2009, p. 74).

A Relação Pessoal é definida como toda coleção de conhecimentos, destrezas, percepções e habilidades de uma pessoa sobre um assunto. Com uma visão mais ampla, é toda a relação entre o indivíduo e conhecimento. (KURNAZ, 2009, p. 74) – *tradução própria*.

Teoricamente, aprender pode ser definido como as mudanças pessoais que o sujeito  $X$  alcança em sua relação ao objeto  $O$ . Assim, um sujeito  $X$  entra em uma instituição  $I$  e sua Relação pessoal com o objeto  $O$ , simbolizada por  $R(X,O)$ , mudará frente à Relação Institucional de  $R(I,O)$ . Em outras palavras, a aprendizagem ocorrerá quando ocorrer essa mudança.

Nesse sentido, podem-se definir dentro da Teoria Antropológica da Didática, os principais elementos dessa investigação. O objeto refere-se à Teoria Quântica, os sujeitos são os estudantes e a instituição o Livro Didático utilizado na prática docente e proposto pelo PNLD.

Objeto ( $O$ )  $\Rightarrow$  Teoria Quântica  
Sujeito ( $X$ )  $\Rightarrow$  Estudante  
Instituição ( $I$ )  $\Rightarrow$  Livro Didático

Como mencionado anteriormente, essas relações podem ser investigadas por meio de um praxeologia que possui dois aspectos diferentes. A *práxis* referente à prática e o *logos* relacionado à teoria. Englobando  $[T, \tau, \theta, \Theta]$ . As questões de investigação sobre o ensino e estudo da Teoria Quântica e sua relação com possíveis transposições para EM, podem ser definidas. Porém, primeiramente, a fim de analisar a transposição didática dos Livros Didáticos do EM, deve-se, na perspectiva da Transposição Didática, definir alguns conceitos que servirão de aparato metodológico para essa pesquisa.

Ao voltar à atenção para o sistema educativo, observa-se que este deve carregar consigo muitas expectativas da sociedade. Para Chevallard o sistema didático fundamenta-se em três pilares: o saber, aquele que ensina e aquele que aprende. Para esse autor o saber de sala de aula é diferente do científico. O saber que se pretende ensinar em sala de aula sofre uma transformação, pois os objetivos da comunidade científica e da escola são diferentes. O saber produzido pela Ciência deve ser difundido na comunidade científica e, conseqüentemente, na sociedade. Nesse processo, alguns conhecimentos são escolhidos para serem instruídos em sala de aula, sendo sociabilizados pela instituição escola.

A Transposição Didática refere-se à transformação do saber de uma instituição à outra, e carrega consigo influências da *Noosfera*, sendo esta formada por pesquisadores, técnicos, professores, ou seja, todos aqueles ligados a alguma instituição: universidades, Ministério de Educação, Redes de Ensino, etc. Muito do trabalho da noosfera pode ser observado nos Parâmetros Curriculares Nacionais. Nesse processo de transformação o saber científico modifica-se e se torna saber a ser ensinado e, finalmente, saber ensinado. O saber ensinado refere-se ao que é ministrado pelo professor em sala de aula. De forma mais completa, segundo a teoria de Chevallard, o saber sábio sofre uma transformação validada pelos sujeitos da noosfera – chama-se essa parte de transposição didática externa – convertendo-se, assim, em saber ensinável, que é esculpido pelas orientações curriculares, parâmetros. Posteriormente, o saber ensinável transforma-se em *saber a ser ensinado*, sendo concretizado no Livro Didático.



A noosfera é incumbida de realizar a interface entre as esferas de produção dos saberes e a sociedade. Nesse entorno social estão incluídos os Físicos, os estudantes e familiares, assim como as instâncias políticas de decisão. Assim, a noosfera viabiliza o aperfeiçoamento, visando à harmonia entre o sistema didático e o meio social, e essa harmonia, segundo Chevallard, depende de encontrar um ponto equidistante entre o saber sábio e o saber “banalizado”, acessível aos estudantes sem a mediação escolar. Nesse sentido, a noosfera trabalha na seleção da transposição didática dos conteúdos com o objetivo de encontrar esse equilíbrio.

Isto significa que os textos didáticos são frutos de uma praxeologia institucional, que visa ensinar um dado conhecimento e estabelecer uma praxeologia para os educandos. Ou seja, a instituição de ensino desenvolve a sua tarefa a partir de uma concepção teórica sobre o que é o saber relevante, e sobre uma concepção sobre o que é o estudante. Essa concepção teórica embasa as suas justificativas (teoria e tecnologia) para a escolha de técnicas que formatam esse saber num saber com características didáticas, e que traz em seu bojo as escolhas teóricas e as atividades, perguntas, questões, tarefas que devem ser enfrentadas pelos educandos. Esse saber didatizado é expresso tanto através de textos descritivos e explicativos, em geral retrabalhados pelos professores em sala de aula, assim como através da instrução de técnicas que instrumentalizam o sujeito a enfrentar as questões e tarefas didáticas. O compromisso didático impõe que haja uma congruência entre as tarefas e o saber a ser ensinado, assim como um compromisso com o momento de devolução quando o sujeito ele mesmo se apropria desse conhecimento e expressa aquilo que aprendeu. Nesse sentido, a análise praxeológica dos textos, das tarefas e atividades pode dar clareza sobre o que é esse saber a ser ensinado escolhido institucionalmente.

Com a apresentação dos dois capítulos anteriores pode-se melhor descrever como será feita essa pesquisa. Ou seja, dentro da perspectiva delineada até agora se aponta, dentro da metodologia exposta a seguir, como se procedeu para a extração das informações e análise destas para a construção dessa dissertação.



## 4 METODOLOGIA

O objetivo central da dissertação é investigar como é abordado o conhecimento sobre a Física Quântica presentes nos livros didáticos do Ensino Médio. Dessa maneira, pressupõe-se que tais livros, por fazerem parte do Programa Nacional do Livro Didático, exibam as principais características da transposição didática dos conhecimentos de Física Moderna e Contemporânea para Ensino Médio norteado pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2002). Diferentemente dos consagrados temas de Mecânica, Termodinâmica ou Eletromagnetismo não existe um programa claramente estruturado para a FMC. Assim, é realizada, em primeiro lugar, uma análise global em que se investiga a escolha dos tópicos e a estruturação do programa didático de cada livro, assumindo que qualquer instituição de ensino tem como objetivo, e como questão central, o problema de como ensinar certo saber. E há na realização desse problema a transformação do saber (transposição didática) que se materializa nas manifestações textuais, nas atividades e tarefas propostas aos professores e pelos professores aos estudantes. Tudo isto delimitados pelo quadro institucional da escola.

Por outro lado, a instituição escola é ligada a um quadro institucional mais amplo. No que tange ao ensino de Física Moderna no Ensino Médio, considera-se nessa pesquisa que os livros textos aprovados pelo PNLD são manifestações institucionais daquilo que se espera e pretende-se nas escolas de Ensino Médio ao longo do país. Obviamente a atividade de ensino não se restringe ao livro didático, mas este serve de parâmetro para a definição dos programas escolares e para definição do saber a ser ensinado. Dessa maneira, para um estudo institucional, o livro didático é adequado visto que transcende uma particular sala de aula, contudo, também existem limitações do mesmo dentro do processo didático, mas esse recorte particular define um domínio de investigação relevante para melhor compreensão sobre o ensino de Física Moderna no Ensino Médio.

A análise praxeológica dos textos de instrução dos livros didáticos e das tarefas que os acompanham foi realizada visando identificar o percurso didático dos tópicos dos capítulos que tratam da Física Quântica, e, também, identificar como o texto e os exercícios propõem o saber a ser ensinado. Portanto, o foco é objetivado na análise das manifestações textuais, isto é, no texto propriamente dito (saber transposto) e nas atividades e tarefas propostas que, a princípio, definem como e o que o

educando deve aprender.

Na análise dois aspectos estão interligados, o corpo do texto e corpo das atividades propostas. O corpo do texto exhibe as escolhas tanto dos aspectos teóricos, como das técnicas que os autores dos livros didáticos acham relevantes. Além das escolhas dos fenômenos, teorias, modelos, experimentos e conceitos existem as escolhas de como transpor tais conteúdos para o livro didático. Essas escolhas, que conformam o saber a ser ensinado, envolvem seleções de desenvolvimentos narrativos, analogias, a utilização de instrumentos formais e de técnicas que, como diz Chevallard (1999), mantém uma distância adequada do saber sábio e uma proximidade, também, adequada dos conhecimentos e possibilidades do estudante.

Para isto, primeiramente, é descrito o texto presente no livro didático, ou seja, infere-se sobre o *savoir*, a teoria, o conhecimento que o livro fornece, e de que maneira aborda o saber a ser ensinado. Posteriormente são analisados os exercícios, isto é, a *faire*, as práticas das tarefas e como estas se relacionam com o texto, fechando, assim, o conjunto *savoir-faire* (saber-fazer). O estudo do corpo do texto nos permite investigar a praxeologia que os autores utilizam para tratar o problema de ensinar um dado objeto. Outro aspecto é o corpo de atividades propostas, exercícios, problemas e em alguns casos trabalhos e projetos. A análise das atividades permite formar um quadro mais claro sobre quais aspectos teóricos, conceituais e/ou fenomenológicos são considerados relevantes. A análise praxeológica das atividades permite sublinhar os aspectos teóricos, as tecnologias e as técnicas que de fato são exigidas dos estudantes, configurando, assim, o saber a ser ensinado.

Em suma, a metodologia da TAD nos permite inferir em cada livro a proposta de transposição institucional. Isto é, do ponto de vista metodológico, através da análise da praxeologia didática escolhida, foi possível clarificar qual é o saber a ser ensinado definido nos livros textos, considerando este saber como o saber institucional. Nesse sentido, a análise praxeológica visa dar um quadro fidedigno das escolhas institucionais. Não se planeja, assim, emitir juízos de valor a respeito dessas escolhas, mas sim evidenciá-las.

Por outro lado, as escolhas são feitas a partir de um saber sábio e de saberes de referência. Portanto, para identificar escolhas é necessário, metodologicamente, que se estabeleçam parâmetros de referência e alguns parâmetros metodológicos para a análise.

#### 4.1 ELEMENTOS PARA ANÁLISE PRAXEOLÓGICA DO TEXTO

Um saber a ser ensinado tem como referência, no caso específico da Física, certo saber sábio. O saber sábio está em geral sintetizado nas grandes teorias da Física, como aparecem em seus tratados, manuais, artigos científicos e em sua história. Essas sínteses teóricas estabelecem o saber que leva o selo da instituição científica como saber sábio. Frequentemente, esse saber é reescrito e se torna o saber estabelecido, que leva a chancela da instituição científica.

De forma quase axiomatizada não se tem neste (saber sábio) o registro do longo processo histórico de construção. Ou seja, apenas de forma implícita o saber sábio contém as concepções que contribuíram teoricamente para resolução das questões postas. Essa síntese nem sempre apresenta o histórico dos desenvolvimentos das teorias ou das técnicas empregadas na resolução dessas questões. As concepções filosóficas, sociais e questões de natureza epistemológica estão muitas vezes implícitas. Em outras palavras, deve-se frisar que além da síntese presente nas teorias da Física, o saber sábio traz implicitamente outros conhecimentos e saberes. Esses conhecimentos podem ser relevantes para o ensino, afinal são saberes importantes na formação de cientistas, professores e cidadãos.

Em relação ao ensino a relevância dada a esses conhecimentos e saberes depende de escolhas institucionais que são explicitadas nas propostas de transposição didática. Assim, os objetivos da escola envolvem definições institucionais sobre o que deve ser ensinado, e isto implica que as escolhas institucionais têm referência não apenas no saber sábio no *stricto sensu*, mas também no *latu sensu*, isto é, nas dimensões históricas, sociais e epistemológicas, e nas suas relações com outros saberes e instituições.

Metodologicamente, para um investigador, é importante ter em mente as dimensões históricas, epistemológicas e as relações com outras instituições e/ou organizações didáticas para perceber no processo de transposição didática as escolhas e os recortes. Mas é importante frisar que as justificativas das escolhas na transposição vão além do saber sábio, e envolvem critérios outros que não o conhecimento estabelecido e sua história, como, por exemplo, as preferências dos autores dos livros didáticos.

No tratamento do fenômeno da radiação do corpo negro, pode-se investigar se os autores fizeram descrições ou simplesmente relatos. Por

exemplo, uma descrição do fenômeno poderia ser feita com a colocação das características físicas principais – um corpo aquecido se torna incandescente – isto é, um objeto emite radiação luminosa que se modifica com a temperatura. Caberia, também, uma descrição da variação da cor preponderante com o aumento da temperatura. Nessa descrição poderia ser utilizada a noção de que a emissão de luz é uma perda de energia, que se o corpo é mantido a uma dada temperatura, a radiação luminosa se mantém com o mesmo aspecto, indicando que a sua cor preponderante está ligada à temperatura. Poderia, ainda, haver uma descrição sobre a origem dessa radiação nas cargas oscilantes no interior da matéria, colocando, assim, mais um aspecto importante relacionado ao papel da estrutura da matéria no fenômeno. Ou seja, utilizando essas ideias, pode-se investigar a transposição didática e explicitar quais técnicas relacionadas à Física – experimento, modelos teóricos, formalismo matemático e conceitos – são utilizadas na abordagem do fenômeno. Os relatos do fenômeno estão ligados a aspectos mais informativos quanto trazem a definição de forma direta, como, por exemplo, ao enunciar o conceito de corpo negro de Kirchhoff. E, assim, aspectos mais formativos quando envolvem desde argumentações conceituais, demonstrações a desenvolvimentos formais.

Continuando com o exemplo da radiação de corpo negro, podem ser abordadas as anomalias do estudo da radiação térmica, as perspectivas clássicas relacionadas ao Eletromagnetismo, Termodinâmica, Lei da equipartição da energia, Lei de deslocamento de Wien, ou somente o gráfico da radiação em função do comprimento de onda e a relação formal. Ou, ainda, todos esses aspectos. Em outras palavras, procurou-se, também, sublimar os instrumentos que a Física utiliza para construir o conhecimento. Obviamente não se tentou procurar todos os aspectos que essa Ciência emprega para investigar o seu objeto, mas salientar as características que os livros didáticos possuem sobre esses aspectos.

Dentre as escolhas transpositivas, podem ser privilegiadas, também, técnicas formais, visando, sobretudo, aumentar a bagagem instrumental do estudante dentro do contexto mais amplo de sua formação. Em outras palavras, certas técnicas formais são pré-requisitos para conhecimentos futuros. Nesses casos a compreensão do fenômeno pode se tornar um pano de fundo.

Ao mesmo tempo em que não se pode julgar positiva ou negativamente, cabe-se explicitar a escolha didática feita. O autor do livro e/ou da instituição pode supor que nessa fase (EM) o estudante deve

apenas saber que o corpo negro se refere ao fato de que um corpo aquecido emite radiação de cores diferentes dependendo da temperatura. A investigação nos permite explicitar essa escolha. Em outras palavras, extrai-se com máxima fidedignidade possível o que é o saber a ser ensinado, e como é proposto pela instituição.

#### 4.2 ELEMENTOS PARA ANÁLISE PRAXEOLÓGICA DAS TAREFAS

Para classificar os exercícios foram criadas classes chamadas *categorias das tarefas* que consideram o saber, conceito e/ou conhecimento que se pretende ensinar, por exemplo, efeito fotoelétrico, dualidade, relevando a ação envolvida em cada tarefa.

Para realizar as *categorias das tarefas* – resolver os exercícios e atividades – são considerados os seguintes características. Assim, segundo a Teoria Antropológica da Didática ao se cumprir uma tarefa é preciso realizar alguma ação, ou seja, uma técnica como calcular, plantar, analisar. Dessa forma, o sujeito ao realizar alguma tarefa, o faz utilizando uma ou várias técnicas que derivam de uma tecnologia e, conseqüentemente, uma teoria. A técnica está relacionada ao problema que a tarefa procura resolver e como. As técnicas propostas para resolver os exercícios (tarefas) dos Livros Didáticos são chamadas de **relatar, relacionar, cálculo, interpretação de dados e gráfico.**

A técnica chamada de **relatar** possui como definição geral resumir por escrito o conteúdo do processo de resolução da tarefa e, ainda, para a resolução empregar os conhecimentos expostos no livro didático ou mesmo na tarefa. Ou seja, trata-se de ler e transcrever as informações do texto didático.

A técnica nomeada de **relacionar** possui como característica construir uma relação, ou seja, estabelecer uma ligação entre alguma coisa e outra por meio da qual se dá a resolução frente a diversas representações, de modo a comparar objetos do conhecimento entre si, presentes nas tarefas e no texto do livro didático para estabelecer um caminho para solução da tarefa. Isto é, solucionar a tarefa por meio do raciocínio e reflexão, indo, assim, além da leitura e cópia do texto.

A técnica **cálculo** define-se, de forma geral, como a quantificação das informações da tarefa por meio da utilização de equações matemáticas. Essa técnica apresenta-se na prática como a ação de calcular as incógnitas do exercício para sua realização.

A técnica **interpretação de dados**, no geral, apresenta-se, associada à interpretação dos resultados encontrados na realização da tarefa. No sentido geral, a interpretação pode ser definida como a possibilidade de referência de um signo e ao que este se designa, ou, também, a operação por meio da qual um sujeito estabelece uma ligação com o seu objeto. Em outras palavras, a interpretação não é somente tomar conhecimento de que se compreendeu ou resolveu o cálculo, mas elaborar as possibilidades projetadas na compreensão ao interpretar o resultado alcançado.

A técnica chamada de **gráfico** possui para sua realização a construção ou esboço de um gráfico ou diagrama a partir dos resultados do problema.

Dessa maneira, após a classificação das *categorias das tarefas* e a inferência das técnicas empregadas para resolvê-las, foi possível mensurar os *tipos de tarefas* mais frequentes associadas às técnicas. Ou seja, foi possível determinar a praxeologia específica de cada livro didático, visando encontrar um praxeologia geral que engloba tanto o texto didático quanto as tarefas.

#### 4.3 ELEMENTOS PARA A APRESENTAÇÃO DOS LIVROS DIDÁTICOS DO PNLD

O principal objetivo do Programa Nacional do Livro Didático é subsidiar o trabalho pedagógico dos professores. Nesse sentido, o Ministério da Educação realiza a avaliação das obras submetidas à análise, publica uma lista com as coleções consideradas aprovadas e encaminha um guia para as escolas. As escolas, por sua vez, escolhem os títulos que mais se adequem às suas necessidades pedagógicas. O programa funciona em ciclos de três anos.

A tabela 1 apresenta os Livros Didáticos do Ensino Médio que são analisados. Esses livros são distribuídos gratuitamente pelo Governo Federal. A lista dos livros para o Ensino de Física apresenta o total de dez opções de título (anexo A). Contudo, são analisados cinco livros referentes aos anos de 2012, 2013 e 2014. Na construção dessa dissertação foram reunidos sete dos livros expostos no anexo A e os cinco livros analisados foram escolhidos aleatoriamente. Na descrição do texto didático foi respeitada a ordem e os nomes dos tópicos expostos nos livros. Primeiramente, dentro do que o texto pretende instruir, criaram-se categorias referentes aos fenômenos físicos e seus conceitos.



Posteriormente, é apresentada a categorização das tarefas, também relevando o que cada uma delas pretende ensinar, e técnicas propostas para resolução dessas tarefas. E por último são descritas as conclusões sobre cada Livro Didático.

	Título	Autores	Código	Editora
Livro Didático 1	CURSO DE FÍSICA	Antônio Máximo; Beatriz Alvarenga.	25041COL22	Scipione
Livro Didático 2	COMPREENDE-DO A FÍSICA	Alberto Gaspar	25041COL22	Ática
Livro Didático 3	CONEXÕES COM A FÍSICA	Blaidi Sant'Anna; Hugo Carneiro Reis; Gloria Martini	25050col22	Moderna
Livro Didático 4	QUANTA FÍSICA	Luís Carlos de Menezes; Osvaldo Canato Júnior; Carlos Aparecido Kantor; Lilio Alonso Paoliello Junior; Marcelo de Carvalho Bonetti; Viviane Moraes Alves	25063col22	PD
Livro Didático 5	FÍSICA	Gualter José Biscuola; Newton Villas Bôas; Ricardo Helou Doca;	25065col22	Saraiva

Tabela 1. Livros Didáticos de Programa Nacional do Livro Didático submetidos à análise.



## 5 LIVRO DIDÁTICO 1 – CURSO DE FÍSICA

O Livro Didático 1 (Curso de Física) é um dos livros aprovados pelo Ministério da Educação e distribuído nas unidades escolares em todo o Brasil. Esse exemplar possui três volumes referentes aos três anos do Ensino Médio. Os conhecimentos relacionados aos conceitos de Física Moderna e Contemporânea encontram-se no volume 3. A apresentação da análise seguiu a sequência dos tópicos expostos no livro didático, e o título de cada tópico está em *itálico*. Assim, foi investigado como o texto aborda os fenômenos quânticos, considerando que parte da teoria e experimentos são discutidos e trabalhados. São ressaltados os conceitos, modelos, formalismos matemáticos e experimentos apresentados pelos autores.

Nesse sentido, é investigado como o Livro Didático 1 trabalha os conceitos relacionados aos fenômenos quânticos, infere-se sobre o texto e os exercícios, pois ambos fazem parte da proposta didática do livro.

Para apresentar essa análise, primeiramente, foram categorizados, a partir do texto do livro didático, os saberes que este aborda, trazidos como título, em negrito, das seções a baixo. Como já mencionado, buscou-se evidenciar quais fenômenos são explorados pelo texto. Dentro da cada seção são descritas considerações sobre a abordagem do texto sobre um fenômeno específico, relevando como são exploradas as partes da Teoria.

### 5.1 RADIAÇÃO TÉRMICA

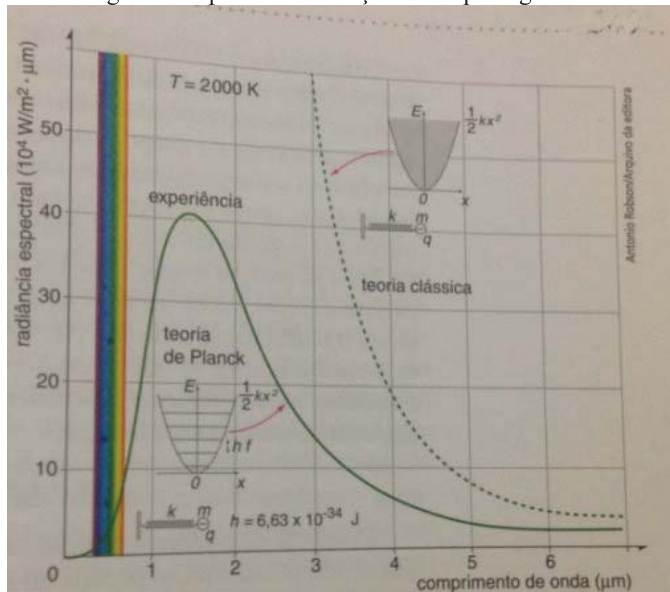
#### *Problemas que Levaram ao Surgimento da Física Quântica*

Os problemas em relação aos resultados experimentais e as teorias existentes no final do século XIX, como a radiação de corpo negro, o efeito fotoelétrico e o espectro de linhas emitidas pelos gases, são citados. São apontadas que as inconsistências das teorias da época, para explicar os fenômenos estudados, levaram os físicos a construírem outras hipóteses, fomentando a origem de Física Quântica. Sendo atribuído, no texto, a Max Planck (1858-1947) o “nascimento” dessa nova teoria. Cita-se que o nome quântico está relacionado à característica que algumas grandezas físicas possuem de assumirem somente valores discretos, que até esse período somente se mensuravam valores contínuos, por exemplo, de energia.

### Teoria do Corpo Negro

O texto começa mencionando os estudos experimentais de Josef Stefan (1835-1893), Ludwig Boltzmann (1844-1906) e Wien sobre o espectro eletromagnético de corpo negro, citando o modelo da cavidade e uma analogia ao radiador térmico ideal. A figura 1 mostra um dos resultados mencionados.

Figura 1. Espectro da radiação de corpo negro



(MÁXIMO; ALVARENGA, 2010, p. 349)

O discurso começa afirmando que tais resultados estavam em desacordo com as teorias da época e que muitos físicos tentaram solucionar o problema, mas foi Max Planck que o fez. Fala-se que Planck tratou os átomos como osciladores harmônicos ao assumir que a energia destes é distribuída estatisticamente conforme a temperatura. E, também, supôs que esses osciladores só podiam apresentar valores discretos de energia e estados igualmente separados. Nesse sentido, as previsões teóricas e os resultados experimentais se encaixaram. Sendo possível assim, segundo o texto, concluir que a energia é quantizada. Também é apresentada a constante de Planck.

*Max Karl Ernst Ludwig Planck*

Parte que contém aspectos, gerais e bem resumidos, sobre a vida de Planck como seu trabalho em Termodinâmica, radiação de corpo negro, seu apoio à teoria de Einstein da Relatividade e sobre o período que passou na Alemanha na Segunda Guerra.

### **5.1.1 Considerações**

Nesse sentido, pode-se inferir que os problemas teóricos e experimentais que levaram a construção da Teoria Quântica são apresentados de forma resumida. É mencionado que as primeiras ideias foram elaboradas para explicar resultados empíricos. E essa explicação teórica ganhou, com o tempo, mais evidências. Segundo o texto a ideia fundamental que possibilita o entendimento dessa nova teoria é que “[...] a natureza possui um comportamento tanto ondulatório como corpuscular, alterando em função do contexto no qual ela se apresenta.” (MÁXIMO; ALVARENGA, 2010, p. 348).

Para a radiação de corpo negro é utilizado o modelo da cavidade que poderia servir de ferramenta para o estudo do comportamento fenomenológico a partir da simplificação do objeto real, um pedaço de metal aquecido, até chegar ao conceito de corpo negro. Contudo, o modelo da cavidade é apenas citado, recorrendo às conclusões dos resultados experimentais e ao exemplo do radiador térmico ideal para expor a discrepância entre esses resultados e as previsões teóricas. Em seguida introduz-se a relação formal para a energia e a constante de Planck juntamente com a hipótese dos osciladores harmônicos para explicar a experiência. O livro traz, ainda, um breve relato sobre a vida Max Planck.

Dessa maneira, para ensinar a radiação térmica são recorridos ao: modelo da cavidade, a analogia com um radiador térmico ideal, o gráfico da radiação espectral em função do comprimento de onda, o modelo dos osciladores harmônicos e a relação formal ( $E = hf$ ). Menciona-se a dissonância entre os resultados experimentais e a previsão teórica, embora não se fale da Lei da equipartição da energia e da Termodinâmica que é violada por esses resultados, sendo utilizado o gráfico para abordar essa discrepância.

## 5.2 EFEITO FOTOELÉTRICO

### *Efeito Fotoelétrico*

“Outro problema experimental sem explicação era o efeito fotoelétrico.” (MÁXIMO; ALVARENGA, 2010, p. 350), dessa forma inicia-se o tópico. Menciona-se que os elétrons de um metal estão presos devido à força de atração, sendo representado no texto o elétron em uma barreira de potencial. Sobre esse fenômeno o livro relata que a incidência de fótons (luz) sobre um metal arranca elétrons deste e que, segundo a Teoria Eletromagnética, a quantidade de elétrons é proporcional à intensidade dos fótons.

Em seguida o texto cita que a ideia de quantum de luz atribuída a Albert Einstein (1879-1955) é relacionada a duas evidências experimentais. A primeira em relação à energia da luz e à frequência, e a segunda referente à hipótese da quantização da energia de osciladores harmônicos, proposta por Planck. É descrita e apresentada, também, a expressão matemática para o efeito fotoelétrico e para a função trabalho.

### **5.2.1 Considerações**

No efeito fotoelétrico para representar os elétrons presos ao metal utiliza-se o modelo da barreira de potencial. Os resultados experimentais mostram que a emissão dos elétrons do metal está relacionada à frequência da luz incidente sobre este, e não à intensidade da luz. Menciona-se que a função trabalho precisa ser vencida para arrancar elétrons do metal, expondo-se com esse argumento a equação formal para o efeito fotoelétrico. Dessa forma, o livro propõe o percurso didático para instrução do conhecimento relacionado ao efeito fotoelétrico.

Em suma, o efeito fotoelétrico é tratado a partir da discordância experimental e teórica, porém o livro não a investiga, somente a define. Utiliza-se, então, o modelo da barreira de potencial para explicar o elétron ligado ao metal. Relata-se o fenômeno, assim como a hipótese de Einstein e a relação matemática. Basicamente, a partir da lei de conservação de energia utiliza-se a definição formal da energia do fóton e a energia do elétron para encontrar-se a função trabalho.

Para a abordagem do efeito fotoelétrico são usadas para o ensino: a barreira de potencial, o modelo dos osciladores e a relação formal para energia em função da energia do fóton e da função trabalho. É citada a lei

da conservação de energia e o Eletromagnetismo que não explicava os resultados experimentais.

### 5.3 MODELO ATÔMICO

#### *Espectro de Linhas*

O discurso começa citando Joseph Von Fraunhofer (1787-1826), a descoberta das linhas escuras, suas posições no espectro solar e a comparação com as linhas espectrais de um gás incandescente. Assim, relacionam-se as linhas espectrais como características dos elementos químicos, mencionando que cada um desses elementos dispõe de linhas espectrais específicas.

Para o átomo de hidrogênio cita-se que Johann Jakob Balmer (1825-1898) descobriu, a partir da experiência, uma expressão matemática que fornece a posição das linhas no espectro visível. Os autores referem-se à questão que surgiu em relação ao estudo do espectro.

A questão agora, no início de século XX, era entender por que um átomo de um gás só emite luz em algumas poucas frequências do espectro, formando um conjunto discreto, e não contínuo de linhas. (MÁXIMO; ALVARENGA, 2010, p. 352).

O texto explica que, de acordo com “o eletromagnetismo de Maxwell”, quando o elétron girasse em volta do núcleo, este deveria irradiar energia devido a uma aceleração centrípeta. Nesse sentido, o elétron perderia energia, cairia no núcleo e apresentaria um espectro contínuo. Uma hipótese para solucionar esse problema foi proposta por Niels Bohr, nas palavras do texto:

[...] Bohr conseguiu mostrar que a energia dos elétrons orbitando o núcleo do átomo de hidrogênio era quantizada. O elétron só poderia permanecer em níveis de energia dados por um número inteiro maior que zero, chamado de número quântico  $n$ . (MÁXIMO; ALVARENGA, 2010, p. 352).

*Niels Henrik David Bohr*

Essa parte do texto descreve de forma muito breve aspectos da vida de Bohr, principalmente, em relação aos seus trabalhos de pesquisa, mencionando o princípio da complementaridade, dualidade onda-partícula e princípio da incerteza.

### 5.3.1 Considerações

A abordagem do modelo atômico inicia-se com o exemplo do espectro solar. Compara-se, então, o espectro solar com as linhas espectrais para o modelo de um gás incandescente. Apresenta-se a equação matemática para a posição das linhas no espectro visível para o átomo de hidrogênio. Assim, chega-se à conclusão de Bohr que a energia dos elétrons orbitando o núcleo do átomo de hidrogênio é quantizada. O discurso didático desdobra-se com a exposição do problema, relata, brevemente, a experiência e, então, fornece a solução. Novamente, o texto apresenta uma breve descrição sobre a vida de outro físico, dessa vez de Niels Bohr.

Para o ensino do modelo atômico são usadas: o exemplo do espectro solar, o modelo de um gás e a relação formal para as bandas de energia do espectro do hidrogênio. Menciona-se, também, o Eletromagnetismo.

## 5.4 DUALIDADE

### *O Fóton*

Os problemas relativos à classificação da luz como onda ou partícula são relatados no início dessa parte juntamente aos trabalhos de Isaac Newton (1643-1727), Christian Huygens (1629-1695), Thomas Young (1773-1829), James Clerk Maxwell (1831-1879) e Einstein. Brevemente, o texto conclui que em algumas situações experimentais a luz se comporta com ondas e em outras situações como partícula, não possuindo esses dois comportamentos simultaneamente. A energia dos fótons, na equação  $E = hf$ , é apresentada e, também, a expressão para a potência e para a energia de um feixe de  $N$  fótons.

### *Ideias Básicas da Física Quântica*

#### *O Comprimento de Onda de De Broglie*



Iniciando outro capítulo, mas, ainda, tratando sobre a dualidade, o livro didático expõe que a dualidade onda-partícula acarretou certo desconforto na comunidade científica do início do século XX, pois a interpretação do efeito fotoelétrico feita por Einstein mostrava a luz como partícula (fóton). O texto aponta que Louis De Broglie (1892-1987) estendeu a interpretação dual para todas as partículas microscópicas e macroscópicas, e, também, generalizou a equação de Einstein da quantidade de movimento e comprimento de onda.

As experiências de difração de elétrons, nêutrons e prótons são citadas para afirmar que a hipótese de De Broglie estava correta, assumindo no texto que com o comportamento ondulatório para a Física Quântica foi possível entender a quantização.

Nesse sentido, o texto usa de exemplo ondas em cordas ou tubos e seus modos de vibração, mencionando que para cada modo está associada uma frequência de vibração discreta. Assim, por analogia, refere-se aos estados quânticos quando uma partícula está confinada por alguma energia potencial e seus níveis discretos de energia.

#### *Louis Victor Pierre Raymond De Broglie*

Breve relato sobre De Broglie referente à sua tese de doutorado em relação à generalização do comportamento dual para as demais partículas materiais. Menciona-se também Schrodinger e sua equação e a interpretação probabilística de Born.

#### *A Função de Onda $\Psi$ e a Descrição Probabilística*

O texto afirma que com a hipótese de De Broglie, sobre ondas de matéria e as evidências da natureza ondulatória dos objetos microscópicos, seria preciso criar uma teoria para explicar o comportamento da matéria. A partir desse discurso menciona-se a equação de Schrodinger e o conceito de função de onda, assumindo, no texto, que o problema estaria em interpretar essa função.

A relação proposta por Max Born (1882-1970) entre a função de onda e a probabilidade de se encontrar a partícula é citada. O texto expõe que uma consequência dessa relação é a evidência de um caráter probabilístico para a natureza.

Em relação à função de onda  $\Psi$  menciona-se sua característica de ser contínua no espaço e que as informações sobre a partícula, suas interações e estado quântico podem ser conhecidos por meio dessa função. É explicado, também, que o quadrado da amplitude da função de

onda espacial fornece a probabilidade de se encontrar uma partícula num certo ponto do espaço.

#### *Erwin Rudolf Josef Alexander Schrodinger*

Breve relato pessoal sobre Erwin Schrodinger (1887-1961), sendo mencionada sua equação para descrever a natureza ondulatória da matéria, a equivalência com seus resultados, a formulação matricial de Heisenberg e sua indisposição com o regime nazista.

#### *Max Born*

Pequeno texto com aspectos familiares e acadêmicos de Born e sua participação na Primeira Guerra Mundial. Parcerias musicais com Einstein, trabalhos conjuntos com Heisenberg e Linus Pauling (1901-1994) são citados, além de sua interpretação para a função de onda e seu abandono da Alemanha na Segunda Guerra Mundial.

### **5.4.1 Considerações**

Para explicar o conceito de fóton resgatam-se as ideias de Einstein sobre o efeito fotoelétrico como evidência corpuscular, além das perspectivas de Newton, Huyghens, Young e Maxwell para explicitar a característica ondulatória. Assim, com um conciso relato mencionam-se as dificuldades em classificar a luz. Concluindo que às vezes a luz apresenta-se como onda e às vezes como partícula. Novamente, expõe-se uma relação formal para o cálculo da energia do fóton em função da constante de Planck e da frequência.

Dessa forma, o percurso didático parte do modelo de Einstein de partículas de luz e chega à hipótese de De Broglie sobre as ondas de matéria. Utiliza-se a experiência de difração de elétrons para afirmar que essa hipótese está correta. O texto apresenta o modelo de ondas em uma corda e assim explica os modos de vibração na corda com as extremidades fixas e valores discretos de vibração relacionados á frequência. O modelo de barreira de potencial é citado para estender os modos de vibração na corda para os valores discretos de energia para o caso quântico.

Dentro do conceito de dualidade define-se, resumidamente, o conceito de função de onda, sendo exposta informativamente a densidade de probabilidade. Não são explicadas as relações da função de onda com a construção do modelo atômico, as formas dos orbitais assim como a densidade de probabilidade em cada orbital.

Para poder expor a natureza ondulatória da matéria remete-se a equação de Schrodinger e o conceito de função de onda. Embora a expressão matemática não seja mostrada. O caráter probabilístico da função de onda, os estados quânticos possíveis e a probabilidade de se encontrar o elétron são usados para descrever o conceito, porém não são relacionados diretamente ao átomo. São expostos, também, relatos sobre a vida dos físicos De Broglie, Schrodinger e Born.

Nesse sentido, para instruir a dualidade são utilizadas: as evidências experimentais para apresentar o caráter ondulatório, o efeito fotoelétrico para expor o caráter corpuscular, a hipótese de De Broglie corroborada pela experiência de difração de elétrons, a relação formal para as ondas de matéria e a analogia com ondas em uma corda. E de forma informativa são abordados o conceito de função de onda e a densidade de probabilidade

## 5.5 PRINCÍPIO DA INCERTEZA

### *O Princípio da Incerteza de Heisenberg*

O princípio da incerteza é apontado como um dos resultados mais importantes da Física contemporânea, sendo que nunca foi violado. Apresenta-se esse resultado como uma limitação em conhecer simultaneamente e com precisão exata certas propriedades, por exemplo, a posição e a quantidade de movimento de uma partícula. É mostrada, também, a relação matemática para essas grandezas.

Uma consequência desse princípio, apontado no texto, refere-se à inexistência de trajetória bem definidas nesses sistemas (átomos). Assim, o conceito de órbita foi substituído pelo conceito de orbital. Fala-se que esse orbital é representado por uma nuvem de probabilidade que está relacionada com a função de onda e à densidade de probabilidade. Outra característica exposta é a natureza ondulatória quando um feixe de partículas é difratado por um orifício. Cita-se um feixe de fótons e a incerteza em relação às posições dos fótons antes de atravessar o orifício, e sobre a diminuição dessa incerteza quando o feixe o atravessa. É, também, atribuído ao princípio de Heisenberg a explicação da estabilidade eletrônica.

Em uma perspectiva filosófica os autores afirmam que o princípio da incerteza acabou com o determinismo newtoniano. Podendo entender esse princípio como, “[...] decorrente da influência do observador no seu

objeto observado.” (MÁXIMO; ALVARENGA, 2010, p. 362). No texto é apontado um limite de precisão experimental para sistemas microscópicos, no sentido que devemos perturbá-los para conhecê-los, e essa perturbação muda o sistema.

### *Werner Karl Heisenberg*

Nessa seção relata-se, brevemente, que Werner Heisenberg (1901-1976) trabalhou junto com outros físicos como Bohr, Born, Einstein e Pauling. Cita-se sua criação de uma formulação matemática utilizando matrizes para a Teoria Quântica e o princípio da incerteza. Também se relatam suas dificuldades durante a Segunda Guerra Mundial.

### *Princípio da Incerteza e Largura de Banda*

O texto menciona que a ideia relacionada ao princípio da incerteza e o estudo de ondas feito por Joseph Fourier (1768-1830) mostram que a duração de um pulso e sua largura de banda são expressos pela relação matemática.

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq 1/4\pi \quad (1)$$

Ao se multiplicar ambos os termos da desigualdade acima pela constante de Planck  $h$ , obtém-se:

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq h/4\pi \quad (2)$$

Sendo a equação acima a relação do princípio de Heisenberg em função da energia e tempo. Que segundo o texto é consequência direta da natureza ondulatória de Física Quântica.

### **5.5.1 Considerações**

Os resultados da medição experimental e da incerteza ao se mensurar uma grandeza macroscópica como a velocidade e o momento são usados como analogias. A partir dessa definição fenomenológica apresenta-se o princípio da incerteza e suas relações matemáticas. São apresentadas, também, as relações matemáticas ligadas à largura de banda.

Os autores afirmam que "[...] se ganharmos informação sobre a quantidade de movimento, a natureza nos proibirá saber sua posição com

exatidão.” (MÁXIMO; ALVARENGA, 2010, p. 362). Assim, observa-se o princípio da incerteza associado à interpretação probabilística e à difração de um feixe de elétrons, depois se fala das questões filosóficas e, posteriormente, do problema da medida. Aponta-se que a incerteza estaria ligada, por analogia, a um limite de precisão experimental.

O texto traz, também, a equação relacionada ao resultado da teoria de Fourier sobre ondas, mencionando grandezas como o pulso de onda (que não foi discutido nem descrito e da largura de banda que, também, não foi descrita), à frequência e a duração do pulso. O texto apenas manipula a equação e multiplica-a pela constante de Planck  $h$ , chegando, assim, à fórmula de Heisenberg. Assumindo, assim, estabelecer de forma clara que o princípio de Heisenberg é consequência da natureza ondulatória. Informações sobre a vida de Heisenberg são apresentadas pelo livro.

## 5.6 PRINCÍPIO DA CORRESPONDÊNCIA E PRINCÍPIO DA COMPLEMENTARIEDADE

### *Princípios Básicos da Física Quântica*

#### *Princípio da Correspondência*

É mencionado nessa parte que esse princípio assume que a nova teoria deve estar de acordo com a Física Clássica ao se referir a partículas em escalas macroscópicas.

#### *Princípio da Complementaridade*

Segundo o texto, a procura de Bohr para representar dois comportamentos peculiares do mundo quântico – dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza – possibilitou a construção do princípio da complementaridade.

Para a dualidade menciona-se o experimento da dupla fenda de Young, sendo necessárias as perspectivas ondulatória e corpuscular para explicar esses resultados empíricos. E para o princípio da incerteza enuncia-se que não se podem conhecer com exatidão e simultaneamente as variáveis desse princípio. Dessa maneira define-se o princípio da complementaridade.

### **5.6.1 Considerações**

São expostos de forma direta os princípios, sem explicações ou comentários mais completos sobre estes, recorrendo a exemplos para sua discussão.

Para englobar a dualidade, o princípio da incerteza e o princípio da complementaridade o texto refere-se a Bohr. Para o caso da dualidade utiliza-se o experimento da dupla fenda de Young, afirmando que somente com os modelos ondulatório e corpuscular, para a luz, poderiam se explicar os resultados empíricos. Para o caso do princípio da incerteza recorre-se à definição já exposta. Nesse sentido, ambos os conceitos são apresentados como fomentadores da ideia de Bohr para o princípio da complementaridade, novamente, são mencionados os problemas teóricos e a conclusão de forma direta.

Para abordar os princípios é, primeiramente, a definição dos princípios, recorrendo, posteriormente, à experiência da dupla fenda, mencionado o modelo ondulatório e corpuscular, a dualidade e o princípio da incerteza.

## 5.7 BARREIRA DE POTENCIAL

### *Partícula num Poço de Energia Potencial*

É apresentada de forma resumida essa situação idealizada. Principalmente relacionada aos modos de uma onda confinada. E partir dos modos de vibração, a largura do poço e o comprimento de onda chega-se à representação do estado quântico  $n$ . Relata-se, também, que os níveis de energia só podem existir em valores discretos, assim como a representação desses estados em um poço quadrado infinito. Fala-se sobre a função de onda e a densidade de probabilidade.

### *Efeito Túnel*

Essa seção, complementar à anterior, relata que no mundo quântico existe a probabilidade da partícula *tunelar* através de uma barreira de potencial. Menciona-se que o decaimento radioativo é explicado por esse fenômeno, que, também, é empregado no microscópico de tunelamento.

#### **5.7.1 Considerações**

O modelo da barreira de potencial, suas relações matemáticas, os modos de vibração, o comprimento de onda, etc., são utilizados para representar os estados quânticos. Esse modelo serve de síntese para a representação dos valores discretos de energia, função de onda, densidade

de probabilidade e efeito túnel. Tudo isto indica um percurso didático para se chegar à expressão matemática para a energia quantizada, misturando grandezas corpusculares e ondulatórias.

## 5.8 CATEGORIZAÇÃO DAS TAREFAS – LIVRO DIDÁTICO 1

Para categorizar as tarefas (tab. 2) foi inferido o que cada uma delas, no geral, pretende ensinar, ou seja, que conhecimento dentro da Física é estudado. Em sua grande maioria os exercícios apresentam de forma clara sua intenção, embora alguns utilizem mais de um conceito para sua resolução, focou-se, sobretudo, no principal conhecimento que a tarefa pretende instruir, considerando, também, a que parte do texto do livro didático a tarefa está associada. Os exercícios e a descrição das tarefas do Livro Didático 1 encontra-se no anexo B.

Categoria da tarefa ( <i>t</i> )	Número do exercício	Número de tarefas
Dualidade	7;8;13;14;15;22	<b>8</b>
Princípio da Incerteza	16;17	<b>2</b>
Ruptura	23	<b>1</b>
Radiação Térmica	3;9;10	<b>8</b>
Efeito Fotoelétrico	4;5;11;12	<b>12</b>
Modelo Atômico	6	<b>3</b>
Teoria Quântica	1;2	<b>2</b>
Barreira de Potencial	24;25	<b>10</b>
Radiação Eletromagnética	18;19;20	<b>6</b>
Princípio da Complementaridade e Princípio da Correspondência	21	<b>2</b>
<b>Total</b>	<b>25</b>	<b>54</b>

Tabela 2. Categorias das tarefas – Livro Didático 1

Dessa maneira, a categoria da tarefa com mais exercícios presentes no Livro Didático 1 refere-se à realização de tarefas que trabalham o conceito da dualidade, com um total de seis exercícios e oito tarefas para sua realização. Em segundo, aparece a instrução do efeito fotoelétrico com quatro exercícios, porém um total de doze tarefas para sua solução. O estudo da radiação térmica e a radiação eletromagnética, com um total de três exercícios cada, possuem oito e seis tarefas, respectivamente. Na sequência, com um total de dois exercícios cada, aparecem, o princípio da incerteza, a Teoria Quântica – tratando de aspectos gerais desta, como

a quantização da energia – e a barreira de potencial, sendo que o princípio da incerteza e a Teoria Quântica possuem cada um duas tarefas e a barreira de potencial soma dez tarefas. Com apenas um exercício são tratados o modelo atômico, com três tarefas, a ruptura – Física Clássica e Física Quântica – com uma tarefa, e o princípio da complementaridade e princípio da correspondência com duas tarefas. O Livro Didático 1 possui, sobre os tópicos de Física Quântica, um total de 25 exercícios e cinquenta e quatro tarefas.

### 5.9 TÉCNICAS PARA RESOLVER AS CATEGORIAS DAS TAREFAS – LIVRO DIDÁTICO 1

Após a quantificação e discriminação das tarefas e exercícios, respectivamente, as tarefas são numeradas e, também, são propostas técnicas para sua realização. Cabe ressaltar que cada tarefa necessita de mínimo de uma técnica para sua solução, por isso o número de tarefas, em cada categoria da tarefa, é igual ao número de técnicas. Porém ao aplicar uma técnica o sujeito pode realizar funções específicas de cada técnica, por exemplo, somar, dividir, ler, escrever e/ou igualar funções. Embora muitos exercícios apresentem duas ou mais tarefas, estes foram desagregados, possibilitando a proposição das técnicas de maneira específica. A tabela 3, a seguir, mostra essa exposição.

Categorias da tarefa (t)	Técnicas					Total de técnicas
	Relatar	Relacionar	Cálculo	Interpretação de dados	Gráfico	
Dualidade	$t_{12}; t_{13}; t_{14}; t_{29};$		$t_{30}; t_{31}; t_{42}; t_{43};$			<b>8</b>
Princípio da Incerteza	$t_{33};$		$t_{32};$			<b>2</b>
Ruptura	$t_{44};$					<b>1</b>
Radiação Térmica	$t_3; t_4;$		$t_{15}; t_{16}; t_{17}; t_{18}; t_{19}; t_{20};$			<b>8</b>
Efeito Fotoelétrico	$t_5; t_6;$		$t_7; t_{21}; t_{22}; t_{23}; t_{24}; t_{26}; t_{27};$	$t_8; t_{25}; t_{28};$		<b>12</b>
Modelo Atômico			$t_9; t_{10}; t_{11};$			<b>3</b>
Teoria Quântica	$t_1; t_2;$					<b>2</b>
Barreira de Potencial	$t_{51};$		$t_{45}; t_{46}; t_{47}; t_{48}; t_{49}; t_{52}; t_{53}; t_{54};$		$t_{50};$	<b>10</b>



Radiação Eletromagnética	$t_{34}; t_{39};$	$t_{38};$	$t_{35}; t_{36}; t_{37};$			<b>6</b>
Princípios da Complementaridade e Correspondência	$t_{40}; t_{41};$					<b>2</b>
Total de tarefas	<b>17</b>	<b>1</b>	<b>31</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>54</b>

Tabela 3. Técnicas e categorias das tarefas – Livro Didático 1

Nesse sentido, pode-se verificar que as tarefas que trabalham o efeito fotoelétrico são distribuídas em duas técnicas de **relatar**, sete de **cálculo** e três de **interpretação de dados**. A barreira de potencial possui uma tarefa associada à técnica de **relatar**, sete de **cálculo**, uma de **interpretação de dados** e uma de construção de **gráfico**. A dualidade tem quatro tarefas com a técnica de **relatar** e quatro de **cálculo**, e a radiação térmica possui duas tarefas com as técnicas de **relatar** e seis de **cálculo**. A radiação eletromagnética tem duas técnicas de **relatar**, uma de **relacionar** e três de **cálculo** distribuídas em suas tarefas. Com três tarefas relacionadas à técnica de **cálculo** aparece o modelo atômico. O princípio da incerteza tem uma tarefa com a técnica de **relatar** e uma de **cálculo**. Com duas tarefas cada, associadas à técnica de **relatar**, estão a Teoria Quântica e os princípios da complementaridade e correspondência. E com uma tarefa, ligada à técnica de **relatar**, finaliza a lista a ruptura. A técnica de **cálculo** é aplicada em 57% das tarefas e a técnica de **relatar** é usada em 31% das tarefas.

## 5.10 CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE TAREFAS – LIVRO DIDÁTICO 1

Entre as tarefas analisadas algumas podem ser classificadas em tipos gerais de tarefas (*tipos de tarefas*). Por exemplo, calcular é uma tarefa e calcular o comprimento de onda de De Broglie é um tipo de tarefa. Embora exista um tipo de tarefa que ocorre uma ou duas vezes, existem outras que se repetem várias vezes e que, dessa forma, propõem a utilização de uma mesma e específica técnica de forma repetida, como é o caso de calcular, que totaliza a maioria das tarefas. As tarefas referentes à técnica de **relatar** não foram agrupadas, pois apresentam uma distribuição geral, ou seja, cada tarefa apresenta particularidades que raramente se repetem. Por exemplo, uma vez se solicita a definição de

dualidade ( $t_{14}$ ), de fóton ( $t_{13}$ ), dos princípios de complementaridade ( $t_{41}$ ) e da correspondência ( $t_{40}$ ), etc.

Tipos de tarefas (T)	Número da tarefa	Total de tarefas de cálculo
Cálculo da energia cinética	$t_9; t_{21}; t_{45};$	<b>3</b>
Cálculo do comprimento de onda (De Broglie)	$t_{30}; t_{31}; t_{42}; t_{43}; t_{49};$	<b>5</b>
Cálculo da energia (fóton)	$t_{11}; t_{15}; t_{16}; t_{19}; t_{24};$	<b>5</b>
Cálculo da potência (fótons)	$t_{17}; t_{18}; t_{20};$	<b>3</b>
Cálculo do comprimento de onda (fóton)	$t_{10}; t_{22}; t_{27};$	<b>3</b>
Cálculo da frequência (fóton)	$t_7; t_{23}; t_{26};$	<b>3</b>
Cálculo da função de probabilidade	$t_{52}; t_{53}; t_{54};$	<b>3</b>
Outros cálculos	$t_{32}; t_{35}; t_{36}; t_{37}; t_{46}; t_{47};$	<b>6</b>
Total de tarefas		<b>31</b>

Tabela 4. Tipos de tarefas – Livro Didático 1

Na tabela 4 acima são contabilizados os tipos de tarefa relacionada à técnica de **cálculo**. O tipo de tarefa chamada de *outros cálculos* tem seis tarefas e, embora, seja a mais frequente, apresenta uma distribuição de tarefas particulares, como, por exemplo, cálculo da quantidade de movimento ( $t_{32}$ ), cálculo do número de pulsos por segundo ( $t_{35}$ ) ou cálculo da massa ( $t_{47}$ ).

O *cálculo do comprimento de onda (De Broglie)* e o *cálculo da energia (fóton)* possuem cinco tarefas cada. Com três tarefas cada, aparecem os tipos de tarefas: *cálculo da energia cinética*, *cálculo da potência (fóton)*, *cálculo da frequência (fóton)* e o *cálculo da função de probabilidade*. O *cálculo do comprimento de onda (fóton)* tem duas tarefas.

## 5.11 CONCLUSÕES

O Livro Didático 1 configura sua transposição introduzindo um conceito ou teoria acerca dos fenômenos quânticos e depois apresenta um breve relato sobre a vida do principal construtor desse conhecimento.

Aparentemente, a transposição didática sintetiza alguns aspectos do conhecimento em cada parte. Ou seja, por vezes são introduzidos os resultados experimentais, em outros casos são definidos apenas os conceitos. E embora o livro explore alguns aspectos conceituais, experimentais e em relação aos modelos, a maioria das tarefas requer, principalmente, a aplicação das relações formais. Esse livro além dos conceitos centrais da Teoria Quântica – radiação térmica, efeito fotoelétrico, modelo atômico, dualidade e princípio da incerteza – também aborda o modelo da barreira de potencial e efeito túnel que somente são vistos neste livro entre os analisados, assim como o princípio da correspondência e o princípio da complementaridade e a função de onda e a densidade de probabilidade.

A técnica mais frequente no Livro Didático 1 é a técnica de **cálculo** com trinta e uma tarefas. Em seguida a técnica de **relatar** com dezessete tarefas. A **interpretação de dados** é aplicada somente quatro vezes. As técnicas de **relacionar** e **gráfico** somente são necessárias uma vez cada. As tarefas associadas à técnica de **relatar** possuem pouca repetição sobre os aspectos relativos aos conceitos, modelos, experimentos e hipóteses que levaram a construção de Teoria Quântica, pois as explicações sobre esses aspectos são solicitadas uma ou duas vezes, sendo que somente a categoria da dualidade possui quatro dessas tarefas.

Dessa forma pode-se inferir que a maioria das tarefas somente necessita da aplicação direta de fórmula (**cálculo**) ou descrição direta do conteúdo do texto do Livro Didático (**relatar**). As tarefas que precisam de mais reflexão ou elaboração para sua solução, que são englobadas nas outras técnicas, totalizam seis tarefas das cinquenta e quatro.



## 6 LIVRO DIDÁTICO 2 – COMPREENDENDO A FÍSICA

O Livro Didático 2 (Compreendendo a Física) também é um dos livros aprovados pelo Ministério da Educação e distribuídos nas unidades escolares em todo o Brasil. O livro de Alberto Gaspar possui três volumes e os conceitos de Física Moderna e Contemporânea encontram-se no volume 3. Para apresentar a análise do Livro Didático 2 seguiu-se a mesma metodologia do Livro Didático 1, e que também é aplicada na exposição do outros Livros Didáticos. Assim, são ressaltados os conceitos, modelos, formalismos matemáticos e experimentos apresentados pelo autor, que são distribuídos dentro das categorias dispostas abaixo. Mais uma vez se respeitou a ordem dos tópicos, trazidos em itálico, apresentados pelo livro didático.

### 6.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

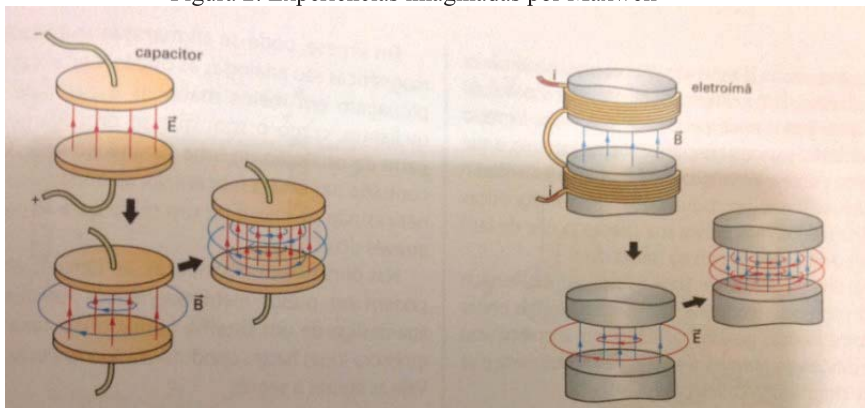
#### *Das Ondas Eletromagnéticas aos Fótons*

Com a enunciação da Lei de Faraday, referente à variação de um campo magnético provocar o aparecimento de um campo elétrico, inicia-se o capítulo. Descreve-se o caso para o modelo de uma espira e a variação do fluxo magnético. E a partir do exemplo do eletroímã e suas características cita-se que James Clerk Maxwell percebeu entre os campos magnéticos e elétricos algumas propriedades. Nas palavras de Gaspar (2011).

Maxwell concluiu que, se a variação do fluxo do campo magnético dá origem a um campo elétrico, uma variação do fluxo do campo elétrico deve originar um campo magnético, o que completava a simetria presente em todos os fenômenos eletromagnético descobertos até meados do século XIX. (GASPAR, 2011, P. 272).

Com o intuito de apresentar as características dos fenômenos inferidos por Maxwell, Gaspar afirma; “Maxwell imaginou a situação experimental muito simples, representadas nas figuras a seguir”. (GASPAR, 2011, p. 272).

Figura 2. Experiências imaginadas por Maxwell



(GASPAR, 2011, p. 272)

O texto descreve que em ambos os casos se as baterias são desligadas e ligadas, a variação de um dos campos (magnético ou elétrico) ocasiona o aparecimento do outro. Nas palavras do texto.

A certeza da existência dessa inter-relação levou Maxwell a uma conclusão extraordinária: se um campo elétrico variável faz aparecer um campo magnético variável, esse campo magnético variável deve fazer aparecer outro campo elétrico variável. Maxwell concluiu, por meio desse encadeamento sucessivo, que os campos elétricos e magnéticos deveriam propagar-se pelo espaço como se fossem ondas, as *ondas eletromagnéticas*. (GASPAR, 2011, p.273)

### *As Equações de Maxwell e as Ondas Eletromagnéticas*

Após apresentar a relação entre os campos magnético e elétrico e, ainda, relatar que estes se propagam no espaço como ondas, o texto afirma que, semelhante a Newton, Maxwell organizou e sintetizou os conhecimentos de sua época. E suas conclusões fundamentaram um

“simples” conjunto de quatro leis, expressas em quatro equações matemáticas.

Embora o texto cite as relações matemáticas, este não as apresenta, somente refere-se a um tópico posterior a esse capítulo, intitulada “As equações de Maxwell”, em que é apresentada uma descrição de maneira simplificada e não as equações matemáticas, pois o texto afirma que elas possuem uma matemática muito avançada.

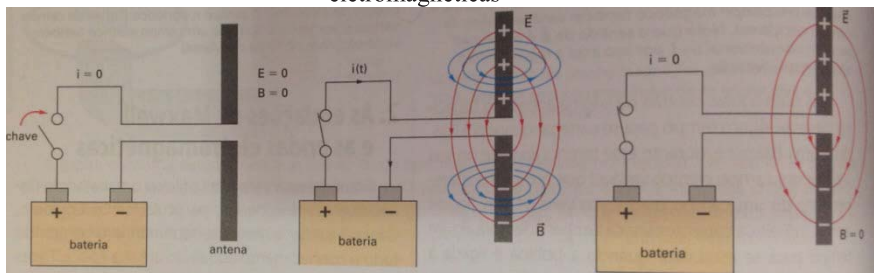
O autor menciona que além dessas relações formais inferirem sobre as ondas eletromagnéticas, estas, também, permitem obter a velocidade de propagação das ondas em condições específicas. Concluindo que sua velocidade é a mesma que a da luz, sendo a luz uma onda eletromagnética.

Novamente recorre-se a verificação empírica das previsões de Maxwell, afirmando que:

No final da década de 1880, o físico alemão Heinrich Hertz conseguiu produzir e detectar as primeiras ondas eletromagnéticas geradas artificialmente e comprovou as previsões de Maxwell. (GASPAR, 2011, p. 274)

Para o leitor saber mais sobre Heinrich Hertz (1857-1894) e seu experimento o texto refere-se, novamente, a um tópico posterior ao capítulo, chamada “Heinrich Rudolf Hertz e as ondas eletromagnéticas” (GASPAR, 2011, p. 291). Nesse sentido, é ilustrada abaixo um esquema experimental e sua descrição (fig. 3).

Figura 3. Esquema de antenas emissoras para representar pulsos de ondas eletromagnéticas



(GASPAR, 2011, p. 274)

Explica-se que o ligar e desligar da chave elétrica ocasiona oscilações eletromagnéticas. Nas palavras do autor.

À medida que o capacitor carregado se descarrega, o campo elétrico nele gerado diminui e aparece no circuito uma corrente elétrica que passa pelo indutor onde gera um campo magnético crescente que retarda a passagem da corrente. Esse campo logo se estabiliza, a corrente segue seu percurso e recarrega o capacitor, mas invertendo as cargas nas suas placas. Depois de carregado o capacitor volta a descarregar invertendo o sentido da corrente e repetindo o ciclo no sentido oposto, e assim sucessivamente. (GASPAR, 2011, p. 274)

Após essa descrição, comparam-se os pulsos seguidos produzidos em uma corda e a fonte que os gerou com as oscilações eletromagnéticas ligadas a uma antena. Com uma representação imagética das oscilações do campo eletromagnético para os planos vertical e horizontal recorre-se, por analogia, ao modelo das oscilações de uma onda mecânica horizontal. Nesse sentido, são apresentadas as expressões matemáticas que relacionam às variáveis presentes na descrição do comportamento de ondas.

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{ou} \quad T = \frac{1}{f} \quad (3)$$

$$c = \lambda f \quad \text{ou} \quad \lambda = cT \quad (4)$$

Dessa forma, por analogia aborda-se a propriedade geral que fornece a relação entre velocidade, frequência e comprimento de onda. E para cada ponto do espaço vazio apresenta-se a relação entre o módulo do vetor campo elétrico **E** e o módulo do vetor campo magnético **B**.

$$c = \frac{E}{B} \quad (5)$$

### *Energia e Quantidade de Movimento de Ondas Eletromagnéticas*

Com o discurso de que o movimento ondulatório transporta energia pelo meio que se propaga e, para uma onda eletromagnética, não havendo a necessidade de um meio, são apresentadas as relações do



transporte de energia, vinculada com a propagação das oscilações dos vetores campo elétrico e magnético e o transporte de quantidade de movimento. Sendo essa quantidade representada, aqui, com a relação entre a energia total  $E$ , a velocidade da onda  $c$  e a momento  $p$ , da seguinte forma.

$$p = \frac{E}{c} \quad (6)$$

A partir dessa quantidade de movimento expõe-se, também, uma expressão para a pressão de radiação com o exemplo uma placa metálica condutora.

### 6.1.1 Considerações

Por meio da comparação entre o campo eletromagnético presente em um capacitor e um eletroímã o texto procura esclarecer acerca das conclusões de Maxwell sobre a onda eletromagnética. Sendo as propriedades dessas ondas com os campos definidas diretamente por sentenças e ilustradas nas figuras. Nesse sentido o autor apresenta a relação dinâmica entre a variação de campos elétrico e magnético, utilizando o argumento da verificação empírica.

As relações entre as ondas eletromagnéticas e as equações de Maxwell são, brevemente, relatadas com o objetivo de afirmar que a luz possui características ondulatórias. Os aspectos formais associados à frequência, período, comprimento de onda e velocidade da luz são expostos, finalizando com a equação (3) para a velocidade de módulos dos campos elétrico e magnético. A relação (3) não está errada, mas pode dar a falsa impressão de que a velocidade da luz é simplesmente uma relação entre dois campos, e não que isto é resultado da variação temporal dos campos.

O percurso didático sobre o estudo das ondas eletromagnéticas é proposto a partir do modelo de Maxwell em relação aos campos elétrico e magnético, utilizando o exemplo de um eletroímã. Relatam-se as perspectiva de Michael Faraday (1791-1867) e Maxwell. A hipótese desse último sobre ondas eletromagnéticas e a verificação experimental de Hertz. O modelo das ondas mecânicas é utilizado para explicar o comportamento de ondas eletromagnéticas. Apresentam-se, assim, as relações matemáticas para o momento, comprimento de onda, frequência e a relação formal entre os vetores de campo elétrico e magnético e a velocidade de luz. Com o objetivo de apresentar a expressão matemática

para quantidade de movimento o texto aborda, também, as relações entre energia, quantidade de movimento e velocidade da luz.

Nesse sentido, o livro inicia a abordagem à radiação eletromagnética enunciando a Lei de Faraday, descrevendo o modelo da espira, assim como o exemplo do eletroímã. Posteriormente, o autor emprega, também, as descrições do experimento do eletroímã e do experimento de Hertz, a analogia ao modelo das oscilações de uma onda mecânica em uma corda e o formalismo matemático.

## 6.2 EFEITO FOTOELÉTRICO

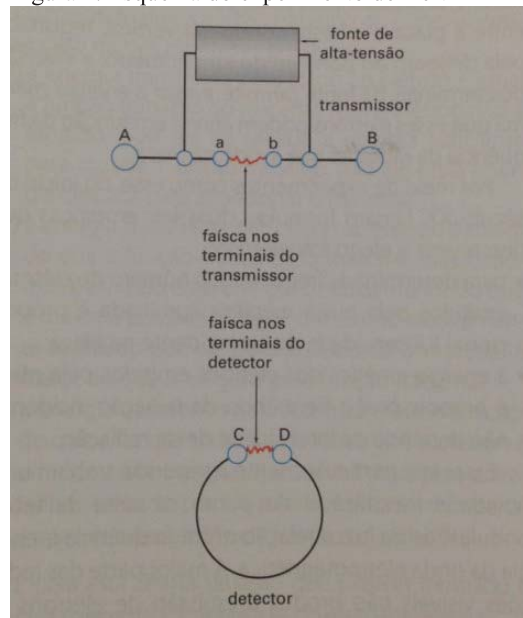
### *A Natureza Corpuscular das Ondas Eletromagnéticas*

Cita-se, novamente, Hertz e sua experiência de detecção de ondas eletromagnéticas, afirmando que dessa inferência “nosso mundo passou a ser povoado por ondas ou radiações eletromagnéticas de toda espécie, ou melhor, de todas as frequências.” (GASPAR, 2011, p. 279). Nessa passagem, talvez o autor esteja se referindo ao não reconhecimento de vários fenômenos como sendo de natureza similar a da luz ou até mesmo a produção de ondas eletromagnéticas artificiais, embora o estudante possa entender que as ondas não existissem antes de Hertz. É apresentado o espectro das ondas eletromagnéticas conhecidas, e informado no texto que à medida que novas descobertas foram realizadas algumas destas “desafiavam” a Teoria (Eletromagnetismo) sobre a qual eram fundamentadas.

### *O Efeito Fotoelétrico*

O efeito secundário na experiência de Hertz, associadas à faísca nos terminais do transmissor e do detector, é apresentado como a primeira evidência do efeito fotoelétrico. Sendo descrito, a partir da figura a seguir (fig. 4) o efeito observado por Hertz.

Figura 4. Esquema do experimento de Hertz



(GASPAR, 2011, p. 280)

São citadas as conclusões de Einstein sobre esse fenômeno, ou seja, a quantização da energia é proporcional à constante de Planck  $h$  e à frequência. É discutido, também, um significado físico da função trabalho. Para o autor, o efeito fotoelétrico não apenas evidencia uma revisão no modelo ondulatório da luz, mas, também, possibilita a construção de muitos artefatos tecnológicos.

### 6.2.1 Considerações

A sequência didática começa com a experiência de Hertz em relação à verificação experimental da teoria de Maxwell sobre as ondas eletromagnéticas. O texto aponta a radiação como onda eletromagnética e em seguida menciona que algumas novas descobertas começaram a questionar essa afirmação.

Em seguida cita-se o transporte de energia causado por uma onda em um meio, posteriormente, mencionando a equação (6) do momento e energia na perspectiva ondulatória para a luz. Depois, com a experiência

de Hertz, se expõe a característica corpuscular, porém sem argumentar sobre a incompatibilidade do modelo ondulatório para explicar o fenômeno. O efeito fotoelétrico é apresentado junto com a observação de Hertz, trazendo uma representação do aparato experimental, citando, nesse sentido, a conclusão de Einstein sobre esse efeito, a discrepância entre os resultados experimentais e as previsões teóricas em relação à intensidade, frequência e energia cinética.

Basicamente, no efeito fotoelétrico aborda-se a evidência da característica corpuscular da luz descrevendo os resultados empíricos, introduzindo, assim, a hipótese de Einstein sobre o fenômeno, abordando a constante de Planck, a quantização da energia e o conceito de função trabalho.

Para abordar o efeito fotoelétrico o texto utiliza: uma descrição da experiência de Hertz, a detecção do efeito fotoelétrico e as hipóteses de Einstein para explicar o efeito. São mencionados o Eletromagnetismo e a Teoria Ondulatória.

### 6.3 DUALIDADE

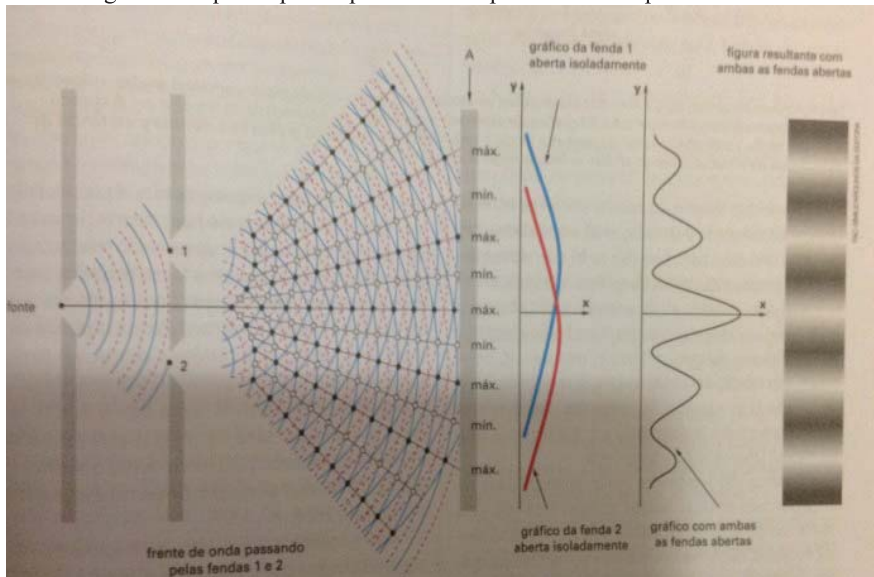
#### *A Dualidade Onda-Partícula*

O discurso dessa seção menciona o efeito fotoelétrico como uma evidência de que a luz é constituída de fótons. Citam-se, também, outros resultados que mostram a luz como uma onda. O autor deixa claro que afirmar que a luz é tanto uma partícula como uma onda não é correto. Nas palavras de Gaspar (2011):

Para a física atual, não há dúvida de que um feixe de luz é um feixe de partículas, isto é, um feixe de fótons. A dualidade surge em relação ao comportamento coletivo desse feixe, que é ondulatório. (GASPAR, 2011, p. 283)

Nesse sentido expõe-se uma imagem ilustrativa (fig. 5) da experiência da dupla fenda.

Figura 5. Esquema para representar a experiência da dupla fenda.



(GASPAR, 2011, p. 286)

Após breve descrição estatística dos resultados da experiência da fenda dupla, conclui-se que se pode falar do caráter dual da luz, ou seja, ela será tratada como onda se observada à distância e, quando vista de perto, terá características corpuscular e estatística.

### *O Eletromagnetismo, a Ótica a os Fótons*

O texto prossegue afirmando que a natureza corpuscular da luz e sua visão estatística são “difícil de aceitar”, porém tornam mais simples o entendimento de muitos fenômenos físicos. Nesse sentido, comparam-se e servem de exemplo o conceito de campo eletromagnético e seu efeito de ação à distância. É relatada uma situação em que um feixe de fótons incide sobre uma superfície plana de um vidro, sendo parte da luz transmitida e parte refletida. E para um ângulo de 60 graus, vinte por cento dos fótons são refletidos. Segundo o texto, a questão que essa situação desvela seria “por que alguns fótons ‘decidem’ atravessar a superfície e outros ‘decidem’ voltar?” (GASPAR, 2011, p. 287).

O autor assume que não existe resposta para essa pergunta, pois a Teoria Ondulatória não fornece uma explicação, somente sendo possível uma descrição determinista. Posteriormente, relata-se que a descrição da luz é estatística, sendo o fenômeno compreendido por meio de porcentagens.

### **6.3.1 Considerações**

O texto em algumas passagens parece descartar a dualidade. Pois o que se pode dizer é que um feixe com uma quantidade muito de grande de fótons gera uma onda eletromagnética clássica. E nela não se consegue perceber a granularidade da luz, assim apenas em um feixe de baixa intensidade as características quânticas se tornam evidentes.

O percurso didático começa com o efeito fotoelétrico como justificativa das características corpusculares para a luz, mencionado outras experiências, embora não as descreva, de características ondulatórias para o mesmo ente físico. Depois, o texto recorre à experiência da dupla fenda para explicar a dualidade.

Pode existir certa confusão na interpretação do texto quando este afirma sobre a descrição determinista, pois a estatística em processos quânticos não é a estatística clássica. As probabilidades quânticas refletem os padrões de interferência, ou seja, num ponto de interferência destrutiva a probabilidade diminui, e num ponto de interferência construtiva a probabilidade aumenta.

Em resumo, o fenômeno do efeito fotoelétrico é usado para demonstrar a propriedade corpuscular da luz e outras experiências revelam propriedades ondulatórias, desse modo introduz-se o conceito de dualidade onda-corpúsculo para a luz. O experimento da dupla fenda, representando na uma figura 6 expõe essa dualidade, é usado para melhor descrição do fenômeno. Concluindo que o comportamento da luz pode ser descrito pelo modelo corpuscular e ondulatório. A interpretação estatística do comportamento dos fótons é utilizada para explicar os resultados no experimento da dupla fenda, assim como a situação experimental de um feixe de fótons incidindo em uma superfície plana.

Na descrição presente no texto, ainda referente ao experimento da dupla fenda, existem afirmações erradas de que as regiões claras e escuras não se devem a interferência, ou seja, a partir de sentenças no texto é como se os fótons escolhessem atingir uma ou outra região do anteparo. Embora, a característica probabilística quântica esteja diretamente ligada

à característica ondulatória, pois o comportamento da luz mostra que o padrão de probabilidade se deve ao padrão ondulatório, isto é, a processos de interferência (princípio da superposição). A figura de difração é obtida após vários fótons chegarem ao alvo, mas está pode ser construída com um fóton de cada vez, mostrando que a dinâmica do fóton é ondulatória.

## 6.4 RADIAÇÃO TÉRMICA

### *Origens da Física Quântica*

#### *Descargas em tubos rarefeitos e espectroscopia*

Segundo o próprio autor a abordagem desse capítulo se desdobrará ligeiramente diferente dos capítulos anteriores, priorizando “[...] à história das ideias e descobertas que revolucionaram a Física do final do século XIX às primeiras décadas do século XX.” (GASPAR, 2011, p. 324).

Nesse sentido, são expostos os estudos acerca da natureza dos raios catódicos e descargas elétricas em tubos de gases rarefeitos, vinculando a descoberta dos raios X e do elétron às pesquisas realizadas com esse aparato experimental. É abordado, também, o estudo da espectroscopia, ao descrever, resumidamente, um espectroscópio e apresentar os as linhas de dispersão do hidrogênio, hélio e mercúrio.

O texto afirma que apesar de grande utilidade da espectroscopia nos estudos dos elementos, as teorias não conseguiam explicar os valores de comprimento de onda e frequência na dispersão da luz que emanava desses elementos quantos se tornavam incandescentes. Pois a radiação emitida por objetos aquecidos não apresentavam um espectro de linhas discretas, como os elementos químicos citados no parágrafo anterior, mas sim um espectro contínuo. Segundo o autor, o caminho para elucidar essa questão foi investigar a intensidade da radiação emitida e analisá-la por meio de um gráfico de intensidade X comprimento de onda.

#### *Raios catódicos, raios beta, elétron*

O texto menciona que no início do século XIX o modelo de fluido para a eletricidade e magnetismo ainda era aceito e, posteriormente, novas hipóteses começaram a se mostrar mais precisas na descrição dos raios catódicos, como a perspectiva de radiação eletromagnética ou feixes de partículas com carga. Em seguida cita-se que a comprovação

experimental de tais raios serem constituídos de partículas carregadas veio por meio do trabalho de Jean Perrin (1870-1942) e Joseph J. Thomson (1856-1940). Dessa forma, são apresentadas ilustrações dos aparatos experimentais utilizados por Perrin e Thomson, além da descrição do estudo, a descoberta do elétron e sua relação carga/massa. É ressaltado que Thomson foi capaz de medir a massa do íon de hidrogênio e verificou que este possui um valor de aproximadamente mil vezes maior do que o elétron, dessa forma, ele associou essa nova partícula como uma pequena parte constituinte do átomo.

### *Radiação Térmica*

O texto apresenta o estudo do espectro da radiação térmica com a investigação que a Física Clássica desenvolveu acerca da natureza do calor, citando um conceito que perdurava até meados do século XIX, chamado de calórico. Descreve-se, brevemente, o comportamento desse calórico como um fluido.

Em seguida, mencionam-se alguns resultados experimentais. Entre os quais o do físico Gustav Kirchhoff (1827-1887), segundo qual é assumido, “[...] a razão entre o poder emissivo e o poder absorptivo de um corpo sólido, para radiação de mesma frequência, depende apenas da sua temperatura.” (GASPAR, 2011, p.329). Com o intuito de aprofundar o estudo acerca da radiação térmica propõe-se o conceito de *corpo negro*, utilizando o modelo de uma cavidade com um pequeno orifício.

A argumentação prossegue mencionando o físico Josef Stefan e os primeiros resultados experimentais, assim como sua parceria com Ludwig Boltzmann para construção de uma relação matemática conhecida como Lei de Stefan-Boltzmann.

O texto traz duas notas em destaque, uma intitulada *A cor do calor* e outra *Frequência X comprimento de onda*. Na primeira são apresentados, resumidamente, duas categorias de calor: calor luminoso e calor obscuro, relatando que os resultados experimentais não corroboram com essa divisão sobre a radiação térmica. Na segunda justifica-se a utilização da frequência no estudo da radiação ao invés do comprimento de onda, uma vez que a frequência independe do meio de propagação, e para uma determinada radiação é sempre constante.

Posteriormente, cita-se que acima de 0 K (zero Kelvin) todo objeto emite radiação, e como nenhum objeto está completamente isolado este também a absorve. Assim, apresentam-se as relações formais associadas



à potência emitida por um sólido, fundamentada na Lei de Stefan-Boltzmann. Abordam-se, também, as situações em que um objeto cede calor ao ambiente, absorve calor e quando em equilíbrio térmico.

### *O enigma do espectro da radiação térmica*

O texto relata em seguida sobre a investigação da radiação térmica de um corpo negro abordando o gráfico da intensidade da radiação emitida por este. E para três valores de temperatura expõe-se um gráfico em que são construídas as respectivas curvas que mostram as características de emissão e absorção em função da intensidade da radiação e frequência. Assume-se nesse material didático que a função matemática que relaciona os máximos de emissão e absorção para a radiação térmica foi um dos enigmas da Física Clássica, e que a linearidade observada nos máximos de intensidade foi o ponto que partida para investigar essa questão.

### *A lei do deslocamento de Wien*

Em seguida cita-se, para o gráfico da radiação de corpo negro, a linearidade no deslocamento dos picos das curvas de temperatura em relação à frequência, afirmando que, dessa forma, Wilhelm Wien (1864-1928) conseguiu, experimentalmente, um valor para a função matemática desse deslocamento.

$$f_{máx.} = 5,88 \cdot 10^{10} \cdot T \quad (7)$$

Essa relação é conhecida como Lei do deslocamento de Wien, e relaciona a frequência máxima correspondente à intensidade da radiação, ou seja, a intensidade é diretamente proporcional à temperatura.

### *As hipóteses de Wien e Rayleigh-Jeans*

Nesse tópico cita-se que Wien formulou a primeira hipótese para a radiação de corpo negro que corroborava com alguns resultados experimentais, assumindo que a radiação se originava nas oscilações moleculares, e as diferentes frequências ocorriam devido as diferentes oscilações. Nas palavras escritas no texto.

A intensidade das diferentes frequências dessa radiação seria diretamente proporcional ao número dos respectivos osciladores. Assim, a intensidade de determinada frequência de radiação seria tanto maior quanto mais osciladores houvesse no interior do corpo negro vibrando com essa frequência. A partir dessas hipóteses, Wien chegou a uma expressão matemática que estava de acordo com os dados experimentais para altas frequências, mas para baixas frequências a discrepância era enorme. (GASPAR, 2011, p 334)

O texto relata que, ainda fundamentados na Física Clássica, Lord Rayleigh (1842-1919) e James Jeans (1877-1946) assumiram que a radiação emitida era originada nas oscilações das ondas eletromagnéticas, semelhantes, por analogia utilizada no livro, às ondas estacionárias numa corda, sendo o comprimento de onda da radiação virtualmente pequeno, possibilitando todas as frequências possíveis. Nesse sentido, Rayleigh e Jeans conseguiram uma relação matemática que concordava com os dados empíricos para baixas frequências, mas estava em desacordo no caso de altas frequências.

Cita-se no texto que as hipóteses de Wien e Rayleigh-Jeans eram complementares em relação aos resultados experimentais. Ou seja.

Essa diferença em relação aos dados experimentais para altas frequências ficou conhecida como *catástrofe ultravioleta*, porque, de acordo com a expressão de Rayleigh-Jeans, a intensidade da radiação aumentava drasticamente com o aumento da frequência, tendendo ao infinito, o que, além de contrariar todas as evidências experimentais, era teoricamente inexplicável. (GASPAR, 2011, p.335)

### *O quantum de ação*

A partir da discrepância entre os resultados experimentais e a curva teórica para a intensidade da radiação em função da frequência para um corpo negro, segundo o texto, Max Planck iniciou seus estudos. Porém, afirma-se que ele não conhecia os resultados de Rayleigh-Jeans e, somente, tinha ciência dos dados empíricos.

Segundo o livro, Planck obteve a função matemática que corroborava com os resultados experimentais ao utilizar, sobretudo, o conceito de entropia, relacionando uma expressão formal com uma função de interpretação e significado físico. Menciona-se, também, que a constante ( $h$ ) que Planck descobriu com sua pesquisa possuía uma interpretação física tão diferente do que até então se conhecia na Física Clássica, tanto que na época foi postulada. Nas palavras expostas no livro.

A energia, ou melhor, a ação, só existe na natureza em valores discretos, múltiplos de  $h$ , o quantum de ação. É como a carga elétrica, que só existe em valores discretos, múltiplos de  $e$ . (GASPAR, 2011, p.335)

Nesse sentido, cita-se que a discrepância da teoria para o modelo de corpo negro e os resultados experimentais referentes às altas frequências foram explicados pela hipótese de Planck. O texto utiliza a função matemática que Planck criou para introduzir a característica fenomenológica da quantização da energia, fazendo analogia com o elétron como carga elétrica fundamental.

#### **6.4.1 Considerações**

O estudo sobre a radiação térmica começa com as perguntas e questões da Física Clássica relacionada ao tubo de raios catódicos e à espectroscopia, apresentando os instrumentos de medida e os resultados dessas medidas acompanhados das questões suscitadas por estes estudos. Isto é, os espectros de elementos químicos e a radiação de corpos aquecidos. Nesse sentido, a investigação dos raios catódicos traz a descoberta do elétron, que é mostrada em detalhes em relação à razão carga/massa do elétron. Sendo explorado matematicamente em um exemplo resolvido no livro.

Em seguida são apresentadas algumas das ideias e revoluções que levaram à origem da Física Quântica. Nesse sentido, são citados o estudo dos resultados do experimento do tubo de raios catódicos, a descoberta dos raios X e do elétron, assim como a dificuldade em se explicar os resultados experimentais para a radiação térmica em conformidade com a teoria. A partir do fenômeno espectroscópico de dispersão no estudo do átomo de hidrogênio expõe-se o conceito de espectroscopia. Menciona-se a incapacidade da teoria existente para explicar os valores do comprimento de onda e da frequência para um gás incandescente,

afirmando que nessa situação o espectro não é contínuo, mas sim discreto, apresentando, assim, uma representação gráfica da intensidade de radiação emitida e o comprimento de onda.

Para explicar os raios catódicos, raios beta e o elétron compara-se o modelo de fluido, para a eletricidade e o magnetismo, com o modelo de radiação eletromagnética e o modelo de partícula. E a verificação vem por meio da comprovação experimental de Thomson sobre a existência do elétron e as consequências para o modelo de átomo.

O estudo da radiação térmica contínua com a introdução do conceito de calórico utilizando o modelo de fluido para descrevê-lo, novamente visando uma abordagem histórica, como o autor havia se referido no início do capítulo, expõe-se um conceito antigo, citando evidências empíricas para justificar sua refutação. Nesse sentido, apresentam-se os resultados experimentais para a investigação da radiação térmica. O conceito de corpo negro é abordado com o modelo da cavidade com um orifício, sendo apresentada a relação matemática da Lei de Stefan-Boltzmann. Citam-se, também, as discrepâncias entre os resultados empíricos e as previsões teóricas.

O livro expõe algumas sentenças que afirmam existir semelhança entre radiação de luz e calor. Porém o calor não é uma onda eletromagnética, mas sim uma forma de energia. O ponto central é o equilíbrio térmico de um corpo que despende parte de sua energia emitindo e absorvendo.

Apesar da confusão em relação ao calor e à radiação eletromagnética o texto enuncia o conceito de corpo negro de Kirchhoff de forma correta, ou seja, a razão entre o poder emissivo e o poder absorptivo de um corpo sólido para radiações de mesma frequência depende apenas da sua temperatura. E embora fale da igualdade do poder de absorção e emissão, não vincula de maneira clara com a noção de equilíbrio térmico.

Na descrição fenomenológica do espectro da radiação, aborda-se o gráfico da radiação térmica em relação à intensidade e a frequência para um corpo negro. A investigação do gráfico é tratada por meio da comparação entre as curvas experimental e teórica, apresentando assim o problema. O estudo do fenômeno termina com a relação matemática que descreve o comportamento da radiação nos experimentos. A função matemática relacionada à frequência correspondente à máxima intensidade da radiação e à temperatura é apresentada pela Lei do deslocamento de Wien.

Seguindo o percurso didático, do estudo fenomenológico da radiação de corpo negro, é introduzida a hipótese de Wien. O texto afirma que a relação matemática concorda com os resultados empíricos da radiação para baixas frequências, porém o mesmo não ocorre para o caso de altas frequências.

Na abordagem da catástrofe do ultravioleta para radiação de corpo negro são mencionados os problemas experimentais, a construção de hipóteses e a formulação de uma expressão matemática para adequar a teoria com a experiência. Mencionam-se, assim, a Lei de Stefan-Boltzmann acerca da radiação de corpo negro, a Lei de Wien e sua relação formal, a hipótese de Rayleigh-Jeans e a catástrofe do ultravioleta.

O percurso didático para o estudo da radiação térmica remete-se ao relato dos problemas experimentais em relação à teoria vigente, apresentando, assim, as hipóteses de pesquisa de alguns cientistas, e de forma direta traz a relação matemática para prever novos resultados em consonância com o experimento. O objetivo didático, além de expor a expressão matemática ( $E = hf$ ), refere-se à introdução da característica descontínua da natureza em relação à energia, mencionando, nesse sentido, que essa característica começava a sacudir os pilares da Física Clássica, pois fomentava, ainda que inicialmente, as bases para uma nova concepção de mundo e à construção da Física Quântica.

Nesse sentido, para ensinar a Radiação Térmica são abordados: descrições do tubo de gás rarefeito, do experimento de raios X e da descoberta do elétron, o modelo do fluido, o gráfico da intensidade da radiação, o conceito de calórico, a definição do conceito de corpo negro de Kirchhoff, o modelo da cavidade, o modelo dos osciladores e as relações formais de Stefan-Boltzmann, Wien, Rayleigh-Jeans e Planck. Também são tratadas a Lei de Stefan-Boltzmann e a Lei do deslocamento de Wien. Mencionam-se o Eletromagnetismo, a Termodinâmica e a Teoria Ondulatória.

## 6.5 MODELO ATÔMICO

### *Os raios X e a radioatividade*

O tópico inicia com as questões que não se encaixavam nas teorias da Física Clássica no final do século XIX, referentes à radiação térmica, raios X e radioatividade. Cita-se a descoberta de Wilhelm Roentgen (1845-1923) sobre os raios X e a consequência para a Física e para a

Medicina. Assim como os estudos de Antoine Becquerel (1852-1908) com sais de urânio expostos ao sol e o registro em chapas fotográficas das posições desses sais. Compara-se, então, a diferença da descoberta de Roentgen relativa aos raios X, que para sua produção necessitava de uma fonte de energia externa, com os “raios de Becquerel” que são emitidos espontaneamente sem uma fonte externa de energia.

Em seguida relata-se que mais tarde Marie Curie (1867-1934) investigou outros elementos e descobriu que a propriedade mensurada por Becquerel não era exclusiva do urânio, chamando esse fenômeno de *radioatividade*. Assim, introduzem-se as descobertas feitas por Pierre Curie (1859-1906), Marie Curie e Becquerel sobre os raios X, mais precisamente sobre suas características particulares, identificados como emissões *alfa, beta e gama*.

Nesse sentido, apresenta-se uma representação de um esquema proposto por Marie Curie acerca dos três tipos de raios emitidos de substâncias radioativas. O autor infere sobre o esquema, concluindo que os raios alfa são partículas positivas, os raios beta são partículas negativas e os raios gama, assim como os raios X, são radiações eletromagnéticas ou fótons.

### *O átomo de Rutherford*

Posteriormente, aos estudos sobre a radiação térmica, raios X e elementos radioativos, o autor introduz o conceito de átomo de Rutherford. Pois, segundo o texto, a descoberta de tais fenômenos possibilita o estudo de estruturas invisíveis aos olhos humanos, por exemplo, o átomo, necessitando, assim, da construção de um modelo que se encaixasse nas observações e resultados empíricos.

Em seguida menciona-se que as suposições que rodeavam o modelo de átomo aproximavam-se, no geral, de estruturas similares ao do Sistema Solar, no entanto o modelo mais aceito foi de J.J. Thomson. Neste, o átomo era formado por uma esfera de carga positiva onde os elétrons estavam homogeneamente distribuídos, uma analogia mencionada pelo autor refere-se ao “pudim de passas”.

O texto expõe que ao estudar a estrutura atômica Ernest Rutherford (1871-1937), aluno de Thomson, utilizou partículas que eram emitidas por elementos radioativos. Investigando a trajetória de partículas alfa, ao atravessarem alvos de um material metálico, foi possível inferir que algumas destas sofriam grandes desvios em seu caminho. Nas palavras do

texto, “Como Rutherford diria mais tarde, isso era tão absurdo como alguém dar um tiro numa folha de papel e a bala ricochetear de volta” (GASPAR, 2011, p. 339). Após os resultados experimentais não serem explicados pelo modelo atômico atual, Rutherford propôs seu modelo. Ele assumiu que o átomo deveria possuir quase toda a massa concentrada em um pequeno espaço localizado em seu centro (núcleo) de carga positiva e que as cargas negativas (elétrons) giravam ao redor deste.

O livro relata que as objeções ao modelo de Rutherford vinham da própria Física Clássica, pois se os elétrons rodeassem o núcleo atômico estes deveriam estar sujeitos à ação de uma força e aceleração centrípeta, segundo as descrições das Leis de Newton. E do Eletromagnetismo, quando partículas com carga elétrica são aceleradas estas emitem radiação e, conseqüentemente, perdem energia, o que faria os elétrons espiralar e convergir ao núcleo. Segundo o texto era necessário mudar o modelo atômico e construir novas teorias para explicar alguns fenômenos como a radiação térmica de corpo negro e o efeito fotoelétrico, e agora, a estrutura atômica.

#### *O espectro do átomo de hidrogênio*

No início dessa parte o discurso começa com a expressão matemática para os comprimentos de onda das raias do espectro do hidrogênio atribuída a Johann J. Balmer, sendo o conjunto dos comprimentos de onda conhecido como *série de Balmer*. Citam-se, também, as raias do espectro de hidrogênio para as frequências na região do ultravioleta, chamadas de *série de Lyman*, descobertas por Theodore Lyman (1874-1954), e a *série de Paschen* desenvolvida por Friedrich Paschen (1867-1947), referente à região do infravermelho.

#### *O átomo de Bohr*

Na sequência o texto menciona que Niels Bohr estava convencido que a descoberta de Planck podia ser utilizada para explicar as discrepâncias teóricas do átomo de Rutherford, assim como propor um novo modelo. Nas palavras expostas no livro.

Assim como a radiação térmica, conforme a descoberta de Planck, só pode se propagar em pacotes mínimos de energia, os elétrons também

deveriam ter órbitas com valores discretos de energia e só poderiam transitar entre elas aos saltos. E, quando não houvesse mais salto possível para decair, o elétron estaria no seu menor nível de energia, no qual poderia permanecer por um tempo infinito, pois não haveria na natureza energia com valor possível para essa queda. Por isso as raiais dos espectros são isoladas e descontínuas e, de acordo com a fórmula de Balmer, estão associadas a números inteiros  $n$ . (GASPAR, 2011, p.342)

O conceito de órbita proposto por Bohr, como mencionado no texto, está relacionado aos estados estacionários. E para explicar as mudanças que os elétrons poderiam fazer dentro da estrutura atômica, referente ao salto de uma órbita a outra, utilizou-se o conceito de fóton proposto por Einstein.

Quando a energia correspondente a um ‘salto’ era igual à de um determinado quantum de luz, o elétron podia emitir esse quantum de luz e ‘saltar’ para um nível mais baixo. (GASPAR, 2011, p. 342)

São apresentadas as expressões matemáticas de Bohr para os diferentes níveis de energia entre dois estados estacionários. Mencionam-se, também, o conjunto de linhas conhecidos como espectro de emissão e espectro de absorção para o átomo de hidrogênio, afirmando que Bohr pode atualizar o modelo atômico com as novas descobertas que não se encaixavam nas teorias clássicas da época.

### **6.5.1 Considerações**

A instrução do conceito de modelo atômico começa com a investigação dos raios X, radioatividade e com os problemas teóricos que a Física Clássica possuía para descrever esses fenômenos no início do século XX.

O percurso didático desdobra-se em relação aos resultados experimentais das radiações alfa, beta e gama, possibilitando, assim, a construção de instrumentos para investigar o átomo, segundo o texto, contribuindo para novas hipóteses para o modelo atômico. E a partir das interpretações empíricas, Rutherford conseguiu propor seu modelo atômico. São citadas as discrepâncias entre as conclusões do modelo de Rutherford e a Física Clássica (Mecânica Clássica e Eletromagnetismo).



Apresentando, também, as relações matemáticas para as raias espectrais do átomo de hidrogênio.

As equações matemáticas são apresentadas, porém não discutidas, pois se relatam os problemas teóricos em relação ao átomo, e na sequência o texto expõe, basicamente, as relações formais presentes no estudo de espectro do átomo de hidrogênio sem comentar as consequências para o modelo atômico, as diferenças nas linhas discretas do espectro de radiação do átomo de hidrogênio e nas linhas contínuas do espectro de radiação para objetos sólidos aquecidos.

Em seguida menciona-se a utilização de Bohr do modelo proposto por Planck, para a quantização da energia, empregado para construir o modelo do átomo de Bohr. Nesse sentido, a partir da hipótese de Bohr dos estados estacionários do átomo, assim como da referência ao conceito de fóton, faz-se a explanação sobre a construção de uma nova perspectiva para o átomo. Sendo introduzidas as relações matemáticas para diferentes níveis de energia do átomo.

Na instrução do modelo atômico são apresentados: o relato sobre a descoberta da radiatividade e raios X, esquema sobre emissões alfa, beta e gama, modelo de Thomson, experiência de Rutherford, modelo de Rutherford, relações matemática (Balmer, Lyman e Paschen), constante de Planck (quantização da energia), estados estacionários, conceito de fóton, modelo de Bohr e relação matemática para os níveis de energia. As leis mencionadas em relação ao modelo de Rutherford são: as Leis de Newton e a Lei da Conservação da Energia. E a Mecânica Clássica e o Eletromagnetismo são as teorias abordadas.

## 6.6 DUALIDADE – MODELO ATÔMICO

### *As ondas de matéria*

No início desse tópico são citados os problemas que a Física Clássica intencionava resolver sobre o comportamento básico que descrevia a matéria em seu nível fundamental. Segundo o texto, o físico francês Louis de Broglie se debruçou sobre uma das grandes questões que essa Ciência tentava esclarecer, a natureza dual de luz. Nas palavras do texto.

De Broglie conseguiu conciliar características aparentemente tão distintas de forma simples, genial e revolucionária. Atribuiu propriedades ondulatórias à

matéria. Se os fótons são partículas de energia, cujo valor é função da frequência, característica tipicamente ondulatória, outras partículas, como o elétron, também deveriam ter propriedades ondulatórias. (GASPAR, 2011, p. 356)

O livro assume que foi a partir da união da relação formal da quantidade de movimento para uma partícula clássica ( $p = mv$ ), da expressão moderna da energia para uma partícula sem massa ( $E = pc$ ) e da energia do fóton ( $E = hf$ ) que De Broglie obteve uma relação matemática para o comprimento de onda associado a uma partícula.

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (8)$$

Sendo  $h$  a constante de Planck,  $m$  a massa e  $v$  a velocidade. O discurso prossegue afirmando que a suposição de De Broglie precisava agora de uma verificação experimental. Nesse sentido, semelhante aos experimentos realizados para difração de raios X, realizaram-se verificações empíricas referentes às ondas de matéria com a difração de elétrons. Cita-se o trabalho de Clinton Davisson (1881-1958) e Lester Germer (1896-1971) realizado quatro anos após a formulação teórica de De Broglie. São mostradas duas imagens, uma para a difração de raios X e outra para o elétron.

### *A mecânica ondulatória*

O texto menciona que De Broglie observou que os modos de vibração de uma onda estacionária provocados em uma corda com seus limites fixos e as frequências de vibração de ondas estacionárias, relativas aos elétrons ao redor do núcleo atômico, somente poderiam assumir valores discretos de energia, sendo esses valores representados por números inteiros. Nas palavras do texto.

De Broglie percebeu que, se o elétron tivesse caráter ondulatório, ele só se ‘encaixaria’ em órbitas em que pudesse estabelecer configurações de ondas estacionárias. Supondo que as órbitas fossem circulares, não haveria extremidades fixas, como nas ondas estacionárias das cordas, por isso admitia-se que as ondas

estacionárias associadas aos elétrons pudessem girar em torno do núcleo do átomo. (GASPAR, 2011, p.358)

Ou seja, o comprimento da órbita deveria conter um número inteiro de comprimentos de onda relativos ao elétron. Cita-se, no texto, que a relação entre o comprimento de onda do elétron, aplicado ao átomo de hidrogênio, deveria levar à mesma formulação que expressava o comprimento do raio da órbita do elétron para o modelo atômico de Bohr-Sommerfeld. E a partir dessas ideias foi possível a construção da Mecânica Quântica e Mecânica Ondulatória.

O autor conclui afirmando que, dessa forma, tornou-se viável determinar teoricamente a estrutura atômica de um elemento, estudando experimentalmente o espectro deste.

### **6.6.1 Considerações**

Nessa seção o texto aborda a dualidade e o modelo atômico, o caminho didático inicia-se com os problemas teóricos da Física Clássica para explicar e descrever a matéria. Cita-se como ponto de partida a hipótese de De Broglie, relacionando a descrição do comportamento da matéria com a utilização dos modelos corpuscular e ondulatório. As relações matemáticas de De Broglie para o comprimento de onda são apresentadas, assim como as relações formais para uma onda associada à partícula e a informação sobre a verificação experimental de Davisson e Germer. A onda estacionária ao redor do núcleo atômico, a citação do modelo de Bohr-Sommerfeld, assim como o princípio da incerteza e suas relações matemáticas, complementam o discurso.

A abordagem do modelo atômico remete-se à hipótese de De Broglie relacionada aos modos de vibração em uma corda, utilizado como analogia, para explicar a hipótese de ondas estacionárias ao redor do núcleo atômico e o número inteiro de valores de comprimento de onda do elétron. O problema da medição do comportamento de objetos macroscópicos é empregado para explicar o princípio da incerteza, tratado na próxima seção, juntamente com as relações formais.

Nesse sentido, são utilizadas pelo texto: a definição do problema da dualidade da luz, a hipótese de De Broglie, a relação formal de De Broglie, a experiência de difração de elétrons, o modelo da onda estacionária, uma analogia à onda mecânica, a quantização da energia e o modelo atômico de Bohr-Sommerfeld.

## 6.7 PRINCÍPIO DA INCERTEZA

### *O princípio da incerteza*

Em relação às incertezas na medição de objetos macroscópicos inicia-se esse tópico, o discurso segue mencionando exemplos de pesquisas de opinião pública, assumindo que alguma incerteza na medida, seja de objetos físicos ou sociais, sempre vão existir. Posteriormente, o autor cita que as incertezas mencionadas seriam mais próximas a imprecisões ou limitações dos instrumentos de medida, diferente do princípio da incerteza da Mecânica Quântica.

Nesse sentido, afirma-se que ao se mensurar sobre um sistema microscópico, a simples interação, por mais sutil que fosse, alteraria a disposição inicial do sistema.

### **6.7.1 Considerações**

Em relação ao princípio da incerteza são apresentadas as relações formais para a posição e momento de uma partícula movendo-se no eixo das abscissas  $x$ , também, para a energia e o tempo de medida, mencionando que ambas as expressões estão associadas à constante de Planck  $h$ . O percurso didático desdobra-se em esclarecer que ao se conseguir mais precisão acerca da posição, se perde precisão relativa ao momento, e o mesmo acontece para a energia e tempo de medida. São apresentadas as expressões matemática do princípio.

Para abordar o princípio da incerteza são utilizadas: uma analogia com uma pesquisa estatística, um exemplo sobre a limitação experimental, a definição do princípio da incerteza e as relações formais de momento e posição, e energia e tempo.

## **6.8 Categorização das Tarefas – Livro Didático 2**

A descrição dos exercícios (anexo C) possibilitou o levantamento para categorização das tarefas presentes no Livro Didático 2. Novamente, buscou-se o principal conhecimento que o exercício propõe tratar para estabelecer as categorias, apresentadas na tabela 5.

Categoria da tarefa	Número do exercício	Total de tarefas
Dualidade	28;30	<b>3</b>

Princípio da Incerteza	31;32;33;34;35	<b>6</b>
Radiação Térmica	10;11;12;13;14 15;16;22	<b>12</b>
Efeito Fotoelétrico	1;2;3;4;6	<b>8</b>
Modelo Atômico	17;18;19;20;21 23;24;25;26;27	<b>22</b>
Radiação Eletromagnética	5;7;8;9	<b>5</b>
Princípio da exclusão de Pauling	29	<b>2</b>
Total de exercícios	<b>35</b>	<b>58</b>

Tabela 5. Categorias das tarefas – Livro Didático 2

Nesse sentido, o conceito mais trabalhado pelas tarefas presentes no Livro Didático 2 é o modelo atômico, com um total de dez exercícios e vinte e duas tarefas, correspondendo a 32% das tarefas. Com oito exercícios e doze tarefas aparece o estudo da radiação térmica, com 20 %. O efeito fotoelétrico, com cinco exercícios, possui oito tarefas. O princípio da incerteza tem cinco exercícios e seis tarefas. Com quatro exercícios e cinco tarefas está a radiação eletromagnética. Os dois conceitos menos presentes nos exercícios do Livro Didático 2 são a dualidade e o princípio da exclusão de Pauling – que é tratado no texto dentro do modelo atômico – com dois exercícios (três tarefas) e um exercícios (duas tarefas), respectivamente. O Livro Didático 2 apresenta trinta e cinco exercícios e cinquenta e oito tarefas, e concentra suas atividades, principalmente, no modelo atômico, efeito fotoelétrico e radiação térmica.

### 6.9 Técnicas para resolver as Categorias das Tarefas – Livro Didático 2

Depois de mensuradas as tarefas junto com as categorias das tarefas, são inferidas e propostas as técnicas para resolver as tarefas que estão numeradas na tabela 6 a seguir.

Categorias da tarefa (t)	Técnicas					Total de técnicas (categorias)
	Relatar	Relacionar	Cálculo	Interpretação de dados	Gráfico	
Dualidade			$t_{48}; t_{51}; t_{52};$			<b>3</b>

Princípio da Incerteza	$t_{55}; t_{56};$		$t_{53}; t_{54}; t_{57}; t_{58};$			<b>6</b>
Radiação Térmica	$t_{15}; t_{21}; t_{41};$		$t_{14}; t_{16}; t_{17}; t_{18}; t_{19}; t_{22};$	$t_{20}; t_{23}; t_{24};$		<b>12</b>
Efeito Fotoelétrico	$t_2; t_3;$	$t_1$	$t_4; t_6; t_7; t_8;$	$t_9;$		<b>8</b>
Modelo Atômico	$t_{31}; t_{32}; t_{42}; t_{43}; t_{44}; t_{45};$		$t_{25}; t_{26}; t_{27}; t_{28}; t_{29}; t_{30}; t_{33}; t_{34}; t_{35}; t_{36}; t_{37}; t_{38}; t_{39}; t_{40}; t_{46}; t_{47};$			<b>22</b>
Radiação Eletromagnética	$t_{13};$	$t_5; t_{12}$	$t_{10}; t_{11};$			<b>5</b>
Princípio da exclusão de Pauling	$t_{49}; t_{50};$					<b>2</b>
Total de técnicas	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>35</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>58</b>

Tabela 6. Técnicas e categorias das tarefas – Livro Didático 2

Para resolver as tarefas agrupadas na categoria do modelo atômico são necessárias aplicar vinte e duas vezes as técnicas, sendo seis vezes **relatar**, dezesseis de **cálculo**. Na radiação térmica precisam ser resolvidas doze vezes as técnicas, distribuídas em três de **relatar**, seis de **cálculo** e três de **interpretação de dados**. O efeito fotoelétrico possui um total de oito técnicas, com duas tarefas de **relatar**, uma de **relacionar**, quatro de **cálculo** e uma de **interpretação de dados**. Com a aplicação total de seis técnicas está o princípio da incerteza, sendo aplicadas duas vezes, em tarefas, a técnica de **relatar** e quatro a técnica de **cálculo**. Para a radiação eletromagnética são empregadas uma técnica de **relatar**, duas de **relacionar** e duas de **cálculo**. A dualidade possui três tarefas com a técnica de **cálculo** e o princípio da incerteza tem duas tarefas com a técnica de **relatar**.

A técnica mais frequente é o **cálculo**, com um total de trinta e cinco ocorrências, somando 60%. As técnicas de **relatar**, com 27%, somam

dezesseis tarefas, **relacionar** aparece três vezes e a **interpretação de dados** possui quatro tarefas.

## 6.10 CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE TAREFAS – LIVRO DIDÁTICO 2

Como a técnica mais utilizada refere-se ao processo de calcular variáveis presentes nas relações formais expostas no livro didático, classificam-se estas em tipos de tarefas, mostradas na tabela 7.

Tipos de tarefas ( <i>T</i> )	Número da tarefa	Total de tarefas
Cálculo da função trabalho	$t_4; t_7;$	<b>2</b>
Cálculo do comprimento de onda de De Broglie	$t_{48}; t_{51}; t_{52};$	<b>3</b>
Cálculo da energia (fóton)	$t_6; t_8;$	<b>2</b>
Cálculo da potência (fótons)	$t_{14}; t_{16}; t_{17}; t_{18};$	<b>4</b>
Cálculo da frequência (fóton)	$t_{19};$	<b>1</b>
Cálculo da frequência (espectro hidrogênio)	$t_{25}; t_{26}; t_{27}; t_{28}; t_{29}; t_{30}; t_{33};$ $t_{34}; t_{35}; t_{36}; t_{37}; t_{38}; t_{39}; t_{40};$ $t_{46};$	<b>15</b>
Cálculo da incerteza	$t_{53}; t_{54}; t_{57}; t_{58};$	<b>4</b>
Outros cálculos	$t_{10}; t_{11}; t_{22}; t_{47};$	<b>4</b>
Total de tarefas		<b>35</b>

Tabela 7. Tipos de tarefas – Livro Didático 2

Nesse sentido, o tipo de tarefa *Cálculo da frequência (espectro hidrogênio)* possui quinze ocorrências, somando 42% das tarefas de **cálculo**. O *Cálculo da potência (fótons)*, assim como o *Cálculo da incerteza* e *Outros cálculos* possuem um total de quatro tarefas cada. O *Cálculo do comprimento de onda de De Broglie* aparece em três tarefas. O *Cálculo da função trabalho* e o *Cálculo da energia (fóton)* têm duas tarefas cada. E o *Cálculo da frequência (fóton)* tem uma tarefa.

## 6.11 CONCLUSÕES

Ao analisar o discurso presente no Livro Didático 2 pode-se concluir que, no geral, são apresentados os resultados experimentais que não conseguiam ser explicados pela teoria e modelos da época. Nesse sentido, o livro expõe que novas hipóteses são formuladas de forma

teórica, utilizando o ferramental matemático e/ou com verificações experimentais, possibilitando, assim, testar as hipóteses. Significados físicos para os novos modelos são procurados, por vezes trazendo analogias e modelos clássicos para tentar interpretar fenômenos microscópicos. Após a descrição de aspectos fenomenológicos do objeto, resultados experimentais, comparação e construção de novo modelos e hipóteses e, conseqüentemente, a verificação destes, o texto finaliza com uma equação matemática, que será usada na resolução de exercícios.

Pode-se inferir que, novamente, as tarefas propostas para a instrução da Teoria Quântica no Livro Didático 2 são na maioria as tarefas de calcular, ou seja, aplicação direta de expressões matemáticas fornecidas pelo texto do livro. Em relação às tarefas pode-se, também, observar que o modelo atômico e a radiação térmica são os conceitos mais trabalhados no Livro Didático 2, focando sua abordagem nas tarefas de **cálculo**. E embora o livro exponha aspectos relacionados aos experimentos, modelos, conceitos e hipóteses, estes são pouco tratados em relação aos aspectos formais. Pois as explicações a respeito, por exemplo, do princípio da exclusão de Pauli ( $t_{41}$ ) – presente somente nesse livro didático – ou do átomo de Bohr ( $t_{37}$ ), ou do conceito de corpo negro ( $t_{33}$ ), são solicitadas uma vez apenas. Por outro lado o *Cálculo da frequência (espectro hidrogênio)* relacionado às frequências das series de Balmer, Paschen e Lyman são repetidas quinze vezes.



## 7 LIVRO DIDÁTICO 3 – CONEXÕES COM A FÍSICA

O Livro Didático 3 (Conexões com a Física) é um dos livros aprovados pelo Ministério da Educação e distribuídos nas unidades escolares em todo o Brasil. Esse exemplar possui três volumes referentes aos três anos do Ensino Médio. Os conhecimentos relacionados aos conceitos de Física Moderna encontram-se no volume 3. A apresentação da análise seguiu a sequência dos tópicos expostos no livro didático. Assim foi investigada a abordagem do texto em relação aos fenômenos quânticos, ressaltando os conceitos, modelos, formalismo matemático e experimentos apresentados pelos autores. Dentro de cada seção, que traz como título o fenômeno e/ou conceito estudado, encontra-se a descrição narrativa do livro, respeitando-se a ordem apresentada por este.

### 7.1 RADIAÇÃO TÉRMICA

#### *Questões da Física do século XX*

No início dessa unidade apresentam-se, segundo os autores, duas revoluções que mudaram a Física. A primeira delas chamada pelo texto de: “A primeira ‘nuvem’ a nublar a Física Clássica: o experimento de Michelson-Morley” (SANT’ANNA et. al, 2011, p.331) refere-se aos modelos da Física Clássica para descrever fenômenos em que os objetos possuem grandes velocidades, considerando os conceitos de espaço e tempo como não absolutos, referente à Teoria da Relatividade de Einstein que não será tratada nessa dissertação. A segunda concerne à revolução causada, como mencionado no texto, pelos trabalhos de físicos como Planck, Bohr e Heisenberg. Nas palavras presentes no livro.

Nesta Unidade estudaremos os questionamentos que abalaram os conhecimentos da Física Clássica e as teorias que os cientistas do século XX desenvolveram não só para explicar fenômenos que ainda permaneciam misteriosos, como também para tornar compatíveis teorias antigas e novas. (SANT’ANNA et. al, 2011, p.330)

### *Fenômenos que a Física Clássica não explicou*

São, concisamente, mencionadas a Teoria Eletromagnética, as equações de Maxwell, que sintetiza o conhecimento acerca dos objetos de estudo dessa parte da Física Clássica, e a verificação experimental desse conhecimento em relação aos campos elétricos e magnéticos e suas propriedades ondulatórias, embora as expressões matemáticas não sejam apresentadas. O discurso se desdobra com a constatação experimental sobre as ondas eletromagnéticas e o valor de sua velocidade no vácuo, conseqüentemente, concluindo que a luz é uma onda eletromagnética. O texto expõe de maneira direta, a partir da constatação da velocidade da luz, a classificação de luz como uma onda eletromagnética.

Posteriormente os autores fazem uma analogia com a propagação de ondas na superfície do mar e ondas sonoras, questionado o leitor que se em ambos esses exemplos as ondas necessitam de um meio para se propagarem, as ondas eletromagnéticas também precisariam de um meio. Nesse sentido, menciona-se que no final do século XIX os físicos acreditavam em um conceito para explicar essa questão, chamado de *éter luminífero*, iniciando, assim, a abordagem à Teoria da Relatividade.

A certeza que os físicos, segundo o texto, tinham acerca da descrição do Universo era reunida em cinco grandes teorias: Mecânica, Óptica, Ondulatória, Termodinâmica e Eletromagnetismo. Porém, aponta-se que existia o problema referente à explicação da intensidade da radiação emitida por um corpo negro de forma que as previsões teóricas concordassem com os dados experimentais. Assim, expõe-se que, embora existisse uma hipótese para solucionar o problema da radiação térmica, totalmente contrária à Física Clássica, sua justificativa somente ganhou força com a explicação do efeito fotoelétrico. Dessa maneira, o texto relata dois problemas que a Física Clássica deveria resolver e que, conseqüentemente, deram origem a duas novas teorias.

### *A segunda “nuvem” a nublar a Física Clássica: a radiação emitida por um corpo negro*

Com a definição de temperatura e sua respectiva ligação com energia térmica inicia-se essa parte. Cita-se o pressuposto de Lord Kelvin (1825-1907) acerca de sua escala e o zero absoluto, já afirmando que, segundo a Teoria Eletromagnética, cargas aceleradas emitem radiação (ondas eletromagnéticas).

Além da representação gráfica de uma onda eletromagnética é apresentada a curva do espectro de radiação emitida por um objeto em função de algumas temperaturas. São mencionadas as conclusões de Kirchhoff em relação à emissão e absorção de radiação por objetos aquecidos e em relação à intensidade da radiação emitida dependente da temperatura. Nesse sentido, definindo-se o conceito de corpo negro. Nas palavras do texto. “Corpo negro ideal é o corpo capaz de absorver toda a radiação de determinada frequência que nele incide e, da mesma forma, emitir toda radiação térmica que produz.” (SANT’ANNA e. al., 2011, p. 339). A partir dessa definição propõe-se um modelo que representa um corpo negro, assim cita-se o modelo da cavidade com um pequeno orifício e os estudos experimentais a respeito do espectro de radiação térmica.

Com o aprimoramento dos aparelhos e síntese dos dados experimentais já existentes os autores relatam que o físico Wilhelm Wien chegou a duas conclusões importantes. A primeira refere-se a não variabilidade da curva de acordo com o material do corpo negro. A segunda está relacionada com o pico da curva e seu deslocamento para frequências maiores com o aumento de temperatura. Cita-se a relação matemática conseguida por Wien que descreve esse comportamento e sua hipótese sobre a constituição molecular do corpo negro, representada por pequenos osciladores análogos a um sistema massa-mola.

### *O problema da radiação de um corpo negro*

É apresentado no início dessa parte do texto didático um gráfico comparando a radiação de corpo negro, segundo o modelo de Wien e o modelo de Rayleigh-Jeans. Ambas as perspectivas representadas no gráfico com os resultados experimentais. No gráfico da intensidade de radiação e frequência chama-se a atenção para a região de baixa frequência em que os dados experimentais concordam com a previsão de Wien, existindo, para altas frequências, certa discrepância entre os mesmos.

Na tentativa de compreender os resultados empíricos menciona-se, no texto, que Rayleigh e Jeans consideraram as ondas eletromagnéticas presentes dentro da cavidade como ondas estacionárias, sendo possível, dessa maneira, obter uma expressão matemática que concorda com os dados experimentais. Nesse sentido, as previsões do modelo de Rayleigh-Jeans corroboram com a experiência para o caso de baixas frequências, porém discordam para o caso de altas frequências. Cita-se, também, que

tal problema teórico ficou conhecido como *catástrofe do ultravioleta*. Os autores relatam que “todos” os modelos que utilizavam os pressupostos da Física Clássica falharam em explicar o comportamento da radiação.

### 7.1.1 Considerações

O início do estudo da Teoria Quântica no Livro Didático 3 é apresentado juntamente com os problemas teóricos que a Física enfrentou em relação à Teoria da Relatividade. O objetivo didático foca-se na informação sobre a limitação dos modelos da Física Clássica para resolver os problemas relativísticos e os fenômenos em nível microscópico em acordo com os resultados experimentais.

O percurso didático desenvolve-se com o modelo ondulatório proposto, pela Teoria Eletromagnética e pelas equações de Maxwell, para o estudo dos campos elétrico e magnético, trazendo a informação da verificação empírica de que esses campos são constituídos de ondas eletromagnéticas e que a luz é uma onda. A propagação de ondas sonoras na superfície de mar é usada como analogia para explicar as ondas eletromagnéticas.

Em seguida aborda-se a radiação térmica, a ligação com a temperatura, a escala Kelvin e o modelo do eletromagnetismo em que cargas aceleradas emitem radiação. A representação gráfica do espectro da radiação emitida em função da temperatura é usada, citando a conclusão de Kirchhoff para a emissão e absorção de radiação de objetos aquecidos, define-se assim o conceito de corpo negro. Assumindo, dessa forma, que a partir desses resultados e conclusões foi possível explicar o conceito de corpo negro utilizando o modelo da cavidade com um orifício e os estudos experimentais para o espectro de radiação térmica.

Na sequência o texto afirma que com novos resultados empíricos Wien concluiu que para um corpo negro a intensidade da radiação não depende do material, e que para temperaturas mais altas os valores da intensidade da radiação se tornam maiores, assim como os valores da frequência. Nesse sentido, apresenta-se a relação matemática de Wien e o uso do modelo de pequenos osciladores, por analogia, semelhante ao sistema massa-mola.

Para a investigação do problema da radiação de corpo negro o texto compara, usando um gráfico, os modelos de Wien e Rayleigh-Jeans, representando no mesmo, também, os valores dos resultados experimentais. A concordância para valores da radiação no caso das

baixas frequências e a divergência para o caso de altas frequências é abordada. E a partir do modelo da cavidade e as ondas estacionárias em seu interior apresenta-se uma relação matemática em que os resultados experimentais estão em acordo com algumas partes da teoria, porém com outras não, citando, assim, o problema da catástrofe do ultravioleta. O texto expõe, também, que os modelos da Física Clássica falharam em tentar descrever o comportamento para a radiação de corpo negro.

Na apresentação da radiação térmica são utilizadas pelo livro: a verificação experimental das ondas eletromagnéticas, a analogia com onda mecânica, a escala Kelvin, gráfico do espectro da radiação emitida, o conceito de corpo negro de Kirchoff, o modelo da cavidade, experimento do espectro da radiação térmica, o modelo dos osciladores, a analogia sistema massa-mola, a relação formal de Wien, o modelo de Rayleigh-Jeans, a ondas estacionarias e as relações matemáticas de Rayleigh-Jeans. São citadas as Equações de Maxwell, a Lei do deslocamento de Wien, o Eletromagnetismo e a Física Clássica.

## 7.2 EFEITO FOTOELÉTRICO

### *O efeito fotoelétrico*

Com a descrição do eletroscópio – aparelho utilizado para reconhecer a presença de cargas elétricas – e sua relação com o efeito fotoelétrico, inicia-se essa parte. Descreve-se que esse instrumento pode ser descarregado eletricamente (emitir elétrons) quando iluminado com radiação ultravioleta. O texto expõe que o efeito fotoelétrico foi uma descoberta “acidental” de Hertz em seu estudo sobre a geração e detecção de ondas eletromagnéticas, chamando a atenção para a constatação das faíscas do detector serem sensíveis a luz ultravioleta. Nesse sentido, citam-se os estudos de Philipp Lenard (1862-1947) e a construção de um aparelho experimental que pudesse investigar melhor esse fenômeno. Concluindo, basicamente, que esse efeito ocorre somente acima de determinada frequência e, abaixo de certa frequência mínima, não importa a intensidade da luz, o efeito não se observa.

Mais tarde, segundo o texto, Maxwell verificou que a luz é uma onda eletromagnética que consiste de variações temporais de campos elétricos e magnéticos, justificando, teoricamente frente ao Eletromagnetismo, a capacidade da luz de arrancar elétrons de um material, vencendo, assim, a força elétrica. Descreve-se que segundo a

Física Clássica o fenômeno não deveria depender da frequência, mas estar ligado à intensidade da luz, porém observou-se que mesmo baixíssimas intensidades podem provocar o efeito, estando este, então, relacionado com a frequência. São mencionadas, também, as discrepâncias entre as previsões teóricas e os resultados experimentais em relação à energia cinética das cargas arrancadas do material, independentemente da intensidade da luz e relacionado com a frequência da radiação incidente. E para estas, da mesma forma, os modelos clássicos não conseguiam explicar dos dados empíricos.

### 7.2.1 Considerações

No caminho didático o estudo de um espectroscópio é usado para introduzir o efeito fotoelétrico. O experimento de Hertz é citado como referência ao início da investigação desse fenômeno. O modelo de Maxwell para ondas eletromagnéticas explica a capacidade da luz em ejetar elétrons de um material, porém não explica por que esse fenômeno depende da frequência e não da intensidade da luz incidente. Constam, também, as divergências entre os modelos clássicos para compreender como esse fenômeno ocorre, sua relação com energia cinética, intensidade da luz, frequência e resultados experimentais.

Nesse sentido, basicamente, são utilizadas para abordar o efeito fotoelétrico: uma descrição de um eletroscópio, o experimento de Hertz e o modelo de Maxwell (onda eletromagnética), abordando, assim, o Eletromagnetismo e a Física Clássica.

## 7.3 RADIAÇÃO TÉRMICA – EFEITO FOTOELÉTRICO

### *Elementos da Mecânica Quântica*

A narrativa inicia-se com a menção de Max Planck e seu trabalho sobre a radiação de corpo negro apresentado na reunião da Sociedade Alemã de Física. Afirma-se que tanto o trabalho quanto a hipótese proposta por ele não chamaram a atenção da comunidade científica, pois Planck não conseguia atribuir à sua explicação um sentido físico.

Os trabalhos publicados por Albert Einstein no ano 1905 são citados em seguida. Nesse sentido, menciona-se que seu estudo intitulado “Um ponto de vista heurístico sobre a produção e transformação da luz” (EINSTEIN, 1905, apud SANT’ANNA, 2011, p. 366) traria grandes

contribuições para hipótese de Planck. O texto afirma que o modelo proposto por Einstein contrariava teoricamente a perspectiva ondulatória para a luz, que, na época, recentemente havia sido assumida como uma onda eletromagnética.

### *O nascimento da Mecânica Quântica*

O discurso comenta que a Mecânica Quântica inspira nos leigos certo mistério. Cita-se, em seguida, que a expressão esta associada à palavra latina *quantum*, que significa quantidade, sendo utilizada pela Física para conceituar uma unidade mínima e indivisível.

Novamente relata-se sobre o problema da radiação de corpo negro. Afirma-se que o trabalho de Planck marcou o início da Mecânica Quântica e da Física Moderna, pois estavam sendo construídos novos modelos para explicar fenômenos que a Física Clássica não conseguia solucionar. Resgatam-se os problemas e soluções, já apresentados, sobre a fórmula de Wien e Rayleigh-Jeans acerca da radiação de corpo negro e, assim, introduz-se a hipótese de Planck sobre pequenos osciladores que constituíam a matéria.

Nesse sentido, cita-se que Planck utilizou um método chamado interpolação com o intuito de obter uma função que estivesse de acordo com as partes válidas das expressões matemáticas já conhecidas (a de Wien e a de Rayleigh-Jeans) e com os de valores possíveis de frequência referentes aos resultados empíricos. Para fazer a interpolação Planck supôs que a energia  $E$ , que emanava dos osciladores dentro da cavidade, poderia somente assumir valores inteiros e proporcionais à frequência  $f$ . Apresenta-se, assim, a expressão matemática  $E = hf$ .

### *Um novo modelo para a luz*

No início dessa parte comenta-se sobre a limitação do modelo ondulatório aplicado à luz para explicar o efeito fotoelétrico. Nesse sentido, a hipótese de Einstein para o fenômeno está relacionada, segundo o texto, diretamente com a explicação de Planck para a radiação de corpo negro. Pois Einstein supôs que a luz seria constituída de pequenos pontos de energia, quantizados no espaço, e a energia desses pacotes de luz é expressa pela mesma relação proposta por Planck ( $E = hf$ ).

O texto relata, porém, que a suposição para o efeito fotoelétrico seria inteiramente diferente da proposta para a radiação de corpo negro,

pois Planck não atribuiu nenhum significado físico aos quanta de energia. Nas palavras expostas no livro.

Para formular sua hipótese, Einstein aplicou um procedimento muito utilizado para estudar a relação entre as grandezas fundamentais da termodinâmica: temperatura, pressão e volume. Nesse procedimento, um gás está contido em um cilindro munido de um êmbolo livre. Ao comprimirmos o gás com o êmbolo, a temperatura e a pressão aumentam, devido ao aumento do número de choques entre as moléculas do gás (temperatura) e dessas moléculas com as paredes do cilindro (pressão). (SANT'ANNA, 2011, p. 368)

A discussão sobre a natureza ondulatória da luz é apresentada com os trabalhos de Thomas Young sobre interferência, a perspectiva de Maxwell de que a luz seria uma onda eletromagnética e a verificação experimental de Hertz dessas ondas. Aponta-se, então, que esta perspectiva estava em contradição com a perspectiva de Einstein de que luz seria constituída de corpúsculos de energia.

#### *A explicação de Einstein para o efeito fotoelétrico*

A explicação para o efeito fotoelétrico surgiu, segundo o texto, de uma forma bem simples, expostas nas seguintes palavras.

A proposta de Einstein para explicar o efeito fotoelétrico com seu modelo para a luz era bastante simples: ele considerou que a energia máxima que um elétron poderia receber até ser arrancado da superfície do metal seria a energia total de um único *quantum* de luz, descontando o trabalho realizado por esse *quantum* para arrancar o elétron de placa:  $E_{ma} = hf - T$ , em que  $T$  é a chamada função trabalho, quantidade característica de cada material. (SANT'ANNA, 2011, p. 369)

Essa explicação em relação à energia concorda com os resultados experimentais, pois a energia máxima é diretamente proporcional à frequência e não à intensidade da luz. São apresentados, ainda, casos específicos, por exemplo, quando a energia máxima recebia pelos elétrons é nula, assim sendo possível estimar a frequência mínima para a ocorrência do fenômeno para determinado tipo de material.



### 7.3.1 Considerações

Continuando a abordagem da Radiação Térmica e do Efeito Fotoelétrico apresenta-se o problema da radiação de corpo negro, a hipótese de Planck para explicar os resultados empíricos, além da hipótese de Einstein para explicar os resultados experimentais desse efeito. Nesse sentido, afirma-se que ambas as hipóteses contrariavam as teorias vigentes na época e, conseqüentemente, novos modelos precisavam ser construídos para compreender o fenômeno da radiação de corpo negro. A suposição da constituição da matéria como pequenos osciladores, as relações matemáticas de Wien e Rayleigh-Jeans para a radiação complementam o texto.

Posteriormente, os autores chamam a atenção para os valores discretos com múltiplos inteiros que são verificados junto ao formalismo matemático, possuindo como principal objetivo didático informar que a característica descontínua da natureza, que era apresentada pela hipótese de Planck, abalou as convicções de muitos físicos e não se encaixava nos modelos da física clássica. Nesse sentido, afirma-se que Planck utilizou o método das interpolações para construir uma expressão matemática que estivesse em acordo com as observações experimentais. A solução de Planck sobre o modelo da cavidade, os osciladores harmônicos e os valores discretos de energia proporcionais à frequência são relatados diretamente, finalizando com a expressão matemática para energia, constante de Planck e a frequência ( $E = hf$ ).

No percurso didático, também, são mencionadas as limitações do modelo ondulatório para compreender os resultados experimentais do efeito fotoelétrico para a luz. Cita-se à hipótese de Einstein e utiliza-se a constante de Planck, em que a luz pode ser representada como pequenos pontos de energia, assim expõe-se a equação matemática para a energia em função da constante ( $h$ ) e da frequência. Aborda-se, também, o modelo ondulatório para luz, corroborado pelas investigações de Young e Maxwell, porém em contradição com as verificações experimentais de Hertz e a hipótese de Einstein da luz ser uma partícula.

Dessa maneira, o livro faz uma ligação entre a radiação térmica e o efeito fotoelétrico, empregando nesse processo: o modelo de Planck (energia quantizada), o modelo de Einstein (Luz), as relações formais de Wien e Rayleigh-Jeans, o modelo dos osciladores, a relação matemática de Planck, o conceito de fóton, a experiência de Young, o modelo de Maxwell (Luz) e a relação formal do efeito fotoelétrico. São abordadas a

Lei da conservação da energia, a Física Clássica, a Termodinâmica e a Teoria Ondulatória.

Existem duas subseções no final do capítulo que recebem o título de *Para saber mais (Saber Físico e tecnologia)* e *(Conexões com o cotidiano)*. A primeira apresenta um breve texto sobre as máquinas fotográficas digitais e o *chip* CCD, e a segunda explica o funcionamento de um dispositivo utilizado na iluminação pública, chamado de LDR (resistência dependente da luz).

#### 7.4 CATEGORIZAÇÃO DAS TAREFAS – LIVRO DIDÁTICO 3

A única categoria da tarefa presente no Livro Didático 3 diz respeito ao efeito fotoelétrico. Nesse sentido, todos os treze exercícios tratam do mesmo conceito, somando um total de dezessete tarefas, expostos na tabela 8. Os exercícios e a descrição das tarefas do Livro Didático 3 encontram-se no anexo D.

Categoria da tarefa	Número do exercício	Total de tarefas
Efeito fotoelétrico	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13	<b>17</b>

Tabela 8. Categorias das tarefas – Livro Didático 3

#### 7.5 TÉCNICAS PARA RESOLVER AS CATEGORIAS DAS TAREFAS – LIVRO DIDÁTICO 3

Seguindo a mesma metodologia utilizada para analisar os livros didáticos anteriores apresenta-se a tabela 9. Porém, como somente o efeito fotoelétrico é tratado nesse livro didático todas as tarefas possuem a mesma categoria. Apresentado, assim, as tarefas e as técnicas para resolvê-las.

Categoria da tarefa	Técnicas					Total de técnicas (Tipo de tarefa)
	Relatar	Relacionar	Cálculo	Interpretação de dados	Gráfico	
Efeito Fotoelétrico	$t_9$ ;	$t_{12}; t_{13}$ ;	$t_1; t_2; t_3; t_4; t_6;$ $t_7; t_8; t_{10}; t_{11};$ $t_{14}; t_{15}; t_{16}; t_{17};$	$t_5$ ;		<b>17</b>
Total de técnicas	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>13</b>	<b>1</b>		<b>17</b>

Tabela 9. Técnicas e tipos de tarefas – Livro Didático 3

A técnica de **cálculo** é utilizada em treze tarefas, totalizando 76% das tarefas; em duas tarefas é usada a técnica de **relacionar**; as técnicas de **relatar** e **interpretação de dados** estão presentes em uma tarefa cada.

## 7.6 CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE TAREFAS – LIVRO DIDÁTICO 3

Novamente, como a maioria das tarefas está associada à técnica de **cálculo**, classificou-se estas em tipos de tarefas (tab. 10), seguindo a mesma metodologia e pressupostos dos livros anteriores e que se desdobrarão, também, nos próximos.

Tipos de tarefas ( <i>T</i> )	Número da tarefa	Total de tarefas
Cálculo da função trabalho	$t_4; t_{10}; t_{15}; t_{17};$	<b>4</b>
Cálculo da frequência de corte	$t_1; t_7; t_{14}; t_{16};$	<b>4</b>
Cálculo do comprimento de onda (fóton)	$t_{11};$	<b>1</b>
Cálculo da potência (fótons)	$t_6;$	<b>1</b>
Cálculo taxa de emissão (elétron)	$t_3;$	<b>1</b>
Cálculo da energia cinética (elétron)	$t_2; t_8;$	<b>2</b>
Total de tarefas	<b>13</b>	<b>13</b>

Tabela 10. Tipos de tarefas – Livro Didático 3

Dessa maneira, o *Cálculo da função trabalho* é repetido em quatro tarefas. Também com quatro tarefas aparece o *Cálculo da frequência de corte*. O *Cálculo da energia cinética (elétron)* é solicitado em duas tarefas. E com uma tarefa cada, estão: o *Cálculo do comprimento de onda (fóton)*, o *Cálculo da potência (fótons)* e o *Cálculo taxa de emissão (elétron)*.

## 7.7 CONCLUSÕES

O percurso didático do Livro Didático 3 expõe, brevemente, os problemas teóricos e experimentais como novos desafios para os pesquisadores, então, novos modelos são propostos e testados empiricamente. Representações gráficas são usadas para explicar aspectos da teoria e os resultados experimentais, introduzindo, assim, relações matemáticas que pudessem prever novos resultados que, posteriormente, são verificados. Esse texto foca, principalmente, na radiação de corpo negro e o efeito fotoelétrico. Seguindo, basicamente, a apresentação de anomalias experimentais frente à teoria e os modelos clássicos, formulação de novas hipóteses, verificação experimental e formulação de relações matemáticas, o texto expõe os aspectos da Teoria Quântica, relatando, brevemente, o conceito da dualidade onda-corpúsculo. Novamente, o livro didático aborda, em sua grande maioria, tarefas associadas à aplicação de relações formais associadas aos Tipos de Tarefas. Esse livro a despeito das outras categorias das tarefas somente aborda o efeito fotoelétrico, e não apresenta justificativa para tal além das escolhas particulares dos autores.

## 8 LIVRO DIDÁTICO 4 – QUANTA FÍSICA

O Livro Didático 4 (Quanta Física) também é um dos livros aprovados pelo MEC e distribuídos nas unidades escolares em todo o Brasil. Esse exemplar possui três volumes referentes aos três anos do Ensino Médio, sendo que os conhecimentos de Física Moderna e Contemporânea encontram-se no volume 3.

Na apresentação desse livro, também, foram categorizados, dentro do discurso do texto, os conhecimentos que este aborda. E que são trazidos como título, em negrito, nas seções a baixo. No título da primeira seção pode-se observar que esse livro possui uma abordagem mais voltada para o cotidiano em relação aos Livros Didáticos anteriores.

### 8.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

#### *As radiações na vida cotidiana*

O primeiro contato que temos com os objetos se dá pela luz, a radiação luminosa, com suas cores e seu brilho. Isso vale tanto para objetos com luz própria, como lâmpadas, velas, semáforos, telas de TV, o Sol e outras estrelas, quanto para objetos iluminados, como roupas, livro, cartazes, nuvens, a Lua, paisagens e também as pessoas. A luz tem a ver, ainda, com sentimentos e humores; luzes e fogos simbolizam festas, branco é paz, vermelho é quente, e azul é frio. (MENEZES et. al., 2010, p. 10)

Com esse discurso, apresentado no início do capítulo 1 do livro do terceiro ano, introduz-se o estudo da radiação e matéria. Cita-se, em seguida, a percepção do calor junto com a radiação térmica e alguns exemplos como o Sol, resistores elétricos e lâmpadas, referentes a fontes de calor. O texto afirma que a radiação térmica e calor são ondas eletromagnéticas. Nas palavras expostas no livro.

Tanto a luz, que nos permite enxergar, quanto o calor, que sentimos na pele, são ondas eletromagnéticas que nos atingem, cuja radiação térmica corresponde ao infravermelho de

frequência mais baixa que a luz visível.  
(MENEZES et. al., 2010, p. 11)

Com exemplos de materiais para contenção e absorção de calor são citadas a garrafa térmica e placas coletoras solares, respectivamente. Em seguida são apresentados alguns casos em que a radiação eletromagnética aparece na vida cotidiana.

#### *A representação por potenciação do espectro eletromagnético*

Nessa parte cita-se a representação do espectro eletromagnético. Chama-se a atenção para a escala matemática de potenciação que é descrita assumindo um intervalo entre  $10^0$  e  $10^2$ , correspondente à região da frequência da rede elétrica, e outro intervalo de  $10^{20}$  e  $10^{22}$  de mesma largura, referente à região da radiação gama.

#### *As radiações na medicina*

A utilização e aplicação de instrumentos que empregam o conhecimento acerca dos estudos da radiação eletromagnética na medicina são abordadas. São mencionados os raios X, para a investigação do corpo humano, além da tomografia computadorizada para construção de imagens em três dimensões. O texto trata de aspectos de penetrabilidade, absorção e emissão utilizados em outros tratamentos de saúde como, por exemplo, radiação gama, ressonância nuclear magnética e tomografia cerebral.

#### *As radiações na indústria*

Com a mesma abordagem do tópico anterior são citadas as aplicações da radiação eletromagnética na indústria. Aspectos como a prevenção de acidentes, presentes na gamagrafia para a investigação de peças mecânicas, e o *laser* utilizado para cortes de precisão são alguns dos exemplos.

#### *As radiações na guerra*

Da mesma forma, cita-se que para finalidades militares são empregados vários tipos de radiação. Tanto na orientação e localização de aeronaves quanto no acerto preciso de alvos em guerras.

### *As radiações na ciência*

As aplicações da radiação eletromagnética nas Ciências da Natureza e das Ciências Humanas são apresentadas, como, por exemplo, a investigação do espaço, o mapeamento da superfície da Terra, pesquisas em história e arqueologia, estudo da estrutura atômica, etc.

#### **8.1.1 Considerações**

O percurso didático sobre a radiação eletromagnética inicia com o relato sobre a luz no cotidiano associada à radiação luminosa e as cores, sendo exemplificados e definidos objetos com e sem luz própria. Afirmando que o meio onde vivemos está inteiramente preenchido com ondas eletromagnéticas o texto parece ter como objetivo didático aproximar o conceito de radiação a aspectos do dia-a-dia.

Na sequência menciona-se a potências na base 10, o texto, basicamente, comenta sobre o espectro eletromagnético e as diferentes proporções relacionadas a escalas logarítmicas. Dessa forma, para explicar os aspectos do modelo referente ao espectro eletromagnético é utilizada a escala matemática de potência na base dez.

Posteriormente são abordadas as ligações da radiação eletromagnética com diversos aspectos da sociedade – guerra, medicina, ciência e indústria – trazendo como exemplos aparelhos e instrumentos que utilizam a radiação eletromagnética. Sem modelos, experimentos ou formalismo, o discurso remete-se à percepção direta que o sujeito possui do mundo.

## **8.2 MODELO ATÔMICO**

### *As radiações e a matéria ao longo da história*

O discurso inicia com aspectos relativos aos significados que o fogo, as rochas, os minerais e os metais tinham para os povos na Antiguidade. Todas ligadas, de alguma forma, a explicações metafísicas e sobrenaturais.

### *As primeiras ideias sobre a constituição da matéria*

Sobre as primeiras ideias da estrutura da matéria o livro menciona que para os filósofos gregos, por exemplo, Demócrito, a matéria era constituída de pequenas partículas indivisíveis. O texto chama a atenção para a perspectiva de dois filósofos frente à incapacidade de se inferir sobre essas partículas, invisíveis aos olhos e aos instrumentos da época. Primeiramente, relata-se que as ideias de Demócrito foram deixadas de lado e depois que Aristóteles acreditava que a Terra era formada de quatro elementos (ar, fogo, terra, água) e quatro qualidades (quente, frio, úmido, seco).

#### *A alquimia e o sonho da transmutação do chumbo em ouro*

Essa parte inicia citando, novamente, a teoria de Aristóteles e sua relação com a alquimia. Aspectos da transmutação do chumbo para outros elementos e a busca para a purificação do espírito são atribuídos a essa prática. Segundo o texto, embora cheia de misticismo e ilusões, a alquimia foi de suma importância para mudança de perspectiva em relação às ideias Aristotélicas.

#### *Dos exalantes espíritos ao átomo de Dalton*

Em seguida relata-se que devido às necessidades da sociedade, principalmente, em relação à indústria e economia, novas técnicas de investigação desdobraram-se sobre a natureza do átomo. Desenvolveram-se, assim, os conceitos de substâncias líquidas, sólidas e gasosas. As transformações químicas são citadas, afirmando que estudiosos como John Dalton (1766-1844) abriram caminho para a construção de um novo modelo do átomo. O texto menciona que algumas descobertas evidenciavam a natureza corpuscular da matéria e sugeriam que o átomo possuía partículas no seu interior. No experimento da eletrólise, por exemplo, em que é possível verificar em cada eletrodo acúmulo de elementos químicos distintos, como se possuíssem cargas elétricas positivas e negativas.

#### *O átomo de Dalton e a lei das proporções múltiplas*

São citadas as diferentes substâncias que são formadas por derivações do mesmo elemento químico, como, por exemplo, o carbono



(dióxido de carbono, monóxido de carbono), enunciando, dessa maneira, a lei das proporções múltiplas.

Se dois elementos químicos se combinam para formar duas ou várias substâncias diferentes, as proporções de cada elemento são sempre múltiplos inteiros de uma quantidade inicial. (MENEZES et. al., 2010, p. 22)

### *O mundo subatômico começa a se revelar*

Para falar da existência de partículas subatômicas o texto recorre à experiência do tubo de gás rarefeito. Cita-se que neste é aplicada uma tensão elétrica entre o cátodo e o ânodo, produzindo um feixe de elétrons retilíneo que ao atingir a parede oposta do tubo, deixa-a fluorescente. É apresentada uma representação esquemática do aparelho. Afirma-se, também, que com o uso de campos magnéticos, Thomson mediu a relação entre a carga e a massa do elétron.

O modelo atômico de Thomson, popularmente conhecido como “pudim de passas”, é citado. Além da descoberta dos raios X por Roentgen, é mencionado que esses raios não são desviados por campos magnéticos ou elétricos, possuindo, assim, características de radiação. Menciona-se, ainda, que ao se fazer um feixe de raios X atravessar um cristal e, conseqüentemente, ocorrer a difração, estes apresentam características ondulatórias.

### *A natureza granular da matéria*

Nessa parte expõe-se que a hipótese atômica, isto é, que a matéria é constituída de diminutas partículas, proposta por Demócrito, começou a ganhar algumas evidências experimentais. Com os trabalhos de Albert Einstein e Jean Baptiste Perrin sobre o movimento browniano, que relaciona o movimento de partículas dispersas em água com a temperatura do líquido, a natureza granular podia ser inferida.

### *Com a radioatividade, o núcleo atômico entra para a história*

A emissão de radioatividade pelo urânio e sua detecção em chapas fotográficas são mencionadas. Trazendo, segundo texto, novas evidências da existência dos átomos. Sendo identificados empiricamente três tipos de emissão (alfa, beta e gama). Com a utilização das partículas alfa em

arranjos experimentais, afirma-se que Rutherford pode inferir sobre a existência de um núcleo central no átomo, que por desviar a maioria das partículas do feixe, seria positivo e possuiria a maior parte da massa do átomo.

### *Partículas e mais partículas*

Continuando a abordagem sobre a matéria, o texto expõe que com a detecção experimental da desintegração artificial do átomo foi possível verificar a existência de partículas como os prótons e nêutrons. Afirmando que o modelo atômico era composto, a partir de novas evidências, de uma nova estrutura que podia justificar a diversidade de elementos químicos. O texto cita, também, a utilização de aceleradores de partículas que possibilitam investigar mais profundamente a constituição da matéria.

### **8.2.1 Considerações**

No percurso didático sobre o modelo atômico o texto inicia com o contexto do meio relacionado às necessidades da sociedade, indústria e economia. E isto fomentou o estudo e a construção de novos modelos atômicos para descrever várias substâncias com o intuito de explicar as transformações químicas. Sendo o modelo de Dalton, o experimento da eletrólise e a definição da lei da conservação para reações químicas aspectos mais modernos na investigação do átomo, pois no início da abordagem são mencionadas a perspectiva do átomo dos filósofos gregos e da alquimia. Possivelmente, aproximando a descrição do átomo a aspectos de outras disciplinas, o livro didático propõe uma abordagem interdisciplinar entre a Física, Filosofia e Química, ou um breve resgate histórico sobre a investigação da matéria.

Em seguida são apresentados os resultados experimentais em relação ao tubo de gás rarefeito citado como estudo mais profundo sobre o átomo. Sendo exposta uma representação do aparelho e a conclusão de Thomson sobre a carga/massa do elétron. O discurso transita desde o modelo de Thomson, que é brevemente descrito, passando pela descoberta dos raios X, a características ondulatórias em seu comportamento e a difração quando esses raios atravessam um cristal. Assim o livro, também, informa sobre a natureza ondulatória da radiação.

Posteriormente o percurso didático associa a natureza corpuscular da matéria ao movimento browniano como uma evidência experimental

cita-se o exemplo de pólen de flor disperso em uma solução, assumindo que dessa forma pode-se verificar a natureza granular da matéria.

Novamente a natureza corpuscular da matéria aparece no discurso trazida por evidências experimentais. Outros experimentos sobre a radioatividade do urânio e a detecção de novos tipos de radiação – alfa, beta e gama – são mencionadas juntamente com o objetivo didático de se estudar o átomo. Dessa forma, a construção de um modelo para o átomo mais próximo do objeto real é apresentada, menciona-se a perspectiva de Rutherford, sem expor as divergências em relação às teorias clássicas.

Dessa maneira, para apresentar o estudo do átomo o texto remete-se a: resgate histórico da investigação da matéria e radiação, relatos da perspectiva grega sobre matéria e, também, da alquimia, a descrição do experimento da eletrólise, o átomo de Dalton, a experiência do tubo de gás rarefeito, a relação carga/massa do elétron, o modelo de Thomson, a descoberta dos raios X, o movimento browniano, o experimento sobre a radioatividade – alfa, beta e gama – e o modelo de Rutherford. Aborda-se, também, a Lei das proporções múltiplas.

### 8.3 RADIAÇÃO TÉRMICA

#### *Energia granulada*

Ao iniciar um novo capítulo relata-se que após diversas descobertas sobre o mundo microscópico, muitas manifestações estranhas começaram a se revelar. Pois se verificava que, nessa perspectiva, partículas se moviam sem trajetórias definidas e ondas colidiam como se fossem corpúsculos.

#### *Grãos de energia*

O livro afirma que a investigação acerca das cores e suas intensidades no espectro emitido por objetos incandescentes apresentavam à Física novas questões que não poderiam ser compreendidas na perspectiva clássica. Estudos concluíam, como exposto no livro, que a cor e o brilho emitido dependiam somente da temperatura do objeto e não do material. Nas palavras do texto.

Enquanto o vermelho-amarelado predomina em aquecimentos moderados, a cor dominante em

temperaturas elevadas era o branco-azulado. Em outras palavras, um forno produz um espectro de luz: quando mais quente está, maior é a predominância de azul e violeta na radiação que ele emite. (MENEZES et. al., 2010, p. 26)

Como as teorias clássicas não conseguiam explicar as diferenças entre as previsões teóricas e as observações experimentais na frequência do violeta cita-se Max Planck, que conseguiu resolver o problema com uma nova hipótese – a quantização de energia. Relata-se, então, que Planck conseguiu encontrar uma constante que levou seu nome e, apesar da formulação matemática consistente com o experimento, ele não atribuiu um significado físico à constante.

### 8.3.1 Considerações

Com um percurso didático começando com as conclusões experimentais sobre a investigação acerca do espectro de radiação térmica e sua discrepância em relação à previsão teórica clássica, o livro inicia o estudo da radiação na perspectiva quântica.

Cabe citar que por opção didática os autores não mencionam a hipótese sobre os osciladores para a quantização de energia, investigações como as de Boltzmann, Wien e Rayleigh-Jeans sobre a absorção e emissão de energia de um corpo negro anteriores às ideias de Planck. Nesse sentido, apenas afirmam que existia tal divergência e que foram resolvidas por Planck. Sendo abordadas: a hipótese de Planck sobre a quantização da energia, a constante  $h$  e a relação matemática ( $E = hf$ ). E a teoria citada é a Física Clássica.

## 8.4 EFEITO FOTOELÉTRICO – MODELO ATÔMICO

### *Grãos de luz*

A solução de Planck para a radiação térmica e de Einstein para o efeito fotoelétrico são apresentadas, concluindo que em certas condições a luz é descrita como onda e em outras pode ser interpretada como partícula. Usa-se um exemplo da uma célula fotoelétrica utilizada em portas de elevadores para explicar o efeito fotoelétrico.

### *Gases incandescentes: espectro descontínuo*

A discussão dessa parte inicia com a conclusão dos resultados dos pesquisadores sobre o efeito fotoelétrico. Dessa maneira, explica-se que quando a luz é emitida por um gás e atravessa um prisma, o espectro produzido não será contínuo, mas sim formado por linhas brilhantes espaçadas por faixas escuras.

A utilização desses espectros descontínuos para a identificação e estudo dos elementos químicos é citada. Assim como a ideia de Niels Bohr de que um elétron ao perder energia decai para uma órbita de menor energia, conseqüentemente, emitindo um fóton. Usa-se como exemplo o modelo atômico semelhante a um sistema planetário. E, também, é apresentada a diferença de energia entre as órbitas,  $\Delta E = hf$ .

#### *O espectro do hidrogênio e os átomos de Rutherford e Bohr*

Para o estudo do espectro de linhas do hidrogênio é citado o modelo do átomo como um sistema planetário, proposto por Rutherford, com um espectro de radiação contínuo. E a partir de outros estudos o texto menciona que Bohr propôs um espectro discreto para o átomo com órbitas fixas. É introduzida a relação matemática para energia de cada órbita, citando que apesar das previsões de Bohr se encaixaram bem para o átomo de hidrogênio, o modelo proposto por este precisava ser constantemente ajustado para explicar o espectro de outros átomos. O texto, também, traz uma representação gráfica dos níveis de energia e as correspondentes transições eletrônicas.

#### **8.4.1 Considerações**

O caminho didático começa com as evidências do comportamento corpuscular da luz, que são apresentadas juntamente com as conclusões de Planck para o fenômeno da radiação térmica e de Einstein para o efeito fotoelétrico. Sendo esse efeito descrito com uma representação de uma célula fotoelétrica, sem apresentar a investigação do fenômeno e os problemas teóricos.

A partir do efeito fotoelétrico refere-se, então, ao estudo do espectro de gases incandescentes. Em seguida é mencionada a hipótese de Bohr para o modelo atômico e a relação matemática para o cálculo da diferença entre dois estados de energia.

O percurso didático continua com a investigação do espectro do átomo de hidrogênio, mencionada juntamente com a evolução e adequação do modelo atômico. Sendo apresentada a equação matemática para o cálculo das energias de cada órbita. As divergências entre o modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio e a aplicação para outros átomos, também, são citadas. Uma representação gráfica para os níveis de energia e as transições eletrônicas complementa o texto.

Nesse sentido, para instrução do efeito fotoelétrico e continuação do modelo atômico são utilizados o: modelo de Planck (quantização da energia), modelo de Einstein (efeito fotoelétrico), célula fotoelétrica, experimento do gás incandescente, modelo atômico de Bohr, modelo atômico de Rutherford, relação matemática para os níveis de energia do átomo e um gráfico dos níveis de energia.

## 8.5 DUALIDADE

### *Ondas que são projeteis e projeteis que são ondas*

O texto inicia com uma evidência experimental sobre os raios X em que a natureza ondulatória destes pode ser inferida por meio dos resultados de interferência e difração. São comparadas à classificação da luz como uma partícula, advindo dos resultados e conclusões do efeito fotoelétrico, e a experiência similar para os raios X. Assim, menciona-se o efeito Compton, afirmando que depois dessa evidência experimental e das conclusões de Compton, a luz passava a ser tratada como um ente físico dual, sendo necessários os modelos ondulatório e corpuscular para explicar seu comportamento. A hipótese de De Broglie é apresentada, mencionando que mais tarde também foi verificada experimentalmente.

### *Difração e interferência*

O estudo desses fenômenos é exposto com a generalização dos efeitos de difração e interferência para qualquer onda, citando, assim, a onda sonora, a onda de luz visível e onda eletromagnética. É apresentada uma representação gráfica para explicar a difração em uma fenda e o caso de ondas interagindo destrutivamente e construtivamente. A equação matemática para se calcular a defasagem entre duas ondas, possibilitando, assim, prever se haverá uma interferência construtiva ou destrutiva é exposta. O caso da interferência em duas fendas é mencionado, mas

somente é tratado como duas fontes de luz, sem o anteparo onde se objetiva o resultado da interferência.

### *Uma nova compreensão do Mundo*

Os limites do entendimento sobre o modelo de atômico e sobre os entes microscópicos da matéria são mencionados frente às teorias clássicas, sendo necessária a construção de uma nova teoria, a Física Quântica.

### *Ondas e partículas clássicas*

O modelo corpuscular é descrito apontando como suas principais características trajetória e quantidade de movimento bem definidas e a transferência de energia após uma colisão. O mesmo se faz para o caso de uma onda, chamando a atenção para a frequência e o comprimento de onda, não sendo possível, assim, localizar uma onda em algum lugar exato do espaço, ao contrário de uma partícula.

### *A luz como partícula*

Em processos no domínio atômico ou molecular, essa clara distinção entre onda e matéria deixa de existir. Nos efeitos fotoelétrico e Compton, grãos de luz chocam-se contra elétrons, transferindo-lhes sua quantidade de movimento, enquanto, ao passarem por cristais, onde as fendas são da distância entre os átomos, elétrons sobrem difração. (MENEZES L. et al., 2010, p. 44)

Após a introdução do discurso acima citado, o texto compara a penetrabilidade das ondas eletromagnéticas em frequências de radio e raios X, chamando a atenção acerca do dano que cada uma dessas radiações pode causar.

### *O elétron como onda*

A partir da seguinte definição é abordada a dualidade, “Ondas de alta frequência, como os raios X, colidem como se fossem partículas; por outro lado, partículas muito pequenas, como elétrons, difratam como ondas” (MENEZES L. et al., 2010, p. 44). Compara-se com uma representação ilustrativa uma bola de futebol tentando atravessar uma fenda com a largura de seu comprimento de onda e um elétron realizando

a mesma tarefa, assim, conclui-se que o elétron difrata, e para o caso da bola a onda associada não seria perceptível, não ocorrendo também difração.

### *Um comportamento dual*

A dualidade onda-partícula de elétrons e fótons dá uma boa ideia do universo quântico nos domínios dos átomos e das moléculas, em que efeitos contrários parecem se complementar, ora com a manifestação de uma característica, como a ondulatória, ora com a manifestação da característica oposta, como a corpuscular. A dualidade onda-partícula pode ser sintetizada assim: os objetos quânticos, como a luz ou os elétrons, se movem como se fossem ondas, mas colidem como se fossem partículas. (MENEZES, L. et al., 2010, p. 44)

Após as descrições anteriores em relação aos resultados experimentais e a construção de novos modelos para compreender a matéria e a radiação, a dualidade é definida segundo a citação acima sem a exploração de sua construção, ou seja, uma discussão mais profunda sobre os experimentos, modelos e conceitos que levaram a constatação da natureza dual da matéria e radiação. Esse conceito é definido, trazendo o relato de evidências experimentais para sua justificativa.

### *Impacto de ondas e difração de partículas*

O modelo corpuscular utilizado para descrever o comportamento da luz no efeito fotoelétrico inicia o discurso dessa seção. São apresentados exemplos de outras radiações como raios X e radiação gama. As mudanças que essas duas radiações podem causar na estrutura celular é mencionada, assim como as relações entre a frequência, a energia e a quantidade de movimento, juntas com a expressão matemática ( $p = h/\lambda$ ).

#### **8.5.1 Considerações**

No estudo da dualidade o texto apresenta as evidências experimentais sobre a difração e interferência dos raios X como características do comportamento ondulatório da radiação e o fenômeno do efeito fotoelétrico é evidenciado como uma amostra da natureza



corpuscular da luz. Em seguida, outro resultado empírico como de Arthur Compton (1892-1962) e suas conclusões sobre a natureza dual da luz é citado. Sendo informada a hipótese de De Broglie e a verificação experimental desta.

Posteriormente, o estudo da difração e interferência é descrito a partir da generalização desses efeitos para qualquer onda, sendo utilizada uma representação gráfica da difração em uma fenda. Definem-se, assim, os conceitos de interferência construtiva e destrutiva. Finalizando com a relação matemática para o comprimento de onda, frequência e a velocidade, e um exemplo para o caso de difração em duas fendas.

A investigação da dualidade foca nas características básicas que descrevem o comportamento sobre ondas e partículas. A dualidade é definida relacionada aos efeitos Compton e fotoelétrico, sendo descrito, afirmativamente, a necessidade para o entendimento desses experimentos os modelos ondulatório e corpuscular.

Nesse sentido, para expor a investigação da dualidade o livro usa: a experiência de difração de raios X, o efeito Compton, o efeito fotoelétrico, a difração em uma fenda, a relação matemática para a diferença de fase, o modelo corpuscular, o modelo ondulatório, a definição do conceito de dualidade e a relação matemática de De Broglie. A teoria mencionada que não se encaixava com alguns modelos é a Física Clássica.

## 8.6 PRINCÍPIO DA INCERTEZA

### *A indeterminação como um princípio*

Com um exemplo de elétrons viajando em um tubo de imagem de TV o texto relata que ao tentar se conhecer a trajetória de um elétron seria necessário iluminá-lo com um fóton, o que, conseqüentemente, o faria mudar de curso. Assim, outro experimento menciona que ao se colocar uma fenda no caminho do elétron, ocorreria difração. Conclui-se, no texto, que objetos quânticos não podem ser observados da mesma maneira que objetos clássicos, e apresentam-se, então, o princípio da incerteza e a relação matemática para posição e momento.

A limitação em se conhecer a trajetória de objetos quânticos contradiz o modelo atômico de Bohr, levando à revisão do modelo atômico e das órbitas elípticas. Cita-se o modelo proposto por Schrodinger, os estados quânticos do átomo e os números quânticos, e

menciona-se o conceito de nuvem eletrônica com uma representação ilustrativa desses estados para o átomo de hidrogênio.

### 8.6.1 Considerações

O percurso didático começa com o discurso sobre a imprecisão em se conhecer alguns parâmetros de entes físicos do mundo microscópico. Sendo definidos o princípio da incerteza e suas relações matemáticas. Segundo o texto essa incerteza acarretou consequências para o modelo atômico de Bohr e órbitas bem definidas. Nesse sentido o livro não menciona as contradições que vinham da Mecânica Clássica e do Eletromagnetismo. Introduce-se, assim, o modelo proposto por Schrodinger, os estados quânticos, os números quânticos e o conceito de nuvem eletrônica com uma representação ilustrativa das nuvens para o átomo de hidrogênio.

Para expor o princípio da incerteza o texto utiliza: o exemplo do tubo de imagem de uma TV, a definição do princípio da incerteza, a relação matemática, o experimento de difração em uma fenda, o modelo atômico de Bohr e o modelo atômico de Schrodinger.

## 8.7 CATEGORIZAÇÃO DAS TAREFAS – LIVRO DIDÁTICO 4

As categorias das tarefas presentes no Livro Didático 4 foram agrupadas na tabela 11. Os exercícios e a descrição das tarefas do Livro Didático 4 encontram-se no anexo E.

Categoria da tarefa	Número do exercício	Total de tarefas
Dualidade	68;69;72;73	<b>17</b>
Ruptura	41	<b>1</b>
Radiação Térmica	40	<b>2</b>
Efeito Fotoelétrico	27;28;29;30;31;32;33;34;35;36;37; 38;39;47;48;52;70;71;74	<b>41</b>
Modelo Atômico	25;26;42;43;45;46;49;50;51	<b>13</b>
Interferência e Difração	53;54;55;56;57;58;59;60;61;62; 63;64;65;66;67	<b>24</b>
Radiação Eletromagnética	1;2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12;13; 14;15; 16;17;18;19;20;21 22;23;24;44	<b>32</b>
<b>Total</b>	<b>74</b>	<b>130</b>

Tabela 11. Categorias das tarefas – Livro Didático 4

Nesse sentido, para instrução da radiação eletromagnética são propostos vinte e cinco exercícios, somando trinta e duas tarefas, correspondendo a 24,6% das tarefas. O efeito fotoelétrico, com dezenove exercícios e quarenta e uma tarefas, tem 31,5% das tarefas. O estudo da interferência e difração tem quinze exercícios, totalizando vinte e quatro tarefas possui 18,4 % das tarefas. O modelo atômico aparece com nove exercícios e treze tarefas. A dualidade possui quatro exercícios e dezessete tarefas. Com um exercício e duas tarefas está a radiação térmica, e com um exercício e uma tarefa a ruptura. Totalizando cento e trinta tarefas nos setenta e quatro exercícios.

### 8.8 TÉCNICAS PARA RESOLVER AS CATEGORIAS DAS TAREFAS – LIVRO DIDÁTICO 4

Com o mesmo procedimento utilizado nos livros didáticos precedentes associam-se as categorias da tarefa com as técnicas para sua resolução (tab. 12).

Categoria da tarefa	Técnicas					Total de técnicas (categorias)
	Relatar	Relacionar	Cálculo	Interpretação de dados	Gráfico	
Dualidade		$t_{108};$	$t_{109}; t_{110};$ $t_{116}; t_{117};$ $t_{118}; t_{119};$ $t_{120}; t_{121};$ $t_{122}; t_{123};$ $t_{124}; t_{125};$ $t_{126}; t_{127};$ $t_{128}; t_{129};$			<b>17</b>
Ruptura	$t_{60};$					<b>1</b>
Radiação Térmica	$t_{58};$	$t_{59};$				<b>2</b>
Efeito Fotoelétrico	$t_{36};$ $t_{45};$ $t_{52};$ $t_{53};$ $t_{54};$		$t_{34}; t_{35};$ $t_{37}; t_{38};$ $t_{39}; t_{40};$ $t_{41}; t_{42};$ $t_{43}; t_{44};$ $t_{47}; t_{49};$ $t_{50}; t_{55};$	$t_{46}; t_{48};$ $t_{51}; t_{57};$		<b>41</b>

			$t_{56}; t_{66};$ $t_{67}; t_{68};$ $t_{69}; t_{70};$ $t_{71}; t_{72};$ $t_{73}; t_{74};$ $t_{82}; t_{83};$ $t_{111}; t_{112};$ $t_{113}; t_{114};$ $t_{115}; t_{130};$			
Modelo Atômico	$t_{32};$	$t_{33};$	$t_{61}; t_{62};$ $t_{64}; t_{65};$ $t_{75}; t_{76};$ $t_{78}; t_{79};$	$t_{81};$	$t_{77};$ $t_{80};$	<b>13</b>
Interferência e Difração	$t_{84};$ $t_{85};$ $t_{88};$ $t_{89};$ $t_{90};$ $t_{91};$ $t_{95};$ $t_{96};$ $t_{97};$ $t_{98};$ $t_{101};$ $t_{102};$ $t_{103};$		$t_{86}; t_{87};$ $t_{92}; t_{93};$ $t_{94}; t_{99};$ $t_{104}; t_{105};$ $t_{106}; t_{107};$	$t_{100};$		<b>24</b>
Radiação Eletromagnética	$t_1; t_2;$ $t_3; t_4;$ $t_8; t_9;$ $t_{10};$ $t_{11};$ $t_{12};$ $t_{13};$ $t_{14};$ $t_{15};$ $t_{16};$ $t_{17};$ $t_{18};$ $t_{19};$ $t_{20};$ $t_{21};$ $t_{22};$ $t_{23};$		$t_5; t_6; t_7;$		$t_{30};$	<b>32</b>

	<i>t</i> <sub>24</sub> ;					
	<i>t</i> <sub>25</sub> ;					
	<i>t</i> <sub>26</sub> ;					
	<i>t</i> <sub>27</sub> ;					
	<i>t</i> <sub>28</sub> ;					
	<i>t</i> <sub>29</sub> ;					
	<i>t</i> <sub>31</sub> ;					
	<i>t</i> <sub>63</sub> ;					
Total de técnicas	<b>49</b>	<b>3</b>	<b>69</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>130</b>

Tabela 12. Técnicas e categorias das tarefas – Livro Didático 4

O efeito fotoelétrico tem distribuídas suas tarefas com quatro técnicas de **relatar**, trinta e duas de **cálculo** e quatro de **interpretação de dados**. Com vinte e oito tarefas com a técnica de **relatar**, três de **cálculo** e uma de **gráfico** está a radiação eletromagnética. A categoria de interferência e difração possui treze tarefas com a técnica de **relatar**, nove de **cálculo** e uma de **interpretação de dados**. O modelo atômico tem uma tarefa com a técnica de **relatar**, uma de **relacionar**, oito de **cálculo**, uma de **interpretação de dados** e duas de **gráfico**. A dualidade possui uma tarefa com a técnica de **relacionar** e dezesseis tarefas com a técnica de **cálculo**. A radiação térmica tem uma técnica de **relatar** e uma de **relacionar**, associadas à suas tarefas. E com apenas uma tarefa e uma técnica de **relatar** aparece a categoria ruptura.

O Livro Didático 4 apresenta na distribuição das cento e trinta tarefas: quarenta e nove tarefas de **relatar**; três tarefas de **relacionar**; sessenta e nove tarefas de **cálculo**; seis de **interpretação de dados**; e três em **gráfico**. As técnicas mais trabalhadas são o **cálculo** com 53% e a técnica da **relatar** com 37%, somando, assim, 90% de todas as tarefas do livro.

## 8.9 CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE TAREFAS – LIVRO DIDÁTICO 4

Para classificação dos tipos de tarefas é inferido a variável que cada uma pretende descobrir (tab. 13). O tipo de tarefa *outros cálculos* apresenta uma distribuição em que cada tarefa possui particularidades que não se repete mais de uma vez e que podem ser vistas no anexo E.

Tipos de tarefas (T)	Número da tarefa	Total de tarefas
Cálculo da frequência (fóton)	$t_5; t_6; t_{67}; t_{118}; t_{119}; t_{120}; t_{121};$	<b>7</b>
Cálculo do comprimento da onda (fóton)	$t_7; t_{44}; t_{56}; t_{92}; t_{111}; t_{126}; t_{127}; t_{128}; t_{129};$	<b>9</b>
Cálculo da energia (fóton)	$t_{34}; t_{35}; t_{42}; t_{43}; t_{46}; t_{47}; t_{49}; t_{50}; t_{55}; t_{66}; t_{73}; t_{82}; t_{112}; t_{115}; t_{122}; t_{123}; t_{124}; t_{125}; t_{130};$	<b>19</b>
Cálculo da frequência de corte	$t_{37}; t_{38}; t_{39}; t_{40}; t_{114};$	<b>5</b>
Cálculo da função trabalho	$t_{68}; t_{69}; t_{70}; t_{71}; t_{72}; t_{74}; t_{83};$	<b>7</b>
Cálculo de difração e interferência	$t_{86}; t_{87}; t_{93}; t_{94}; t_{99}; t_{104}; t_{105}; t_{106}; t_{107};$	<b>9</b>
Cálculo dos níveis de energia (átomo)	$t_{61}; t_{62}; t_{65}; t_{75}; t_{76}; t_{78}; t_{79};$	<b>7</b>
Outros cálculos	$t_{41}; t_{48}; t_{51}; t_{109}; t_{110}; t_{113};$	<b>6</b>
Total		<b>69</b>

Tabela 13. Tipos de tarefas – Livro Didático 4

Nesse sentido, contabilizando o número de tarefas, o tipo de tarefa *Cálculo da energia (fóton)* está presente em dezenove tarefas, correspondendo a 27%. O *Cálculo do comprimento da onda (fóton)* e *Cálculo de difração e interferência* possui cada um nove tarefas. Com sete tarefas estão o *Cálculo da frequência (fóton)*, o *Cálculo da função trabalho* e o *Cálculo dos níveis de energia (átomo)*. E com cinco tarefas aparece o *Cálculo da frequência de corte*.

## 8.10 CONCLUSÕES

A investigação da matéria e radiação, no Livro Didático 4, é abordada associada a aspectos do cotidiano, além de possuir, também, uma sequência histórica relativa à evolução do conceito de átomo e certa aproximação interdisciplinar. No estudo moderno do átomo e da radiação o texto traz a evolução dos resultados experimentais que confirmaram a natureza dual da matéria, porém as conclusões empíricas não são exploradas, apenas relatadas. Para o caso do átomo a abordagem ocorre de mesma forma, sendo apresentados apenas os conceitos prontos para a construção do modelo atômico atual, não mencionando as questões e problemas teóricos. Nesse sentido, a Teoria Quântica é tratada de forma superficial em relação aos aspectos epistemológicos e fenomenológicos,

126

possuindo apenas um breve relato da evolução dos conceitos eleitos pelo livro para sua instrução.

As tarefas de **cálculo** são maioria, também, nesse livro didático. E embora exista um número significativo das tarefas associadas à radiação eletromagnética ligada ao cotidiano e à técnica de **relatar**, muitas como, por exemplo, as tarefas de  $t_{15}$  a  $t_{26}$  são atividades relativas à montagem do espectro eletromagnético em uma escala específica ou detecção de ondas eletromagnéticas usando um rádio portátil em várias situações particulares ( $t_8$  à  $t_{14}$ ). As outras técnicas que pressupõe, para sua resolução, maior discussão e reflexão somam somente doze tarefas.

Dos tipos de tarefas a que possui maior ocorrência é o *Cálculo da energia (fóton)* repetida dezoito vezes, ou seja, usa-se a relação formal  $E = hf$  para se encontrar uma dessas variáveis. Os tipos de tarefas *Cálculo do comprimento da onda (fóton)* e *Cálculo de difração e interferência* são repetidos nove vezes.





## 9 LIVRO DIDÁTICO 5 – FÍSICA

O Livro Didático 5 (Física) possui três volumes referentes aos três anos do Ensino Médio, e novamente, os conhecimentos relacionados aos conceitos de Física Moderna encontram-se no volume 3. Seguindo a mesma metodologia para a apresentação dos Livros Didáticos anteriores, procurou-se inferir o que cada parte do texto procura ensinar e agrupa-las dentro das categorias construídas.

### 9.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

#### *Noções de Física Quântica*

No início do conteúdo sobre a Teoria Quântica cita-se a incapacidade da Física Clássica em explicar o comportamento da matéria, afirma-se, também, que no ano de 1900 começou a ser desenvolvida uma nova teoria chamada de Física Quântica e em trinta anos estava pronta.

#### *Modelo ondulatório para radiações eletromagnéticas*

A instrução sobre radiação eletromagnética é apresentada com as equações de Maxwell, porém não as expondo, somente afirmando que estas sintetizam as leis para descrever o comportamento de fenômenos elétricos e magnéticos e que a variação do campo elétrico no tempo induz um campo magnético e vice-versa. Define-se a radiação eletromagnética como uma onda constituída pela associação entre os campos elétrico e magnético, cita-se os fenômenos de interferência e difração, porém não os explica.

Em seguida menciona-se a comprovação experimental de Hertz, sobre as ondas eletromagnéticas, frente à previsão teórica de Maxwell de que ondas eletromagnéticas são geradas devido à aceleração de cargas elétricas, ou seja, por elétrons oscilantes. Nas palavras do texto, “Quando um elétron (ou outra partícula dotada de carga elétrica) realiza um movimento de frequência  $f$ , a onda eletromagnética emitida também tem frequência  $f$ .” (BISCUOLA et. al., 2010, p. 289). Sendo apresentada uma representação esquemática de um pulso eletromagnético, chama-se a atenção para a característica dos campos elétricos e magnéticos serem variáveis no tempo e na posição, perpendiculares entre si e à sua direção de propagação.

Por meio do cálculo da velocidade de propagação de uma onda eletromagnética realizado por Maxwell usando a equação

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (9)$$

o texto afirma que com o cálculo do valor da velocidade dessa onda, e mais tarde com a verificação experimental, Maxwell conclui que a luz é uma onda eletromagnética.

### 9.1.1 Considerações

O texto, na introdução, chama a atenção para os problemas teóricos e experimentais que a Física possuía no início do século XX, apenas mencionando estes, não apresentando cada um. Assim, inicia-se a abordagem sobre a Teoria Quântica com o estudo da radiação eletromagnética.

A radiação eletromagnética é abordada a partir das conclusões de Maxwell sobre os campos elétrico e magnético, caracterizando essa radiação como uma onda eletromagnética com a mesma velocidade da luz, verificada experimentalmente. Conclui-se, assim, que a luz é uma onda eletromagnética. O texto apresenta os problemas teóricos e experimentais, que a Física Clássica enfrentou, para classificar a radiação somente com a conclusão de Maxwell e o trabalho de Hertz que verificou a hipótese teórica, e finaliza com uma expressão matemática para o cálculo da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas. O texto, ainda, nomeia algumas propriedades dessas ondas, como interferência e difração, porém não as explica.

Nesse sentido, para instruir a radiação térmica são utilizados: o experimento de Hertz, a relação formal para a velocidade da luz e as conclusões de Maxwell. Sendo citada a Física Clássica.

## 9.2 RADIAÇÃO TÉRMICA

### *A radiação térmica*

O estudo da radiação térmica começa definindo esse conceito associado à temperatura de um corpo sólido, que por possuir uma temperatura acima do zero absoluto emite radiação eletromagnética. O texto continua propondo que se aumentarmos a temperatura desse corpo, este emitirá radiação na frequência do vermelho, alaranjado e assim por

diante, até a coloração branca, semelhante a uma lâmpada incandescente acesa.

### *Lei de Stefan-Boltzmann*

No início dessa parte apresenta-se a expressão matemática da Lei de Stefan-Boltzmann ( $Pot = e\sigma AT^4$ ), sendo descrita cada uma das variáveis. Cita-se que para a construção dessa lei, Stefan realizou o estudo experimental e Boltzmann a demonstrou matematicamente. O texto apresenta, também, uma relação matemática para a intensidade,  $I = Pot/A$ .

Em seguida, o livro relata a perspectiva da Teoria Eletromagnética da seguinte maneira.

Segundo a Teoria Eletromagnética Clássica (modelo ondulatório de Maxwell), a radiação térmica é emitida por cargas elétricas do corpo, oscilando nas mais variadas frequências perto de sua superfície, em virtude da agitação térmica. Desse modo, a radiação é emitida em faixa contínua de frequência (espectro contínuo). (BISCUOLA et. al., 2010, p. 290).

Após a conclusão acima se introduz a definição de Kirchhoff em relação à emissão e absorção de radiação eletromagnética de um corpo sólido. Chama-se a atenção que no equilíbrio térmico, as taxas de emissão e absorção são iguais.

### *Radiação do corpo negro*

O estudo da radiação de corpo negro inicia-se com a definição do conceito de corpo negro. “Corpo negro é um corpo ideal que absorve toda a radiação térmica que incide nele. Assim, ele é um absorvedor perfeito, ou seja, seu poder de absorções  $a$  é igual a 1.” (BISCUOLA et. al., 2010, p.290). O texto cita que esse conceito é uma idealização e que qualquer corpo revestido com pigmento preto pode ser considerado um corpo negro.

Posteriormente, utiliza-se a expressão da Lei de Stefan-Boltzmann, porém, agora, que a emissividade de um corpo negro é igual a 1, ou seja,  $e = 1$  obtém-se a equação  $I = \sigma T^4$ . Conclui-se, então, que a intensidade da radiação ( $I$ ) depende da temperatura e independe do material que é feito o corpo negro. O livro afirma que a análise do espectro de emissão

de corpos negros deu origem a ideia de quantização. Nesse sentido, apresenta-se um gráfico da intensidade da radiação em função do comprimento de onda para uma determinada temperatura. Aponta-se na descrição do gráfico, duas características. A primeira refere-se que a radiação térmica emitida é distribuída de forma contínua em relação ao comprimento de onda. A segunda consiste em relatar que para uma máxima intensidade da radiação existe um comprimento de onda específico.

### *Lei de deslocamento de Wien*

Após a definição da radiação de corpo negro, o texto traz a Lei do deslocamento de Wien. Nesse sentido, é apresentado um gráfico da intensidade da radiação emitida em função do comprimento de onda para um corpo negro aquecido a duas temperaturas. A descrição do gráfico se desdobra com duas afirmações. Uma refere-se ao aumento da intensidade da radiação emitida e da potência total irradiada ao elevar-se a temperatura. Na outra conclusão da análise do gráfico cita-se que o comprimento de onda, referente ao máximo da radiação emitida, diminui com o aumento da temperatura.

A expressão matemática para a Lei de deslocamento de Wien, relacionada ao ponto máximo da curva do gráfico da intensidade e comprimento de onda, é apresentada na forma:  $\lambda_{1_{máx}} = \frac{b}{T}$ . O livro apresenta, ainda, uma sequência de imagens em que pode-se notar o aumento da intensidade da radiação e diminuição do comprimento de onda, representado em gráficos, à medida que a temperatura aumenta.

### *Modelo quântico para as radiações eletromagnéticas*

Iniciando a instrução dos aspectos quânticos da radiação eletromagnética, o livro cita que a Teoria Eletromagnética de Maxwell explica a propagação dessas radiações, porém alguns fenômenos em relação à interação destas com a matéria não conseguem ser interpretados por essa teoria. Nesse sentido, afirma-se que a investigação do espectro de emissão do corpo negro foi a primeira incompatibilidade entre as previsões teóricas e resultados experimentais.

#### **9.2.1 Considerações**

O livro inicia a exposição sobre o fenômeno da radiação térmica propondo um exemplo em que se aquece um material sólido, definindo a radiação emitida por este como uma radiação eletromagnética, chamada de radiação térmica.

Posteriormente expõe-se a expressão formal da Lei de Stefan-Boltzmann, classificando a radiação emitida por um objeto aquecido como sendo contínua, cita-se, assim, a conclusão de Kirchhoff em relação às taxas de emissão e absorção e no equilíbrio térmico.

Em seguida, para abordar o conceito de corpo negro, primeiramente, define-se o conceito, já exposto com a conclusão de Kirchhoff, e ao considerar a taxa de emissão no equilíbrio térmico igual a 1, chega-se a Lei de Stefan-Boltzmann. Depois aborda-se o gráfico da intensidade da radiação em função do comprimento de onda.

O estudo da Lei do deslocamento de Wien, continuação da instrução da radiação térmica na sequência didática do livro, desdobra-se na investigação do gráfico da intensidade da radiação e comprimento de onda, expondo uma equação matemática que representa a curva do gráfico e explorando somente a relação da temperatura com o comprimento de onda e intensidade da radiação emitida. São apresentadas, também, imagens para ilustrar as cores dos objetos aquecidos.

Para o ensino da radiação térmica são usadas: a definição da radiação térmica, o exemplo de uma lâmpada, a relação formal da Lei de Stefan-Boltzmann, o conceito de corpo negro de Kirchhoff, o gráfico da intensidade da radiação em função do comprimento de onda e a relação matemática da Lei do deslocamento de Wien. São abordadas, também, a Lei de Stefan-Boltzmann e a Lei de deslocamento de Wien, menciona-se o Eletromagnetismo.

### 9.3 EFEITO FOTOELÉTRICO

#### *Efeito fotoelétrico*

O início do estudo do efeito fotoelétrico começa com a incompatibilidade entre os resultados experimentais e a Teoria de Maxwell sobre a interpretação desse efeito.

#### *Observação e primeira interpretação do efeito fotoelétrico*

Em seguida o texto refere-se à primeira observação do fenômeno fotoelétrico por Alexander Stoletov (1839-1890), descrevendo, brevemente, a interpretação do fenômeno no experimento.

Enquanto retirava ar de um pequeno frasco dentro do qual havia duas placas metálicas, isoladas eletricamente uma da outra e ligadas aos terminais de uma bateria, ele detectou o surgimento de uma corrente elétrica na bateria quando uma das placas foi atingida pela luz de uma lâmpada de mercúrio. Stoletov também percebeu que essa corrente cessava quando a placa deixava de ser iluminada. (BISCUOLA et. al., 2010, p. 294).

É mencionado que Hertz também observou esse fenômeno em outro experimento, e concluiu que:

Quando radiações eletromagnéticas incidem em uma placa metálica, cargas elétricas podem absorver energia suficiente para escaparem dela: esse fato se dá o nome de efeito fotoelétrico. (BISCUOLA et. al., 2010, p. 294).

### *Investigação do efeito fotoelétrico*

Após mencionar a observação do efeito fotoelétrico e a conclusão sobre esta, o texto inicia uma descrição do fenômeno utilizando uma representação ilustrativa do experimento. Nesse sentido, descreve-se que no circuito montado no experimento, o galvanômetro registra a passagem de corrente elétrica quando o cátodo das placas de um capacitor é iluminado com certas radiações eletromagnéticas. O texto não se refere à frequência ou intensidade da radiação, porém menciona que a energia da luz incidente na placa metálica é utilizada para extrair o elétron e fornecer a este energia cinética para alcançar o ânodo do capacitor.

Resgatando o que foi mencionado no início do estudo do efeito fotoelétrico desse livro didático, expõe-se que os resultados experimentais não puderam ser explicados pela Teoria Eletromagnética de Maxwell. Nesse sentido, cita-se a não dependência da intensidade da radiação incidente para ocorrência do fenômeno e a relação com a cor (frequência) da radiação incidente.

Para relatar a incompatibilidade em relação à Teoria Eletromagnética e os resultados experimentais o texto faz a seguinte descrição.

O resultado descrito não é explicado pela Teoria Ondulatória de Maxwell. De fato, no caso da luz violeta mais intensa, a mesma população de elétrons é atingida, em um mesmo intervalo de tempo, por uma energia total maior do que no caso da luz violeta fraca. Então, como os elétrons, segundo essa teoria, absorvem continuamente a energia incidente, eles deveriam escapar com energias cinéticas maiores quando recebessem a luz mais intensa, o que não acontece. (BISCUOLA et. al., 2010, p. 295).

Nesse sentido, o texto cita que experimentos realizados, para a medição do tempo de absorção, conseguiram valores de  $10^{-9}$  s. Comenta-se, ainda, que segundo cálculos da Teoria Ondulatória, para intensidades muito baixas, o tempo de espera para o elétron acumular energia para escapar do metal seria de algumas horas.

O livro cita, também, a relação da frequência da radiação incidente com a energia dos fotoelétrons ejetados do metal, ou seja, quanto maior a frequência maior a energia cinética dos fotoelétrons, o que contraria a Teoria de Maxwell. Menciona-se, então, que existe certo limite de frequência particular, relacionado a cada metal, para que o fotoelétron (elétron) seja arrancado, fato, como apresentado no texto, não explicado pela teoria de Maxwell.

#### *Explicação do efeito fotoelétrico*

Nessa parte apresenta-se a explicação do efeito fotoelétrico atribuída a Albert Einstein. Afirma-se que ele estendeu a Teoria de Planck para as radiações eletromagnéticas, ou seja, a quantização para todo espectro eletromagnético. Introduce-se, dessa forma, a relação formal de  $E = hf$ . O livro, ainda, destaca que Einstein propôs um novo modelo (modelo corpuscular) para a luz, contrapondo-se ao modelo ondulatório.

#### *Equação do efeito fotoelétrico*

Para a abordagem da relação formal do efeito fotoelétrico o texto cita que parte da energia do fóton absorvido por um elétron é utilizada para ejetá-lo do metal, sendo a energia restante a energia cinética do

fotoelétron, assim, inicia-se o tratamento da equação, com a expressão  $E = E_{c_{máx}} + A$ . Com  $E$  sendo a energia do fóton ( $hf$ ) e  $A$  representa a função trabalho. É apresentado, também, um gráfico da energia cinética máxima em função da frequência para explicar a frequência mínima para a emissão do elétron de três metais diferentes. Cita-se que o coeficiente angular da reta no gráfico é a constante de Planck e que a verificação experimental foi realizada por Robert Millikan (1868-1953).

### *O elétron-volt*

Nessa parte é definida a unidade de energia *elétron-volt* (eV), seu respectivo valor em joules e o valor da função trabalho de alguns metais.

### *Células fotoelétricas*

Com uma aproximação mais tecnológica o texto traz duas representações ilustrativas, uma de célula fotoemissiva e outra de uma célula fotocondutiva, em que se explicam seus funcionamentos em relação ao efeito fotoelétrico e ao circuito dessas duas fotocélulas, que servem, também, de exemplos.

## **9.3.1 Considerações**

A abordagem sobre o efeito fotoelétrico começa com a incompatibilidade da teoria Eletromagnética para explicar esse fenômeno. Sendo abordado, posteriormente, as primeiras observações do efeito e suas conclusões. Depois, juntamente com uma descrição experimental, relatam-se as incompatibilidades e, então, as conclusões de Einstein acerca do fenômeno. Esse percurso didático finaliza com a expressão matemática para o cálculo da função trabalho, a definição da unidade de energia elétron-volt e o exemplo das células fotoelétricas.

Nesse sentido, para discutir o efeito fotoelétrico são usadas: a descrição do experimento de Stoletov e do experimento de Hertz, a definição do efeito fotoelétrico, o modelo de Einstein para esse efeito, o modelo de Planck para radiação térmica, a relação formal para energia quantizada e para o efeito fotoelétrico, o gráfico da energia cinética em função de frequência, a definição de elétron-volt e os exemplos de célula fotoemissiva e fotocondutiva. As teorias abordadas são o Eletromagnetismo e a Teoria Ondulatória.



## 9.4 DUALIDADE

### *A dualidade da luz*

Após a discussão do efeito fotoelétrico, apresenta-se a dualidade. O livro cita que o modelo de Maxwell para a luz é ondulatório e o que o livro chama de “modelo quântico” representa a luz constituída de partículas (fótons). Assim o mesmo conclui.

Dependendo do fenômeno, a luz comporta-se como onda ou partícula. Então não se diz que a luz é, mas como ela se comporta em cada fenômeno. A interferência e difração da luz só podem ser explicadas pelo modelo ondulatório. Já o efeito fotoelétrico só pode ser explicado pelo modelo quântico das partículas denominadas fótons. (BISCUOLA et. al., 2010, p. 298).

Menciona-se, também, que apesar do comportamento dual das radiações eletromagnéticas, estas nunca apresentam simultaneamente os dois comportamentos, cita-se, assim, o princípio da complementaridade proposto por Niels Bohr.

### **9.4.1 Considerações**

A dualidade é instruída trazendo como justificativa do modelo ondulatório a perspectiva de Maxwell e do modelo corpuscular o efeito fotoelétrico. O princípio da complementaridade de Bohr é citado para englobar, na explicação do comportamento da luz, esses dois modelos. Sendo, então, usado pelo texto o modelo ondulatório, o modelo corpuscular e a definição do princípio da complementaridade.

## 9.5 MODELO ATÔMICO

### *O átomo de Bohr e as transições eletrônicas*

O estudo do modelo atômico começa com a descrição de um átomo com um núcleo positivo e os elétrons giram em torno desse núcleo com posições relacionadas aos níveis de energia. Cita-se que para um elétron trocar de nível é necessário fornecer a este certa quantidade de energia.

### *O modelo atômico de Bohr*

O livro, para explicar a construção de modelos atômicos, faz a seguinte afirmação.

Por não se ter acesso visual à estrutura de um átomo, ele sempre foi estudado por meio de modelos propostos por cientistas. Cada modelo descreve o átomo de acordo com suposições feitas por seu autor, baseado em resultados experimentais, e esse modelo é aceito enquanto não falhar na explicação dos fenômenos. (BISCUOLA et. al., 2010, p. 300).

Nesse sentido, são abordados os modelos de Ernest Rutherford, semelhante ao sistema planetário, e o modelo de Niels Bohr. A incompatibilidade entre a Teoria Eletromagnética e o modelo de Rutherford é apresentada argumentando que segundo essa teoria o elétron, por possuir aceleração centrípeta, deveria emitir radiação, e conseqüentemente, perder energia e atingir o núcleo, o que não acontece. Assim, apresenta-se o modelo de Bohr, postulando sua estabilidade eletrônica e a existência de estados estacionários e quânticos. São mencionados como verificação experimental os trabalhos de James Franck (1882-1964) e Gustav Hertz (1887-1975).

Em seguida é introduzida a expressão formal para o cálculo da energia dos níveis eletrônicos do átomo de hidrogênio, ou seja,  $E_n = -\frac{13,6}{n^2} eV$ .

Outro postulado de Bohr é apresentado pelo livro, isto é, a emissão e absorção de um *quantum* por um átomo é proporcional à diferença de energia entre os níveis eletrônicos. Cita-se, na sequência, a divergência entre esse postulado e a Teoria Eletromagnética, pois a frequência da radiação emitida depende da frequência do movimento do elétron e não da diferença entre os níveis de energia.

É descritos no texto, também, que no modelo de Bohr os elétrons percorrem órbitas circulares, submetidos à atração coulombiana. Dessa forma, para o átomo de hidrogênio, expõe-se a demonstração matemática da expressão para o raio de Bohr com o momento angular orbital e a Lei de Coulomb.

Para melhor descrever o modelo atômico em conformidade com as observações experimentais, menciona-se a Mecânica Quântica e a explicação de Erwin Schrodinger para o átomo, porém ambas não são tratadas no texto.

#### *Transições eletrônicas causadas pela incidência de radiação eletromagnética*

Para exemplificar os níveis permitidos do átomo, o livro usa a analogia do modelo de uma escada, avisando que os degraus da escada possuem alturas iguais, embora os níveis de energia do átomo tenham espaçamentos não simétricos.

É explicado que um elétron no átomo somente pode absorver uma quantidade de energia igual à diferença de energia entre os níveis atômicos e sua emissão também é proporcional à diferença desses níveis.

#### *Outras causas das transições eletrônicas*

O texto, para estudar outras formas que causam transições eletrônicas, descreve o efeito termiônico que ocorrem nos filamento de tungstênio. Em comparação ao efeito fotoelétrico, cita-se.

É interessante notar que, no efeito termiônico, elétrons são extraídos em razão do recebimento de energia térmica, enquanto no efeito fotoelétrico isso ocorre por causa da absorção de fótons de radiação eletromagnética. (BISCUOLA et. al., 2010, p. 304).

Nesse sentido, para exemplificar o efeito termiônico, usa-se a descrição do funcionamento de uma lâmpada fluorescente, considerando, sobretudo, a relação com as transições eletrônicas e a frequência da luz emitida.

#### *Análise espectral*

Na parte da análise espectral apresentam-se os conceitos de espectro de emissão e absorção. Começa-se caracterizando as radiações eletromagnéticas dos elementos químicos como suas “impressões digitais”. O texto explica, com uma representação ilustrativa de um

espectrômetro, como se obtêm os espectros de elementos químicos em seus estados gasosos. Ou seja.

No interior do tubo de vidro transparente de uma lâmpada existe certo elemento químico no estado gasoso atômico. Os átomos desse elemento são excitados e emitem luz, que atravessa duas estreitas fendas opacas, gerando um estreito pincel de luz. Esse pincel se decompõe ao atravessar o prisma, e as linhas (ou raias) espectrais características da luz emitida pelo elemento ficam registradas no filme fotográfico. (BISCUOLA et. al., 2010, p. 305).

Basicamente, da mesma forma se descreve o espectro de absorção de um elemento. São apresentadas, também, figuras com os espectros de emissão e absorção de alguns elementos químicos.

Menciona-se, então, que Joseph von Fraunhofer usou um prisma ótico para investigar a composição do Sol, e cita-se Edwin Powell Hubble (1889-1953) que propôs a Teoria do Universo em Expansão a partir do estudo do espectro de absorção de outras estrelas. Cita-se, também, o deslocamento da luz por efeito Doppler, chamado *red shift*. O livro apresenta, ainda, a Lei de Hubble e a constante de Hubble.

### 9.5.1 Considerações

Na abordagem do modelo atômico, primeiramente, descreve-se o átomo como um objeto com núcleo positivo e elétrons girando em torno desse núcleo. Em seguida, menciona-se o modelo de Rutherford, e aborda-se a incompatibilidade desse modelo e a Teoria Eletromagnética. Depois, cita-se o modelo de Bohr, postulando a estabilidade eletrônica, mencionando os estados estacionários e estados quânticos verificados experimentalmente. O livro traz, também, a expressão formal para os níveis de energia do átomo de hidrogênio, o postulado de Bohr sobre as transições eletrônicas em relação à absorção e emissão e a demonstração matemática para o raio orbital para o modelo de Bohr.

Na sequência cita-se a análise espectral e a característica espectral específica de cada elemento químico. Em seguida, descreve-se como se obtêm o espectro de emissão e absorção de elementos químicos. Abordam-se, também, a investigação do espectro solar, a Teoria da Expansão do Universo, a lei de Hubble e a constante de Hubble.

Nesse sentido, para expor o modelo atômico o livro emprega: o modelo atômico de Bohr, o modelo atômico de Rutherford, a relação formal para o cálculo dos níveis de energia do átomo, a relação formal para o raio de Bohr, a analogia com uma escada, o efeito termiônico, o exemplo de uma lâmpada, a descrição do espectro de emissão e absorção e o exemplo do espectro solar. A teoria abordada é o Eletromagnetismo.

## 9.6 DUALIDADE – MODELO ATÔMICO

### *Comportamento Ondulatório da Matéria*

No capítulo seguinte, junto com Relatividade, é estudado o comportamento ondulatório da matéria e a generalização de ideia de De Broglie de ondas de matéria para o modelo de Bohr. Assim, inicia-se o discurso, a partir da dualidade onda-partícula fazendo uma ligação com o modelo atômico. Cita-se que Louis-Victor de Broglie propôs a dualidade para corpos de matérias como elétrons, prótons e bolas de bilhar, ou seja, havia a estes uma onda associada.

A argumentação do texto segue afirmando que De Broglie tratava de dois problemas, um em relação à frequência presente no modelo corpuscular, ou seja, uma grandeza ondulatória como característica de uma partícula, e outro relacionado ao modelo atômico de Bohr e os níveis quantizados. São apresentadas, então, as relações formais para o comprimento de onda de De Broglie, a partir da quantidade de movimento do fóton, para o caso relativístico e não-relativístico. O texto menciona a difração de elétrons como confirmação experimental para a hipótese de De Broglie, pois foi possível calcular o comprimento de onda de um elétron quando sofre difração.

### *De Broglie e o modelo de Bohr*

O texto continua com o seguinte relato.

De Broglie justificava as órbitas permitidas no modelo de Bohr, considerando que o elétron, em cada uma dessas órbitas, tinha um comprimento de onda tal que formava uma onda estacionária, lembrando, por exemplo, os modos de vibração de uma corda de violão. (BISCUOLA et. al., 2010, p. 321).

Posteriormente é apresentada uma demonstração matemática para encontrar o perímetro de cada órbita usando o número inteiro de comprimentos de onda, o momento angular orbital do elétron e o raio de Bohr. Uma representação ilustrativa do modelo de Bohr com as ondas associadas dos elétrons para os dois primeiros níveis finaliza a seção.

### 9.6.1 Considerações

Para estudar as ondas de matéria e o átomo, o texto menciona a generalização de De Broglie das ondas de matéria e algumas implicações para o modelo de Bohr. São trazidas, também, as relações matemáticas para o comprimento de onda de De Broglie, a difração de elétrons como argumento para comprovação experimental e a demonstração matemática para o perímetro de cada orbital do átomo de Bohr com o comprimento de onda de De Broglie.

Dessa forma, para trabalhar a dualidade e o modelo atômico o livro utiliza: o modelo de De Broglie de ondas de matéria, o modelo corpuscular, o modelo atômico de Bohr, a relação formal para o comprimento de onda de De Broglie, a difração de elétrons, a definição de ondas estacionária e a analogia com uma onda mecânica.

## 9.7 CATEGORIZAÇÃO DAS TAREFAS – LIVRO DIDÁTICO 5

Na categorização das tarefas (tab. 14), após a descrição (anexo F), pode-se inferir que: com quinze exercícios e vinte tarefas está a radiação térmica, correspondendo a 26% das tarefas. Com treze exercícios e trinta e duas tarefas o modelo atômico, com 42% das tarefas. Com doze exercícios e, também, vinte tarefas encontra-se o efeito fotoelétrico, também com 26%. E com um exercício somente e uma tarefa cada, aparecem a dualidade, o efeito Compton e a radiação eletromagnética. Totalizando setenta e cinco tarefas nos quarenta e três exercícios.

Categoria da tarefa	Número do exercício	Total de tarefas
Dualidade	39;	<b>1</b>
Efeito Compton	42;	<b>1</b>
Radiação Térmica	1; 5; 6; 7; 9; 19; 20; 23; 25; 32; 33; 34; 35; 36; 40;	<b>20</b>
Efeito Fotoelétrico	2; 3; 8; 10; 11; 12; 21; 22; 24; 26; 27; 38;	<b>20</b>

Modelo Atômico	13; 14; 15; 16; 17; 18; 28; 29; 30; 31; 37; 41; 43;	<b>32</b>
Radiação Eletromagnética	4;	<b>1</b>
Total	<b>43</b>	<b>75</b>

Tabela 14. Categorias das tarefas – Livro Didático 5

## 9.8 TÉCNICAS PARA RESOLVER AS CATEGORIAS DAS TAREFAS – LIVRO DIDÁTICO 5

As técnicas para resolver as categorias das tarefas são distribuídas da seguinte forma (tab. 15): o modelo atômico possui onze tarefas com a técnica de **relatar** e vinte e uma de **cálculo**; o efeito fotoelétrico tem sete tarefas com a técnica de **relatar** e treze de **cálculo**; a radiação térmica soma três tarefas com a técnica de **relatar**, três de **relacionar**, treze de **cálculo** e uma de **interpretação de dados**; o efeito Compton e a radiação eletromagnética possuem uma tarefa com a técnica de **relatar** cada; a dualidade tem uma tarefa com a técnica de **cálculo**. Totalizando vinte e três tarefas com técnicas de **relatar**, correspondendo a 30% das tarefas, três de **relacionar**, quarenta e oito de **cálculo**, com 64% das tarefas, e uma de **interpretação de dados**.

Categoria da tarefa	Técnicas					Total de técnicas (categorias)
	Relatar	Relacionar	Cálculo	Interpretação de dados	Gráfico	
Dualidade			$t_{70}$			<b>1</b>
Efeito Compton	$t_{74}$					<b>1</b>
Radiação Térmica	$t_{65}$ $t_{66}$ $t_{71}$	$t_{39}$ $t_{64}$ $t_{67}$	$t_1$ ; $t_2$ ; $t_9$ ; $t_{10}$ ; $t_{11}$ ; $t_{14}$ ; $t_{40}$ ; $t_{41}$ ; $t_{46}$ ; $t_{47}$ ; $t_{49}$ ; $t_{61}$ ; $t_{62}$	$t_{63}$		<b>20</b>
Efeito Fotoelétrico	$t_{15}$ $t_{42}$ $t_{43}$		$t_3$ ; $t_4$ ; $t_5$ ; $t_6$ ; $t_7$ ; $t_{12}$ ; $t_{13}$ ; $t_{16}$			<b>20</b>

	<i>t</i> <sub>44</sub> ; <i>t</i> <sub>45</sub> ; <i>t</i> <sub>50</sub> ; <i>t</i> <sub>69</sub> ;		<i>t</i> <sub>17</sub> ; <i>t</i> <sub>48</sub> ; <i>t</i> <sub>52</sub> ;	<i>t</i> <sub>18</sub> ; <i>t</i> <sub>51</sub> ;		
Modelo Atômico	<i>t</i> <sub>25</sub> ; <i>t</i> <sub>30</sub> ; <i>t</i> <sub>31</sub> ; <i>t</i> <sub>32</sub> ; <i>t</i> <sub>33</sub> ; <i>t</i> <sub>35</sub> ; <i>t</i> <sub>36</sub> ; <i>t</i> <sub>56</sub> ; <i>t</i> <sub>68</sub> ; <i>t</i> <sub>72</sub> ; <i>t</i> <sub>75</sub> ;		<i>t</i> <sub>19</sub> ; <i>t</i> <sub>21</sub> ; <i>t</i> <sub>23</sub> ; <i>t</i> <sub>26</sub> ; <i>t</i> <sub>28</sub> ; <i>t</i> <sub>34</sub> ; <i>t</i> <sub>38</sub> ; <i>t</i> <sub>54</sub> ; <i>t</i> <sub>57</sub> ; <i>t</i> <sub>59</sub> ; <i>t</i> <sub>73</sub> ;	<i>t</i> <sub>20</sub> ; <i>t</i> <sub>22</sub> ; <i>t</i> <sub>24</sub> ; <i>t</i> <sub>27</sub> ; <i>t</i> <sub>29</sub> ; <i>t</i> <sub>37</sub> ; <i>t</i> <sub>53</sub> ; <i>t</i> <sub>55</sub> ; <i>t</i> <sub>58</sub> ; <i>t</i> <sub>60</sub> ;		<b>32</b>
Radiação Eletromagnética	<i>t</i> <sub>8</sub> ;					<b>1</b>
Total	<b>23</b>	<b>3</b>	<b>48</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>75</b>

Tabela 15. Técnicas e categorias das tarefas – Livro Didático 5



## 9.9 CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE TAREFAS – LIVRO DIDÁTICO 5

A classificação dos tipos de tarefas relativas à técnica de cálculo são plotadas na tabela 16 a seguir.

Tipos de tarefas ( <i>T</i> )	Número da tarefa	Total de tarefas
Cálculo da frequência (fóton)	$t_2; t_{11}; t_{16}; t_{26}; t_{34}; t_{53}; t_{54}; t_{55}; t_{62};$	<b>9</b>
Cálculo do comprimento da onda (fóton)	$t_{10}; t_{37}; t_{38}; t_{40};$	<b>4</b>
Cálculo da energia (fóton)	$t_4; t_{12}; t_{13}; t_{27}; t_{46}; t_{58}; t_{59};$	<b>7</b>
Cálculo do número de fótons	$t_{14}; t_{47};$	<b>2</b>
Cálculo da emissão e/ou absorção de corpo negro	$t_1; t_9; t_{41}; t_{49};$	<b>4</b>
Cálculo da função trabalho	$t_3; t_6; t_{18}; t_{48}; t_{51};$	<b>5</b>
Cálculo da constante de Planck	$t_7; t_{17};$	<b>2</b>
Cálculo dos níveis de energia (átomo)	$t_{19}; t_{20}; t_{21}; t_{22}; t_{23}; t_{24}; t_{28}; t_{29}; t_{57}; t_{60}; t_{73};$	<b>11</b>
Outros cálculos	$t_5; t_{52}; t_{61}; t_{70};$	<b>4</b>
Total		<b>48</b>

Tabela 16. Tipos de tarefas – Livro Didático 5

Nesse sentido, os cálculos mais frequentes referem-se: ao *Cálculo dos níveis de energia (átomo)* com onze tarefas; ao *Cálculo da frequência (fóton)* com nove tarefas; ao *Cálculo da energia (fóton)* com sete tarefas; ao *Cálculo da função trabalho* com cinco tarefas; ao *Cálculo do comprimento da onda (fóton)*, *Cálculo da emissão e/ou absorção de corpo negro* e *Outros cálculos*, todos com quatro tarefas cada; ao *Cálculo do número de fótons* e ao *Cálculo da constante de Planck* com duas tarefas cada um.

## 9.10 CONCLUSÕES

O Livro Didático 5 segue o mesmo procedimento da maioria dos livros anteriores para expor os conceitos da Física Quântica. Isto é, apresentados os modelos clássicos, depois os resultados que acarretam

anomalias em relação ao experimento, novas hipóteses teóricas são testadas junto com aspectos formais e o novo modelo é corroborado por resultados empíricos. Esse livro traz, também, duas demonstrações matemáticas, uma sobre o raio de Bohr e outra sobre o perímetro orbital do átomo de Bohr que é solicitada na tarefa ( $t_{73}$ ) do livro.

O Livro Didático 5 possui a maioria as tarefas associadas ao **cálculo** de variáveis presentes nas relações matemáticas fornecidas pelo texto. Novamente, como nos outros livros didáticos, a técnica mais frequente refere-se ao cálculo de variáveis presentes nessas relações formais.

O tipo de tarefa que mais se repete é o *Cálculo dos níveis de energia (átomo)*, ou seja, em várias tarefas são mudadas as condições do problema, mas é solicitado, basicamente, o mesmo cálculo. O mesmo acontece com o *Cálculo da frequência (fóton)* e os outros tipos de tarefas.

## 10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise praxeológica indica que os tópicos para o ensino dos conceitos e leis da Física Moderna, presentes nos livros didáticos do PNLD, trazem, em suma, os mesmos assuntos, salvo algumas diferenças como o Livro Didático 1 que trabalha a barreira de potencial e o efeito túnel, o Livro Didático 3 que aborda, prioritariamente, a radiação térmica e o efeito fotoelétrico. Dos textos presentes nos Livros Didáticos analisados pode-se inferir que os conhecimentos e conceitos, dentro da Teoria Quântica, propostos, no geral, para o ensino são a Radiação Térmica, Efeito Fotoelétrico, Dualidade, Modelo Atômico e Princípio da Incerteza. Estes cinco tópicos caracterizam o saber a ser ensinado. Existem livros que apresentam outros temas, como a Radiação Eletromagnética e fenômenos de interferência e difração, que é assumida nessa dissertação como um tema da Física Clássica, embora por escolha de seus autores seja tratada junto com a Física Quântica e no início da abordagem desta.

Ao inferir a praxeologia foi possível quantificar os tipos de tarefas e as tarefas dentro de categorias criadas para classificação. Alguns tópicos elaborados para a análise do texto dos livros didático trazem a junção de dois temas, como: o Livro Didático 2 em que são trabalhados a dualidade e modelo atômico; o Livro Didático 3, a radiação térmica e o efeito fotoelétrico; Livro Didático 4, efeito fotoelétrico e modelo atômico; Livro Didático 5, dualidade e modelo atômico. Nesse sentido, infere-se que os autores, agrupando os conceitos, procuram estabelecer uma ligação entre os mesmos, mostrando, assim, vínculos entre os conceitos físicos para a construção de um novo modelo, como é o caso do Livro Didático 5, por exemplo.

Os discursos apresentam algumas situações e problemas com os quais os físicos se encontraram para a construção da Teoria Quântica. Primeiramente, ocorria uma anomalia entre os dados experimentais e a teoria. Então se criavam hipóteses para tentar corroborar os dados com a teoria, sendo novamente confirmada a hipótese com outros experimentos. Porém em nenhum momento, nos textos analisados, são discutidos aspectos relativos à construção do conhecimento científico. A ideia que os livros didáticos trazem parece sugerir que esse conhecimento é edificado sempre da mesma maneira. Nesse sentido, a forma de pensar científica, a maneira como a Física questiona a realidade é deixada de lado, ou fica a margem de interpretações particulares dos estudantes.

Porém, cabe ressaltar que a interpretação epistemológica, isto é, o levantamento dos aspectos para exposição da Teoria Quântica, a construção do conhecimento, é uma inferência complexa, e da maneira que é desenvolvida nos livros didáticos analisados, provavelmente, deveria vir do professor.

Nesse sentido, são deixados de lado aspectos da construção do conhecimento frente a uma nova teoria. Talvez não fosse intensão dos autores apresentar uma discussão epistemológica, mas o que pode ser inferido é uma simplificação das Relações Institucionais apresentadas no livro utilizado na maioria das universidades (EISBERG; RESNICK, 1979)<sup>1</sup> e que são transpostas para o livro do EM. São resumidos muitos aspectos referentes às hipóteses e suas soluções. Dessa maneira, são encobertas características que são explícitas na formulação da Teoria Quântica, toda uma forma de pensar científica é simplificada em tópicos concisos que apresentam apenas os resultados teóricos e experimentais e, na maioria das vezes, finalizam com uma relação matemática que será empregada para resolução de exercícios.

No total foram analisados cento e noventa exercícios (190), somando trezentas e trinta e quatro tarefas (334). Nenhuma tarefa propõe uma discussão mais profunda e investigativa sobre os temas da Física Moderna, que poderiam ser tratados frente às interpretações filosóficas e epistemológicas, para inferir sobre estes aspectos nas teorias e modelos.

---

<sup>1</sup> Cursos de graduação em Física de importantes instituições de ensino superior que disponibilizam o programa das disciplinas na internet foram consultados e encontram-se abaixo.

**PUC-Rio** - [http://www.puc-](http://www.puc-rio.br/ferramentas/ementas/ementa.aspx?cd=FIS1061)

[rio.br/ferramentas/ementas/ementa.aspx?cd=FIS1061](http://www.puc-rio.br/ferramentas/ementas/ementa.aspx?cd=FIS1061)

**UFC** - <http://www.fisica.ufc.br/ementas/fisica/CD222.htm>

**UFMG** - <http://www.fisica.ufmg.br/fisicamoderna/>

**UFPR** - <http://fisica.ufpr.br/grad/cf099.pdf>

**UFRGS** - <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01208/index.html>

**UnB** - <http://www.fis.unb.br/cgrad/cg/e118346.txt>

**Unicamp** -

[http://portal.ifi.unicamp.br/images/stories/imagens/arquivos/programas\\_disciplinas.pdf](http://portal.ifi.unicamp.br/images/stories/imagens/arquivos/programas_disciplinas.pdf) (pag. 51)

**USP – São Carlos** -

<https://uspdigital.usp.br/jupiterweb/obterDisciplina?sglDis=FFI0775>

**USP – São Paulo** -

<https://uspdigital.usp.br/jupiterweb/obterDisciplina?sglDis=4300375>

Mesmo que a partir dos discursos seja possível inferir como os livros didáticos propõem explicar a Física e a investigação da realidade, as tarefas não apresentam esse debate que poderia, na perspectiva dessa dissertação, se encaixar mais às proposições presentes na noosfera. Dessa forma, como a grande maioria das tarefas refere-se à aplicação direta de relações matemática (**cálculo**) e ao resumo dos conhecimentos presentes no livro didático por meio da técnica de **relatar**, pode-se inferir que, ao contrário do que se propõe aos estudantes do ensino médio, isto é, a formação de um cidadão crítico, observa-se que, em relação ao Ensino de Física, espera-se do estudante somente continuação do desenvolvimento das atividades do ensino fundamental de ler e interpretar textos, de certa forma, mais complexos e a reprodução e treino das técnicas de matemática básica, como as quatro operações básicas e a resolução de equações do primeiro grau. Pois poucas tarefas necessitam de maior argumentação e elaboração por parte do estudante, o que pode ser inferido pela quantidade das técnicas de **argumentar, interpretação de dados e gráfico**. As tarefas que não se referem à aplicação de alguma relação matemática propõem, em sua maioria, somente a leitura e cópia do conhecimento contido no livro didático. Os aspectos associados à descrição fenomenológica, elaboração dos conceitos, a construção de modelos e a descrição experimental, embora presente de maneira simplificada nos textos dos livros didáticos, são pouco explorados nas tarefas.

Em relação ao estudante se pressupõe que ao final do EM este realize algum processo seletivo para ingresso em universidades, realize a prova do exame nacional do ensino médio (ENEM) ou, para maioria desses estudantes, apenas termine o ensino básico. Como a maioria dos estudantes do EM não entrará em uma universidade ou mesmo para aqueles que entrarem e seguirem o caminho das ciências humanas, a Física ensinada no nível básico se apresentará, no geral, como uma nuvem obscura de equações formais e conceitos, o que pode ser explicado devido à quantidade de tarefas de cálculo e a repetição para se encontrar as mesmas variáveis, somente mudando as condições iniciais do problema.

Usualmente o saber escolar, devido a suas práticas naturalizadas, muitas vezes visa à conformidade de inserção de conteúdo, principalmente, introduzidos nos livros didáticos, parecendo refletir certa negligência em relação ao que se pretender ensinar nesse nível escolar, ou, talvez, a resposta seja deveras simples, tudo. Referente ao Ensino de Física observam-se materiais didáticos de boa qualidade, contudo

seguem, basicamente, a mesma estrutura didática que os manuais utilizados em cursos superiores de Física. Embora, esses dois níveis de ensino apresentem objetivos diferentes. Claro que não se pode negar que a formação de um cidadão crítico, proposta para o nível básico, também deve alcançar o ensino superior, mas isto, ainda, não justifica a transposição didática feita para os livros do ensino médio.

A Teoria da Transposição Didática propõe que deve existir certa distância entre o saber a ser ensinado e seus saberes de referência. E a partir dessa teoria pode-se investigar o sistema didático e a abordagem epistemológica do saber a ser ensinado. Em uma sociedade de produção que massifica o conhecimento, reproduzindo-o, resumindo-o, muitas vezes a reflexão sobre esse saber, nesse caso, presentes nos textos didáticos do EM, é deixada de lado, vezes por prazos a cumprir para a entrega do material final para as gráficas, vezes por seguirem somente normas técnicas para sua construção. Dentro das perspectivas defendidas pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2002), pesquisas científicas e interesses da sociedade a estrutura proposta nos livros didáticos parece apontar em uma direção e essas perspectivas em outra, pois a maioria dessas tarefas não requer reflexão sobre o conceito, fenômeno, modelos e experimentos. A repetição da mesma técnica parece apontar para a mecanização destas, e não para o raciocínio nas resoluções dos problemas, que, possivelmente, levaria a formação do pensamento crítico embasado na visão científica.

Nesse sentido, os Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2002), as pesquisas científicas e os interesses da sociedade sugerem uma abordagem em comum, a formação de um cidadão crítico que possa questionar os aspectos de seu cotidiano, porém os Livros Didáticos do PNLD analisados apontam outra perspectiva. Ou seja, os temas de Física Moderna e Contemporânea parecem ser apenas mais um tema da Física do EM, sendo instruído por meio da mecanização de técnicas para resolução dos exercícios. Dessa maneira, ocorre um conflito nessa parte do sistema didático, ou melhor, em seu entorno.

Em relação aos docentes do EM dessa disciplina, caberá a este escolher a maneira como o conteúdo será ministrado e, para o caso de escolas públicas, ele, provavelmente, utilizará algum livro didático do PNLD. Esse professor, também, irá lecionar muitas horas por semana. Nesse sentido, além de centenas de avaliações e trabalhos para corrigir, ele terá que preparar as aulas, que serão norteadas pela sua formação, pelos textos e tarefas presentes nos livros didáticos. Cabe, ainda, apontar

alguns desdobramentos dessa pesquisa. Por exemplo, como os professores de Física do EM abordam os conceitos de FMC? Ou qual a visão desses professores sobre os Livros Didáticos em relação à FMC? Ou, ainda, quais modificações devem ser feitas nos Livros Didáticos e até na formação dos professores de Física para, realmente, formar cidadãos críticos?

A análise que se desdobrou tem como motivação a inferência sobre um instrumento muito importante na prática em sala de aula para o Ensino de Física. Os livros vão além da figura do professor da disciplina e se refletem na prática docente, moldando as características como a Física é apresentada aos estudantes.





## 11 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Wesley Silva de; RODRIGUES, Clóves Gonçalves. Comparando ementas de um curso de Mecânica Quântica e Física Moderna. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 360-365, set. 2001.

BISCUOLA, Gualter José.; BOAS, Newton Villas.; DOCA, Ricardo Helou. Física 3, ed. Saraiva, São Paulo, 2010.

BRASIL. PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. MEC. Brasília, 2002.

BRASIL. Guia de livros didáticos: PNLD 2012: Física. – Brasília: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, 2011.

CHEVALLARD, Yves. – Concepts fondamentaux de la didactique: perspectives apportées par une approche anthropologique. *Recherche en Didactique des Mathématiques*, v.12 n.1, p.73-112, 1992.

CHEVALLARD, Yves. – L’analyse des pratiques enseignantes em théorie antropologique du didatique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*. Grenoble : La Pensée Sauvage- Editions, v.19 n.2, p. 221-265, 1999.

CAVALCANTE, Marisa Almeida.; TAVOLARO, Cristiane R. C. Uma oficina de Física Moderna que visa sua inserção no ensino médio. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 18, n. 3, p. 263-276, dez. 2001.

EISBERG, Robert; RESNICK, Robert; Física quântica: átomos moléculas, sólidos, núcleos e partículas, ed. Campus, Rio de Janeiro (1988).

GASIOROWICZ, Stephen. Física quântica, ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro (1979).

GASPAR, Alberto. Compreendendo a Física, vol. 3, ed. Ática, São Paulo, 2011.

HOLBROW, C. H.; GALVEZ, E.; PARKS, M. E. Photon quantum mechanics and beam splitters. *American Journal of Physics*, Melville, v. 70, n. 3, p. 260-264, Mar. 2002.

KURNAZ, Mehmet. Altan; ARSLAN, Ayşegül SAĞLAM. Using the Anthropological Theory of Didactics in Physics: Characterization of the Teaching Conditions of Energy Concept and the Personal Relations of freshmen to this Concept. *Journal of TURKISH SCIENCE EDUCATION*. v. 6, n. 1, Abril, 2009.

LOBATO, Teresa; GRECA, Ileana Maria. Análise da inserção de conteúdos de Teoria Quântica nos currículos de Física do Ensino Médio. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 11, n. 1, p. 119-132, mai. 2005.

MACHADO, Daniel Iria; NARDI, Roberto. Construção e validação de um sistema hipermédia para o ensino de Física Moderna. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 6, n.1, p.90-116, 2007.

MARQUES, Adilio Jorge; SILVA, Cláudio Elias. Utilização da Olimpíada Brasileira de Astronomia como Introdução à Física Moderna no Ensino Médio. *A Física na Escola*, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 34-35, out. 2005.

MÁXIMO, Alberto; ALVARENGA, Beatriz; Curso de Física, vol. 3, ed. Scipione, São Paulo, 2010.

MENEZES, Luís Carlos; CANATO JR., Osvaldo; KANTOR, Carlos Aparecido.; PAOLIELLO JR., Lilio Alfonso; BONETTI, Marcelo de Carvalho; ALVES, Viviane Moraes. Quanta Física, vol. 3, ed. PD, São Paulo, 2010.

MONTEIRO, Maria Almeida, NARDI, Roberto. As abordagens dos livros didáticos acerca da física moderna e contemporânea: algumas

marcas da natureza da ciência. *XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física – Curitiba – 2008*.

MONTENEGRO, Roberto Luiz; PESSOA JR., Osvaldo. Interpretações da Teoria Quântica e as Concepções dos Alunos do Curso de Física. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 7, n. 2, p. 107-126, ago. 2002.

MÜLLER, Rainer; WIESNER, Hartmut. Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of Physics*, Melville, v. 70, n. 3, p. 200-209, Mar. 2002.

NETTO, Orlando Gonelli. Análise da transposição didática do tópico radiação de corpo negro do ponto de vista da teoria antropológica da didática. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2013.

OLSEN, Rolf. V. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. *International Journal of Science Education*, London, v. 24, n. 6, p. 565-574, Junho 2002.

OSTERMANN, Fernanda; PRADO, Sandra Denise. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 193-203, fev. 2005.

OSTERMANN, Fernanda; PRADO, Sandra Denise; RICCI, Trieste S. F. Desenvolvimento de um Software para o Ensino de Fundamentos de Física Quântica. *A Física na Escola*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 22-25, maio 2006.

OSTERMANN, Fernanda; RICCI, Trieste. S. F. Construindo uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica: um estudo na formação de professores de Física. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 11, n. 2, p. 235-258, maio 2004.

PEREIRA, Alexandre de Pereira; OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Claudio. O ensino de Física Quântica na perspectiva sociocultural: uma análise de um debate entre futuros professores mediado

por um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 8, n. 2, p. 376-398, 2009.

PEREIRA Alexandro de Pereira; PESSOA JR. Osvaldo; CAVALCANTI, Claudio; OSTERMANN, Fernanda. Uma abordagem conceitual e fenomenológica dos postulados da física quântica. *Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis*, v. 29, n. Especial 2: p. 831-863, out. 2012.

PESSOA JR, Osvaldo. Conceitos de Física Quântica, ed. Livraria da Física, São Paulo, 2003.

REZENDE JUNIOR, Mikael F. R.; DE SOUZA CRUZ, Frederico Firmo. Física moderna e contemporânea na formação de licenciandos em física: necessidades, conflitos e perspectivas. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 15, n. 2, p. 305-321, 2009.

RICCI, Trieste F.; OSTERMANN, Fernando; PRADO, Sandra Denise. O tratamento clássico do interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento da fenda dupla na introdução da física quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 1, p. 81-90, ago. 2007.

SANT'ANNA, Blaidi; REIS, Hugo Carneiro; MARTINI, Gloria. Conexões com a Física, vol. 3, ed. Moderna, São Paulo, 2011.

SILVA, José Alves da; KAWAMURA, Maria Regina Dubeux. A natureza da luz: uma atividade com textos de divulgação científica em sala de aula. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 18, n. 3, p. 317-340, dez. 2001.

**TERRAZZAN, Eduardo Adolfo. A inserção de Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na Escola de 2º grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis*, v. 9, n.3, p.209-214, dez. 1992.**

VALADARES, Eduardo de Campos; MOREIRA, Alysson Magalhães. Ensinando física moderna no ensino médio: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 21, p. 359-371, nov. 2004. ed. esp.

## 12 ANEXO A

Livros didáticos de Física do Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) referentes aos anos de 2012, 2013 e 2014 (BRASIL, 2011).

	Título	Autores	Código	Editora
1	CURSO DE FÍSICA	Antônio Máximo; Beatriz Alvarenga.	25041COL22	Scipione
2	COMPREENDENDO A FÍSICA	Alberto Gaspar	25041COL22	Ática
3	CONEXÕES COM A FÍSICA	Blaidi Sant'Anna; Hugo Carneiro Reis; Gloria Martini	25050col22	Moderna
4	QUANTA FÍSICA	Luís Carlos de Menezes; Osvaldo Canato Júnior; Carlos Aparecido Kantor; Lílio Alonso Paoliello Junior; Marcelo de Carvalho Bonetti; Viviane Moraes Alves	25063col22	PD
5	FÍSICA	Gualter José Biscuola; Newton Villas Bôas; Ricardo Helou Doca;	25065col22	Saraiva
6	FÍSICA: AULA POR AULA	Claudio Xavier da	25067col22	FTD

		Silva; Benigno Barreto Filho;		
7	FÍSICA PARA O ENSINO MÉDIO: ELETRICIDADE E FÍSICA MODERNA	Kazuhito Yamamoto; Luiz Felipe Fuke	25071col22	Saraiva
8	FÍSICA – CIÊNCIA E TECNOLOGIA	Carlos Magno A. Torres; Nicolau Gilberto Ferraro; Paulo Antônio de Toledo Soares	25052col22	Scipione
9	FÍSICA E REALIDADE	Aurélio Gonçalves Filho; Carlos Toscano	25068col22	Scipione
10	FÍSICA EM CONTEXTO – PESSOAL – SOCIAL – HISTÓRICO	Alexander Pogibin; Mauricio Pietrocola Renata de Andrade Talita Raquel Romero	25069col22	FTD

### 13 ANEXO B

#### Descrição das tarefas dos exercícios – Livro Didático 1

Exercício 1: tarefa sobre a Física Quântica, listar algumas grandezas quantizadas ( $t_1$ ).

Exercício 2: tarefa sobre a Física Quântica, descrição do papel de alguns físicos na construção da Teoria Quântica ( $t_2$ ).

Exercício 3: tarefa sobre a radiação térmica, explicações em relação ao modelo do oscilador ( $t_3$ ) e sobre os resultados experimentais do espectro de radiação de corpo negro ( $t_4$ ).

Exercício 4: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, explicação sobre a frequência de corte na Física Clássica ( $t_5$ ), e como a teoria de Einstein explica essa frequência ( $t_6$ ).

Exercício 5: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da frequência de corte ( $t_7$ ) e a classificação do valor da frequência encontrada ( $t_8$ ).

Exercício 6: tarefa sobre o modelo atômico, cálculos da energia ( $t_9$ ) e comprimento de onda para o decaimento do elétron ( $t_{10}$ ), além do cálculo da energia de um fóton específico ( $t_{11}$ ) como justificativa numérica da não absorção deste.

Exercício 7: tarefa sobre a dualidade, explicação acerca da dualidade ( $t_{12}$ ) e fóton ( $t_{13}$ ).

Exercício 8: tarefa sobre a dualidade, definição do conceito ( $t_{14}$ ).

Exercício 9: tarefa sobre a radiação térmica, cálculo da energia ( $t_{15}$ ) e ( $t_{16}$ ) e cálculo taxa de emissão dos fótons ( $t_{17}$ ) e ( $t_{18}$ ), de dois casos específicos.

Exercício 10: tarefa sobre a radiação térmica, cálculo da energia ( $t_{19}$ ) e potência de fótons ( $t_{20}$ ) de um caso específico.

Exercício 11: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculos da energia cinética do elétron ( $t_{21}$ ) e comprimento de onda ( $t_{22}$ ), frequência ( $t_{23}$ ) e energia do fóton ( $t_{24}$ ), além de classificação deste último no espectro eletromagnético ( $t_{25}$ ).

Exercício 12: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da frequência ( $t_{26}$ ) e comprimento de onda de um fóton específico ( $t_{27}$ ) e a classificação radiação eletromagnética emitida como ionizante ou não ( $t_{28}$ ).

Exercício 13: tarefa sobre a dualidade, classificação do elétron como onda ou partícula ( $t_{29}$ ).

Exercício 14: tarefa sobre a dualidade, cálculo do comprimento de onda de De Broglie para um elétron ( $t_{30}$ ).

Exercício 15: tarefa sobre a dualidade, cálculo do comprimento de onda de De Broglie para uma pessoa ( $t_{31}$ ).

Exercício 16: tarefa sobre o princípio da incerteza, cálculo da quantidade de movimento de um próton confinado em um espaço específico ( $t_{32}$ ).

Exercício 17: tarefa sobre o princípio da incerteza, relatar conhecimentos científicos que foram abalados com o princípio da incerteza ( $t_{33}$ ).

Exercício 18: tarefa sobre a radiação eletromagnética, explicação sobre a velocidade da transmissão de uma banda larga de internet ( $t_{34}$ ).

Exercício 19: tarefa sobre a radiação eletromagnética, cálculos do número de pulsos por segundo ( $t_{35}$ ), da duração ( $t_{36}$ ) e da largura de banda do sinal de transmissão ( $t_{37}$ ), além de explicação sobre a possibilidade de transmissão desse sinal em ondas de rádio em uma frequência média específica ( $t_{38}$ ).

Exercício 20: tarefa sobre a radiação eletromagnética, explicação relacionada à maior transmissão de informação que a fibra ótica possui comparada com ondas de rádio ( $t_{39}$ ).

Exercício 21: tarefa sobre o princípio da correspondência e o princípio da complementaridade, definição de ambos os princípios ( $t_{40}$ ) e ( $t_{41}$ ).

Exercício 22: tarefa sobre a dualidade, cálculo do comprimento de onda de De Broglie para o elétron ( $t_{42}$ ) e uma bola de aço ( $t_{43}$ ).

Exercício 23: tarefa sobre a ruptura, explicação da validade da Teoria Eletromagnética para o mundo microscópico frente à Física Quântica ( $t_{44}$ ).

Exercício 24: tarefa sobre uma barreira de potencial, cálculos da relação formal da energia cinética em função do potencial ( $t_{45}$ ), da velocidade em função da energia potencial ( $t_{46}$ ) e da massa ( $t_{47}$ ), além da descrição do movimento da partícula exposta na questão ( $t_{48}$ ). A tarefa solicita, também, o cálculo do comprimento de onda de De Broglie ( $t_{49}$ ) e o esboço do gráfico da função de onda da partícula ( $t_{50}$ ).

Exercício 25: tarefa sobre uma barreira de potencial, explicação em relação à razão entre a função de onda no interior e fora da barreira ( $t_{51}$ ). Solicita-se a relação entre o quadrado da função de onda do outro lado da parede ( $t_{52}$ ), e a probabilidade da partícula tunelar ( $t_{53}$ ). Pede-se, também, o cálculo da média das tentativas que a partícula precisa fazer antes de tunelar ( $t_{54}$ ).

### **Exercícios do Livro Didático 1 sobre a Teoria Quântica. – Transcritos na íntegra.**



1. Escreva uma lista de grandezas quantizadas.
2. Descreva o papel dos seguintes físicos na construção da teoria quântica: Planck, Einstein, Bohr e de Broglie.
3. Como um oscilador pode ser útil num modelo para explicar a radiação térmica? Como é gerada essa radiação? Que suposição feita por Planck, na energia de um oscilador harmônico, conseguiu explicar o espectro emitido por um corpo negro?
4. As questões abaixo se referem ao efeito fotoelétrico:
  - a) Discuta por que a Física Clássica não consegue explicar a existência de uma frequência de corte, abaixo da qual não são ejetados elétrons quando se incide luz sobre uma placa metálica.
  - b) Como a teoria do fóton de Einstein explica a existência dessa frequência de corte?
5. A função trabalho do alumínio vale  $6,73 \times 10^{-19}$  J. Calcule a frequência de corte para o alumínio, isto é, a frequência abaixo da qual não se consegue arrancar elétrons por efeito fotoelétrico. Qual o tipo de radiação de um fóton com essa frequência?
6. O elétron do átomo de hidrogênio quando no estado quântico  $n = 2$  tem uma energia  $E_2 = -5,44 \times 10^{-19}$  J e quando no nível  $n = 3$  sua energia vale  $E_3 = -2,42 \times 10^{-19}$  J. Considerando uma transição espontânea em que o elétron decaia do nível de energia  $n = 3$  para o nível  $n = 2$ , responda:
  - a) Qual a energia e comprimento de onda do fóton emitido?
  - b) O que acontece ao elétron do hidrogênio no estado  $n = 2$  se ele absorver um fóton de ultravioleta com comprimento de onda igual a  $2 \times 10^{-7}$  m? Justifique numericamente.
7. O fóton é partícula ou onda? Discuta.
8. Explique o que vem a ser a dualidade onda-partícula. Existe algum fenômeno macroscópico que exiba esta propriedade?
9. Considere as fontes de radiação eletromagnética abaixo e em cada caso calcule a energia do fóton e a taxa de emissão de fótons.
  - a) Um telefone celular analógico emite sinal cuja frequência é de 0,8 GHz com uma potência da ordem de 0,5 W.
  - b) A frequência de micro-ondas utilizada em fornos domésticos é escolhida de maneira que entre em ressonância com o modo de vibração da molécula de água e seu valor é de 2,45 GHz. Um forno típico tem uma potência de 1,3 kW.
10. O olho humano possui sua máxima sensibilidade para comprimentos de onda aproximadamente iguais a  $0,54 \mu\text{m}$ . Nesse caso e em

condições ideais, o olho normal registra uma sensação visual quando os fótons incidentes são absorvidos numa taxa tão baixa quanto 100 fótons por segundo.

- a) Qual a energia do fóton para a qual nossa visão é mais sensível?
  - b) A que potência correspondente essa taxa?
11. A imagem na tela de um aparelho de televisão é formada por pontos, cada um deles resultante da colisão de elétrons de alta velocidade contra a tela luminescente. Três tipos diferentes de substância luminescentes emitem luz de determinadas cores (vermelho, verde e azul) ao serem excitadas pelos elétrons. Pode acontecer de algum desses elétrons sofrer colisão contra outro material na tela e, ao ser bruscamente desacelerado, converterem sua energia cinética criando um único fóton de alta energia. A massa do elétron é  $9 \times 10^{-31}$  kg e o valor de sua velocidade em um tubo de imagem de televisão é da ordem de  $7 \times 10^7$  m/s.
- a) Calcule a energia cinética dos elétrons.
  - b) No caso de um elétron utilizar toda sua energia cinética na produção de um único fóton, estime a energia, a frequência e o comprimento de onda desse fóton.
  - c) O tubo de imagem sempre vaza uns poucos desses fótons de alta energia. Verifique o tipo de radiação eletromagnética correspondentes a estes fótons emitidos. Você classificaria este tipo de radiação como perigosa à saúde? Ela é ionizante? Consulte as tabelas apresentadas no texto.
12. Calcule a frequência e o comprimento de onda de um fóton que seja capaz de ionizar o átomo de hidrogênio. A energia necessária para arrancar do átomo de hidrogênio seu elétron do nível fundamental consta da tabela 9-1 de energia de ionização. Qual é o tipo dessa radiação eletromagnética ionizante?
13. O elétron é partícula ou onda? Discuta com seu professor e colegas.
14. Calcule o comprimento de onda de De Broglie de um elétron viajando a  $10^{-3}$  m/s; a 1 m/s; e a  $10^{-3}$  m/s.
15. Estime a ordem de grandeza do comprimento de onda de De Broglie de uma pessoa andando a cerca de 1 m/s. E no caso de o centro de massa da pessoa estar se movimentado a cerca de  $10^{-3}$  m/s.
16. Suponha que queiramos conhecer precisamente o valor da quantidade de movimento de um próton. A natureza impõe alguma restrição a este tipo de conhecimento no caso de o próton estar livre? E no caso de o

- próton estar confinado no interior de um núcleo atômico, cujo diâmetro é da ordem de  $10^{-15}$  m? Explique.
17. Cite algumas crenças dos cientistas, que foram abaladas em decorrência do princípio da incerteza de Heisenberg.
  18. Explique por que uma internet de banda larga transmite dados com maior rapidez.
  19. Em um sinal de vídeo cada tela, apresentada instantaneamente, é constituída de  $700 \times 525$  pixels e são projetadas 30 telas/segundo. Suponho que cada pixel possa ser representado por um pulso ondulatório, calcule o número de pulsos por segundo, a duração de cada pulso e estime a largura de banda necessária para transmitir tal sinal. Seria possível que este sinal de vídeo fosse transmitido por uma onda de rádio de frequência média da ordem de 100 kHz?
  20. Numa fibra ótica o sinal é transmitido em frequências na faixa do visível ou do infravermelho (ver boxe sobre fibra ótica no capítulo 6 do volume 2). Explique por que uma fibra ótica é capaz de transmitir um fluxo muito maior de informação do que, por exemplo, as ondas de rádio ou micro-ondas. Na prática uma única fibra ótica consegue transmitir simultaneamente um número enorme de canais de televisão.
  21. As questões abaixo se referem aos princípios básicos da física quântica, formulados por Bohr.
    - a) Explique com suas próprias palavras o “princípio da correspondência”. Além da Física Quântica, esse princípio também poderia ser aplicado à relatividade?
    - b) Explique com suas próprias palavras o “princípio da complementaridade”. Cite exemplos que ilustrem este princípio.
  22. Calcule o comprimento de onda de De Broglie para um elétron na velocidade de 5,0 cm/s e para uma bolinha de aço de massa igual a 2,0 g na mesma velocidade. Verifique a necessidade ou não de se utilizar a física quântica, caso se queira estudar o movimento dos dois ao passar no interior de um tubo com 1,0 cm de diâmetro. Suponha que a bolinha caiba dentro do tubo.
  23. A teoria de Eletromagnetismo de Maxwell não necessitou ser corrigida depois do advento da relatividade. Esta teoria eletromagnética continua valendo no mundo microscópico, descrito pela Física Quântica?
  24. Uma partícula de massa  $m$  é arremessada ao longo do eixo  $x$ , onde a energia potencial  $E_p(x)$  varia de acordo com a figura. Na região “A” a energia potencial vale  $15 U$ , sendo  $U$  uma unidade arbitrária de

energia. Na região “B”, a energia potencial é nula; na região “C”, vale  $7 U$ ; e na região “D” a energia potencial é muito grande. A energia total da partícula é igual a  $16 U$  e todo o seu movimento ocorre sem atrito.

- a) Escreva em termos da unidade de energia  $U$  a energia cinética da partícula nas três regiões onde seu movimento é permitido pela Física clássica.
  - b) Escreva em termos da massa  $m$  e da unidade de energia  $U$  a velocidade da partícula nas regiões onde seu movimento é permitido pela Física Clássica.
  - c) Do ponto de vista da Física Clássica, descreva o movimento da partícula ao longo do eixo, desde sua primeira passagem pela região “A”, até seu contato com a barreira de energia potencial em “D” e seu retorno à região “A”.
  - d) A partir do resultado do item (b), calcule o comprimento de onda de De Broglie da partícula nas regiões “A”, “B” e “C”. Expresse seu resultado em termos de  $\lambda_A = h/(2mU)^{1/2}$ .
  - e) Tente esboçar um desenho da função de onda da partícula propagando ao longo do eixo  $x$ . Qual o aspecto da função de onda ao entrar em contato com a barreira de energia potencial em “D”? Considere tanto o caso de uma barreira de energia infinita quanto uma barreira de energia potencial um pouco maior que  $16 U$ .
25. Uma partícula é lançada contra uma barreira de energia potencial na forma de uma parede fina. Se a energia da partícula é insuficiente para penetrar na barreira, ela deveria ser refletida de volta, de acordo com a Física Clássica. Suponha que, na abordagem quântica através da equação de Schrodinger, se calcule que a função de onda da partícula do outro lado da parede ficou 100 vezes menor.
- a) De que fator foi reduzido o quadrado da função de onda do outro lado da parede?
  - b) Qual a probabilidade de a partícula tunelar?
  - c) Se a partícula for arremessada repetidas vezes contra a parede, quantas tentativas deve fazer, em média, antes de conseguir tunelar?

## 14 ANEXO C

### Descrição dos exercícios – Livro Didático 2

Exercício 1: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, definir relação entre a liberação de elétrons, a intensidade e a frequência ( $t_1$ ).

Exercício 2: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, classificação como corpuscular ou ondulatória dos fótons ( $t_2$ ).

Exercício 3: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, explicação sobre o fenômeno ( $t_3$ ).

Exercício 4: tarefa sobre efeito fotoelétrico, cálculo da função trabalho ( $t_4$ ).

Exercício 5: tarefa sobre a radiação eletromagnética, definir relação entre a energia e o comprimento de onda dos fótons ( $t_5$ ).

Exercício 6: tarefa sobre efeito fotoelétrico, cálculos sobre a energia do fóton ( $t_6$ ), função trabalho ( $t_7$ ), energia cinética ( $t_8$ ) e classificação frente uma tabela ( $t_9$ ).

Exercício 7: tarefa sobre a radiação eletromagnética (experiência de Thomson), cálculo da velocidade dos elétrons ( $t_{10}$ ) e mudança da trajetória ( $t_{11}$ ).

Exercício 8: tarefa sobre a radiação eletromagnética (raias espectrais), interpretação da Física Clássica sobre as distâncias entre as raios ( $t_{12}$ ).

Exercício 9: tarefa sobre a radiação eletromagnética (tubo de raios catódicos), explicação sobre a curvatura do feixe ( $t_{13}$ ).

Exercício 10: tarefa sobre a radiação térmica, cálculo da potência irradiada ( $t_{14}$ ).

Exercício 11: tarefa sobre a radiação térmica, explicação sobre os óculos de visão noturna ( $t_{15}$ ).

Exercício 12: tarefa sobre a radiação térmica, cálculos da emissividade ( $t_{16}$ ) e potência irradiada ( $t_{17}$ ).

Exercício 13: tarefa sobre a radiação térmica, cálculo da emissividade ( $t_{18}$ ).

Exercício 14: tarefa sobre a radiação térmica (corpo negro), cálculo da frequência de radiação (Lei de Wien) ( $t_{19}$ ), classificar como visível ou não e justificar ( $t_{20}$ ).

Exercício 15: tarefa sobre a radiação térmica, explicação sobre a emissão lâmpada uma incandescente ( $t_{21}$ ).

Exercício 16: tarefa sobre a radiação de corpo negro, cálculo da temperatura em função de uma frequência máxima de radiação ( $t_{22}$ ), interpretar a visibilidade aos olhos ( $t_{23}$ ) e a cor da radiação ( $t_{24}$ ).

Exercício 17: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo da frequência das três primeiras raias da série de Paschen ( $t_{25}$ ), ( $t_{26}$ ) e ( $t_{27}$ ), e cálculo da frequência limite da serie ( $t_{28}$ ).

Exercício 18: tarefa em relação ao modelo atômico, cálculo das frequências máximas e mínimas ( $t_{29}$ ) e ( $t_{30}$ ); justificativa das frequências máximas e mínimas ( $t_{31}$ ) e ( $t_{32}$ ) (ambas da série de Balmer).

Exercício 19: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo da frequência das três primeiras raias da série de Lyman ( $t_{33}$ ), ( $t_{34}$ ) e ( $t_{35}$ ), e cálculo da frequência limite ( $t_{36}$ ).

Exercício 20: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo da frequência de radiação emitida em duas transições eletrônicas (vermelho) ( $t_{37}$ ) e ( $t_{38}$ ).

Exercício 21: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo da frequência de radiação emitida em duas transições eletrônicas (violeta) ( $t_{39}$ ) e ( $t_{40}$ ).

Exercício 22: tarefa sobre a radiação térmica, definição sobre corpo negro ( $t_{41}$ ).

Exercício 23: tarefa sobre o modelo atômico, explicação sobre os modelos de Thomson ( $t_{42}$ ) e Rutherford ( $t_{43}$ ).

Exercício 24: tarefa sobre o modelo atômico, explicação sobre a absorção e emissão ( $t_{44}$ ).

Exercício 25: tarefa sobre o modelo atômico, definir o átomo de Bohr ( $t_{45}$ ).

Exercício 26: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo da frequência da radiação emitida ( $t_{46}$ ) (nível dois para nível um do átomo de hidrogênio).

Exercício 27: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo da diferença entre os níveis de energia ( $t_{47}$ ).

Exercício 28: tarefa sobre a dualidade (onda de matéria), cálculo do comprimento de onda ( $t_{48}$ ).

Exercício 29: tarefa sobre o princípio de exclusão de Pauli, definir ( $t_{49}$ ) e relacionar ( $t_{50}$ ) o princípio com a tabela periódica.

Exercício 30: tarefa sobre a dualidade (onda de matéria), cálculos do comprimento de onda do próton ( $t_{51}$ ) e de uma pessoa ( $t_{52}$ ).

Exercício 31: tarefa sobre o princípio da incerteza, cálculo da incerteza na mediação da posição (bola) ( $t_{53}$ ).

Exercício 32: tarefa sobre o princípio da incerteza, cálculo da incerteza na medição da posição (elétron) ( $t_{54}$ ).

Exercício 33: tarefa sobre princípio da incerteza, explicação sobre medição de um objeto macroscópico ( $t_{55}$ ) e explicação sobre as imprecisões nas medições ( $t_{56}$ ).

Exercício 34: tarefa sobre o princípio da incerteza, cálculo da incerteza na mediação da posição (bola) ( $t_{57}$ ).

Exercício 35: tarefa sobre o princípio da incerteza, cálculo da incerteza na medição da posição (elétron) ( $t_{58}$ ).

**Exercícios do Livro Didático 2 sobre a Teoria Quântica. – Transcritos na íntegra.**

1. (UFCSPA-RS) Sobre o efeito fotoelétrico, considere as seguintes afirmações:
  - I) No efeito fotoelétrico o número de elétrons arrancados aumenta com o aumento da intensidade da radiação incidente.
  - II) O efeito fotoelétrico só é obtido quando a frequência da radiação é igual ou superior a um valor mínimo chamado frequência de corte.
  - III) A energia cinética dos elétrons arrancados no efeito fotoelétrico depende da intensidade da radiação incidente e não depende da frequência dessa radiação.  
Quais estão corretas?
  - a) Apenas I.
  - b) Apenas II.
  - c) Apenas I e II.
  - d) Apenas II e III.
  - e) I, II e III.
2. (UFSM-RS) O efeito fotoelétrico é usado em dispositivos para controlar o funcionamento das lâmpadas nos postes de iluminação pública. Tal efeito evidencia a natureza:
  - a) Transversal de onda eletromagnética.
  - b) Longitudinal de onda eletromagnética.
  - c) Ondulatória da luz.
  - d) Corpuscular da luz.
  - e) Vibracional da luz.
3. (UFPR) O efeito fotoelétrico foi descoberto experimentalmente por Heinrich Hertz em 1887. Em 1905, Albert Einstein propôs uma explicação teórica para esse efeito, a qual foi comprovada experimentalmente por Millikan, 1914. Essa comprovação experimental deu a Einstein o prêmio Nobel de Física de 1921. Em relação a esse efeito, assinale a alternativa correta.

- a) O efeito fotoelétrico ocorre quando um elétron colide com um próton.
- b) A teoria de Einstein considerou que a luz nesse caso se comporta como uma onda.
- c) Esse efeito é observado quando fótons atingem uma superfície metálica.
- d) Esse efeito é utilizado para explicar o funcionamento de fontes de *laser*.
- e) Inexistem aplicações tecnológicas desse efeito em nosso cotidiano, pois ele ocorre somente no nível atômico.
4. (Udesc) Uma radiação ultravioleta, de comprimento de onda igual a  $2,50 \times 10^{-7}$  m, incide na superfície de um metal, fazendo com que sejam ejetados elétrons dessa superfície. Sendo a energia cinética máxima desses elétrons igual a 0,800 eV, qual o valor da função trabalho desse metal? (Adote a constante de Planck como  $h = 6,4 \times 10^{-34}$  J.s =  $4,0 \times 10^{-15}$  eV.s)
- a) 6,50 eV
- b) 5,60 eV
- c) 4,80 eV
- d) 4,00 eV
- e) 3,50 eV
5. (UFMG) Nos diodos emissores de luz, conhecidos como LEDs, a emissão de luz ocorre quando elétrons passam de um nível de maior energia para outro de menor energia. Dois tipos comuns de LEDs são o que emite luz vermelha e o que emite luz verde. Sabe-se que a frequência da luz vermelha é menor que a da luz verde. Sejam  $\lambda$  (verde) o comprimento de onda da luz emitida pelo LED verde e  $E$  (verde) a diferença de energia entre os níveis desse mesmo LED. Para o LED vermelho, essas grandezas são, respectivamente,  $\lambda$  (vermelho) e  $E$  (vermelho). Considerando-se essas informações, é correto afirmar que:
- a)  $E$  (verde) >  $E$  (vermelho) e  $\lambda$  (verde) >  $\lambda$  (vermelho).
- b)  $E$  (verde) >  $E$  (vermelho) e  $\lambda$  (verde) <  $\lambda$  (vermelho).
- c)  $E$  (verde) <  $E$  (vermelho) e  $\lambda$  (verde) >  $\lambda$  (vermelho).
- d)  $E$  (verde) <  $E$  (vermelho) e  $\lambda$  (verde) <  $\lambda$  (vermelho).
6. (Unicamp-SP) O efeito fotoelétrico, cuja descrição por Albert Einstein completou 100 anos em 2005 (ano internacional de Física), consiste na emissão de elétrons por um metal no qual incide um feixe de luz. No processo, “pacotes” bem definidos de energia luminosa, chamados fótons, são absorvidos um a um pelos elétrons do metal. O valor da



energia da cada fóton é dado por  $E_{\text{fóton}} = hf$ , onde  $h = 4 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$  é a chamada constante de Planck e  $f$  é a frequência da luz incidente. Um elétron só é emitido do interior do metal se a energia do fóton absorvido for maior que uma energia mínima. Para os elétrons mais fracamente ligados ao metal, essa energia mínima é chamada função trabalho  $W$  e varia de metal para metal (ver tabela abaixo). Considere  $c = 300000 \text{ km/s}$ .

<b>Metal</b>	<b>W (eV)</b>
Césio	2,1
Potássio	2,3
Sódio	2,8

- Calcule a energia do fóton (em eV), quando o comprimento de onda da luz incidente for  $5 \times 10^{-7} \text{ m}$ .
  - A luz de  $5 \times 10^{-7} \text{ m}$  é capaz de arrancar elétrons de quais dos metais apresentados na tabela?
  - Qual será a energia cinética de elétrons emitidos pelo potássio, se o comprimento de onda da luz incidente for  $3 \times 10^{-7} \text{ m}$ ? Considere os elétrons mais fracamente ligados do potássio e que a diferença entre a energia do fóton absorvido e a função trabalho  $W$  é inteiramente convertida em energia cinética.
7. Num tubo construído para a realização da experiência de Thomson há dois pares de placas paralelas entre si. O primeiro, logo depois do cátodo, com o auxílio de duas bobinas, seleciona os elétrons que o atravessam horizontalmente; o segundo par de placas, de comprimento  $L = 5,0 \text{ cm}$ , desvia a trajetória desses elétrons. No interior do primeiro há dois campos, elétrico e magnético, perpendiculares entre si, de módulo  $E = 4,0 \times 10^{-3} \text{ V/W}$  e  $B = 5,0 \times 10^{-4} \text{ T}$ ; no interior do segundo só permanece o campo elétrico, orientado verticalmente para baixo. Elétrons emitidos pelo cátodo atravessam esses campos, penetram entre duas placas de alumínio e as atravessam horizontalmente. Em seguida, atravessam o outro par de placas de comprimento  $L = 5,0 \text{ cm}$ . Determine:
- A velocidade dos elétrons que atravessam horizontalmente o primeiro par de placas;
  - O desnível vertical  $y$  desses elétrons, em relação ao nível inicial, ao sair do interior do segundo par de placas.

8. Como você acha que deveriam ser as raias espectrais da figura da página 326 de acordo com a física clássica? Elas deveriam ser igualmente espaçadas ou poderiam ter forma que têm, com distâncias irregulares? Justifique.
9. A figura a seguir mostra o tubo usado por Thomson e a trajetória do feixe dos raios catódicos que o atravessam. Qual a curva descrita por esse feixe? Justifique.
10. Um ladrilho quadrado, de 20 cm de lado, reveste um forno. Determine o saldo de potência emitida e absorvida por esse ladrilho quando o forno:
  - a) Está desligado, em equilíbrio térmico com o ambiente, cuja temperatura é 27 °C;
  - b) Está ligado e o ladrilho atinge a temperatura de 330 °C.
11. Por que com alguns binóculos especiais conseguimos “ver” à noite e com nossos olhos desarmados não? De onde vem a luz das coisas que nos vemos com esses binóculos?
12. Um azulejo de face quadrada, de 20 cm de lado, reveste um forno. Sabe-se que quando o forno está desligado, em equilíbrio térmico com o ambiente, à temperatura de 27 °C, a potência irradiada por esse azulejo para o ambiente é 17 W. Determine:
  - a) a emissividade do azulejo;
  - b) o saldo de potência irradiada quando o forno está ligado e o azulejo atinge a temperatura de 430 °C.
13. Uma chapa metálica exposta ao sol atinge a temperatura máxima de 127 °C, num local onde a temperatura ambiente é 17 °C. Suponha que ela só perca calor pela face exposta ao sol. A intensidade da radiação solar  $\left(\frac{\Delta P}{\Delta S}\right)$  que atinge a superfície da Terra no local é de 900 W/m<sup>2</sup>. Qual a emissividade dessa chapa?
14. Suponha que os corpos a seguir irradiem como corpos negros, isto é, que seja válida a lei do deslocamento de Wien:
  - ◆ a pele de uma pessoa à temperatura de 33,0 °C;
  - ◆ uma barra de ferro em brasa a 1500 °C.
  - a) Qual a frequência de máxima intensidade da radiação emitida por esses corpos?
  - b) Dado o esboço dos gráficos da intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função da frequência, para as temperaturas de 306 K e 1770 K, correspondentes às temperaturas da pele humana e

- da barra de ferro, em kelvin, citadas acima, é possível saber se esses corpos emitem radiação visível? Justifique.
15. Se, por meio de uma fonte de tensão variável, você fizer uma lâmpada incandescente acender gradativamente, vai observar que de início ela emite uma luz avermelhada igual à do espectro do corpo negro, mas daí em diante essa luz “foge” das cores do espectro. Você não a vê emitir sucessivamente o amarelo, o verde nem o azul. Quando chega ao brilho máximo, a luz que o filamento emite tem cor branca-amarelada. Como você justifica essa observação?
  16. Suponha que o filamento de uma lâmpada irradie como um corpo negro.
    - a) Qual a sua temperatura quando a frequência máxima da radiação eletromagnética que ele emite é de aproximadamente  $1,8 \times 10^{14}$  Hz?
    - b) A essa temperatura ele emite luz? De que cor? Justifique.
  17. Determine a frequência das três primeiras raias da série de Paschen. Qual o valor-limite da frequência de uma raia nessa série?
  18. Tendo como base a fórmula de Balmer, quais seriam a máxima e a mínima frequências emitidas pelo átomo de hidrogênio, em todo o seu espectro? Justifique.
  19. Determine a frequência das três primeiras raias da série de Lyman. Qual o valor-limite da frequência de uma raia nessa série?
  20. A raia vermelha do espectro do hidrogênio corresponde à transição do elétron da órbita  $n = 3$  à órbita  $n = 2$ . Determine;
    - a) a frequência da radiação emitida;
    - b) a frequência da radiação emitida se a transição do elétron atingir o estado fundamental ( $n = 1$ ).
  21. A primeira raia violeta do espectro do hidrogênio corresponde à transição do elétron da órbita  $n = 4$  à órbita  $n = 2$ . Determine;
    - a) a frequência da radiação emitida;
    - b) a frequência da radiação emitida se a transição do elétron atingisse o estado fundamental,  $n = 1$ .
  22. (UFRGS-RS) O espectro de radiação emitido por um corpo negro ideal depende basicamente de:
    - a) seu volume.
    - b) sua condutividade térmica.
    - c) sua massa.
    - d) seu calor específico.

- e) sua temperatura.
23. (UFC-CE) No início do século XX, novas teorias provocaram uma surpreendente revolução conceitual na Física. Um exemplo interessante dessas novas ideias está associado às teorias sobre a estrutura da matéria, mais especificamente àquelas que descrevem a estrutura dos átomos. Dois modelos atômicos propostos nos primeiros anos do século XX foram o de Thomson e o de Rutherford. Sobre esses modelos, assinale a alternativa correta.
- a) No modelo de Thomson, os elétrons estão localizados em uma pequena região central do átomo, denominada núcleo, e estão cercados por uma carga positiva, de igual intensidade, que está distribuída em torno do núcleo.
  - b) No modelo de Rutherford, os elétrons são localizados em uma pequena região central do átomo e estão cercados por uma carga positiva, de igual intensidade, que está distribuída em torno do núcleo.
  - c) No modelo de Rutherford, os elétrons movem-se em torno da carga positiva, que está localizada em uma pequena região central do átomo, denominada núcleo.
  - d) O modelo de Thomson e o modelo de Rutherford consideram a quantização da energia.
24. (UFRGS-RS) Um átomo em seu estado fundamental absorve a energia de um fóton e passa para um estado excitado. Sabe-se que, ao decair para outro estado intermediário (exceto o fundamental), o átomo emite um fóton. Considere as seguintes afirmações a esse respeito:
- I) O estado intermediário tem energia maior que o estado fundamental.
  - II) O fóton emitido tem frequência menor que o fóton absorvido.
  - III) Ao emitir o fóton, o átomo não recua.
- Quais estão corretas?
- a) Apenas I.
  - b) Apenas I e II.
  - c) Apenas I e III.
  - d) Apenas II e III.
  - e) I, II e III.
25. (UFPEL-RS) De acordo com o modelo atômico de Bohr, o átomo pode absorver ou emitir fótons, que são pacotes quantizados de energia. Um átomo de hidrogênio sofre uma transição passando de um estado estacionário com  $n = 1$ , cuja energia é  $-13,6 \text{ eV}$ , para um

estado estacionário com  $n = 2$ , cuja energia é  $-3,4$  eV. Nessa transição, o átomo de hidrogênio ..... uma quantidade de energia exatamente igual a .....

Com base em seus conhecimentos, a alternativa que preenche corretamente as lacunas no texto é:

- a) Absorve  $-13,6$  eV.
  - b) Emite  $-10,2$  eV.
  - c) Emite  $-3,4$  eV.
  - d) Absorve  $-3,4$  eV.
  - e) Absorve  $-10,2$  eV.
  - f) I.R.
26. (UFPI) Um átomo de hidrogênio está em um estado excitado  $n = 2$ , com uma energia  $E = -3,4$  eV. Ocorre uma transição para o estado  $n = 1$ , com energia  $E = -13,6$  eV, e um fóton é emitido. A frequência da radiação emitida, em Hz, vale aproximadamente.
- a)  $2,5 \times 10^{15}$
  - b)  $2,0 \times 10^{15}$
  - c)  $1,5 \times 10^{15}$
  - d)  $1,0 \times 10^{15}$
  - e)  $5,0 \times 10^{14}$
27. (UFPE) As lâmpadas de vapor de sódio usadas na iluminação pública produzem luz de cor laranja com comprimentos de onda iguais a  $\lambda_1 = 589,0$  nm e  $\lambda_2 = 589,6$  nm. Essas emissões tem origem em dois níveis de energia dos átomos de sódio que decaem para o mesmo estado final. Calcule a diferença de energia,  $\Delta E$ , entre estes níveis em unidades de  $10^{-22}$  J.
28. Determine o comprimento de onda associado a:
- a) um elétron de massa  $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$  kg com velocidade  $v_e = 6,0 \times 10^6$  m/s;
  - b) bola de futebol de massa  $m_b = 0,40$  kg com velocidade  $v_b = 20$  m/s.
29. Se não existisse o princípio da exclusão de Pauli, seria possível o ordenamento dos elementos como aparece no diagrama de distribuição eletrônica dos elementos? Justifique.
30. Determine o comprimento de onda associado a:
- a) um próton de massa  $m_p = 1,7 \times 10^{-27}$  kg com velocidade de  $v_e = 5,0 \times 10^7$  m/s;
  - b) um automóvel de massa  $m_a = 1000$  kg, com velocidade de  $v_a = 50$  m/s.

31. Uma bola de futebol tem massa de 0,45 kg e move-se com velocidade de 30 m/s. Supondo que a quantidade de movimento seja determinada com uma incerteza de 2,0%, de acordo com o princípio da incerteza, determine:
  - a) A incerteza ao medir a posição dessa bola;
  - b) Essa incerteza percentual na posição dessa bola em relação a um comprimento de 100 m.
32. Um elétron move-se na direção do eixo  $x$  com velocidade de  $3,0 \times 10^6$  m/s. Supondo que se possa medir essa velocidade com incerteza de 2,0%, qual é a incerteza na medida da posição desse elétron?
33. Como você poderia medir o diâmetro de uma bola de sorvete? Que imprecisões seriam inevitáveis em sua medida? Explique.
34. Uma bola de futebol, de 0,40 kg, atinge o gol com velocidade de 20 m/s. De acordo com o princípio da incerteza, qual é a incerteza inevitável que se comete ao medir a posição dessa bola, supondo que a quantidade de movimento é determinada com uma incerteza de 5,0%?
35. Um nêutron move-se na direção do eixo  $x$  com velocidade de  $6,0 \times 10^6$  m/s. Supondo que se possa medir essa velocidade com uma incerteza de 5,0% qual a incerteza na medida da posição desse elétron?

## 15 ANEXO D

### Descrição das tarefas dos exercícios – Livro Didático 3

Exercício 1: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da frequência de corte ( $t_1$ ) e energia cinética máxima ( $t_2$ ).

Exercício 2: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da taxa de elétrons emitidos quando iluminados por uma radiação específica ( $t_3$ ).

Exercício 3: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da função trabalho ( $t_4$ ) e interpretação da ocorrência ou não do fenômeno ( $t_5$ ).

Exercício 4: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da taxa de fótons emitidos por um *laser* ( $t_6$ ).

Exercício 5: tarefa sobre efeito fotoelétrico, cálculo da frequência de corte ( $t_7$ ).

Exercício 6: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da energia cinética dos elétrons ( $t_8$ ).

Exercício 7: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, definição da energia cinética máxima ( $t_9$ ).

Exercício 8: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da função trabalho para um dado gráfico de resultados experimentais ( $t_{10}$ ).

Exercício 9: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo do comprimento de onda do fóton ( $t_{11}$ ).

Exercício 10: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, explicação em relação à energia cinética, intensidade da luz incidente e ocorrência do fenômeno ( $t_{12}$ ).

Exercício 11: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, interpretação em relação à energia cinética máxima, frequência, constante de Planck e função trabalho ( $t_{13}$ ).

Exercício 12: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculos em relação à frequência de corte ( $t_{14}$ ) e função trabalho ( $t_{15}$ ).

Exercício 13: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculos da frequência de corte ( $t_{16}$ ) e função trabalho ( $t_{17}$ ).

### Exercícios do Livro Didático 3 sobre a Teoria Quântica. – Transcritos na íntegra.

1. Sabendo que a função trabalho do metal cobre é 4,7 eV ( $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ), responda:
  - a) Qual é a frequência mínima da radiação capaz de provocar o efeito fotoelétrico?

- b) Qual é a energia cinética máxima dos elétrons emitidos pelo cobre para uma radiação com o triplo da frequência mínima?
- A função trabalho do metal zinco é 4,31 eV. Qual deve ser a ddp aplicada pelos elétrons emitidos por uma placa de zinco quando ela é iluminada por uma radiação de 2100 Å ( $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ )?
  - Verifique com quais desses materiais é possível obter o efeito fotoelétrico com a luz visível.

Metal	Função Trabalho (eV)
Sódio	2,28
Alumínio	4,08
Chumbo	4,14
Ferro	4,50
Prata	4,73

- Um determinado *laser* emite radiação de comprimento de onda de  $3,0 \times 10^{-7} \text{ m}$ . Sendo a velocidade da luz no vácuo igual a  $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$  e a potência do *laser* igual a 6,0 mW, determine o número de fótons emitidos por segundo por esse *laser*.
- A função trabalho de um determinado metal é 3,0 eV. Se ele for iluminado com luz de comprimento de onda  $5,0 \times 10^{-7} \text{ m}$ , ocorrerá efeito fotoelétrico?
- A função trabalho do alumínio é 4,08 eV. Qual deve ser a energia cinética dos elétrons quando o alumínio é iluminado por uma radiação de 1900 Å?
- (UFV-MG) Quando uma onda eletromagnética incide sobre um metal ela pode arrancar elétrons do material. Esse fenômeno é conhecido como efeito fotoelétrico. Seja  $f$  a frequência da onda eletromagnética,  $h$  a constante de Planck e  $w$  a energia mínima necessária para retirar um elétron de metal. É CORRETO afirmar que a energia cinética máxima de um elétron emitido no efeito fotoelétrico é dada por:
  - $hf$
  - $hf + w$
  - $w - hf$



- d)  $hf - w$
8. (UFC-CE) O gráfico mostrado abaixo resultou de uma experiência na qual a superfície metálica de uma célula fotoelétrica foi iluminada, separadamente, por duas fontes de luz monocromática distintas, de frequências  $\nu_1 = 6,0 \times 10^{14}$  Hz e  $\nu_2 = 7,5 \times 10^{14}$  Hz, respectivamente. As energias cinéticas máximas,  $K_1 = 2,0$  eV e  $K_2 = 3,0$  eV, dos elétrons arrancados do metal, pelos dois tipos de luz, estão indicadas no gráfico. A reta que passa pelos dois pontos experimentais do gráfico obedece à relação estabelecida por Einstein para o efeito fotoelétrico, ou seja:  $K = h\nu - W$ , onde  $h$  é a constante de Planck e  $W$  é a chamada função trabalho, característica da cada material.

Baseando-se na relação de Einstein, o valor calculado de  $W$ , em elétron-voltz, é:

- a) 1,3  
b) 1,6  
c) 1,8  
d) 2,0  
e) 2,3
9. (Ufes) O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), instalado no Polo Tecnológico de Campinas-SP, é o único desse gênero existente no hemisfério Sul. O LNLS coloca o Brasil num seleto grupo de países capazes de produzir luz síncrotron. Luz síncrotron é a intensa radiação eletromagnética produzida por elétrons de alta energia num acelerador de partículas. O comprimento de onda do fóton com energia de 6600 eV é de:
- a)  $4,80 \times 10^{-48}$  m  
b)  $3,00 \times 10^{-32}$  m  
c)  $3,00 \times 10^{-29}$  m  
d)  $1,87 \times 10^{-13}$  m  
e)  $1,87 \times 10^{-10}$  m
10. (UFRN) No final do século XIX, vários pesquisadores perceberam que a luz era capaz de ejetar elétrons quando incidia em superfícies metálicas. Esse fenômeno, que ocorre sob certas condições, foi chamado de efeito fotoelétrico. A figura 1a mostra luz policromática de intensidade  $I_0$ , cujos fótons possuem energia entre 2,0 eV e 6,0 eV incidindo sobre uma superfície metálica. Observa-se que, dessa superfície, são ejetados elétrons com

energia cinética máxima,  $E_{c\text{máx}}$ . A figura Ib mostra, também, luz policromática de intensidade  $2I_0$ , cujos fótons possuem energia entre 2,0 eV e 6,0 eV incidindo sobre a mesma superfície metálica. Observa-se, ainda, que também são ejetados com energia cinética máxima,  $E_{c\text{máx}}$ .

A figura IIa, por sua vez, mostra luz monocromática de intensidade  $I_0$ , cujos fótons possuem energia de 3,0 eV incidindo sobre a mesma superfície metálica. Nesse caso, não se observam elétrons ejetados da superfície. Por outro lado, a figura IIb mostra luz monocromática de intensidade  $I_0$ , cujos fótons possuem energia de 6,0 eV incidindo sobre a mesma superfície metálica. Nesse caso, observam-se elétrons sendo ejetados da superfície.

Com base na teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico:

- a) Explique por que a energia cinética máxima dos elétrons,  $E_{c\text{máx}}$ , independe da intensidade da luz policromática incidente;
  - b) Explique por que, para essa superfície metálica, o efeito fotoelétrico ocorre apenas quando incide luz cujos fótons possuem energia de 6,0 eV.
11. (UFRGS-RS) Em 1887, quando pesquisava sobre a geração e a detecção de ondas eletromagnéticas, o físico Heinrich Hertz (1857-1894) descobriu o que hoje conhecemos por “efeito fotoelétrico”. Após a morte de Hertz, seu principal auxiliar, Philip Lenard (1862-1947), prosseguiu a pesquisa sistemática sobre o efeito descoberto por Hertz. Entre as várias constatações experimentais daí decorrentes, Lenard observou que a energia cinética máxima,  $K_{\text{máx}}$ , dos elétrons emitidos pelo metal era dada por uma expressão matemática bastante simples:  $K_{\text{máx}} = Bf - C$ , onde  $B$  e  $C$  são duas constantes cujos valores podem ser determinados experimentalmente. A respeito da referida expressão matemática, considere as seguintes afirmações.
- I. A letra  $f$  representa a frequência das oscilações de uma força eletromotriz alternada que deve ser aplicada ao metal.
  - II. A letra  $B$  representa a conhecida “constante de Planck”, cuja unidade no Sistema Internacional é J.s.
  - III. A letra  $C$  representa uma constante, cuja a unidade no Sistema Internacional é J, que corresponde à energia

mínima que a luz incidente deve fornecer a um elétron de metal para removê-lo do mesmo.

Quais afirmativas estão corretas?

- a) Apenas I.
  - b) Apenas II.
  - c) Apenas I e III.
  - d) Apenas II e III.
  - e) I, II e III.
12. (UFJF-MG) No efeito fotoelétrico, a frequência de corte associada à função trabalho de um material é de  $5 \times 10^{14}$  Hz. Com relação à frase anterior, é CORRETO afirmar que:
- a) haverá emissão de elétrons quando o material for iluminado com luz de frequência maior que  $5 \times 10^{14}$  Hz.
  - b) haverá emissão de elétrons quando o material for iluminado com luz de frequência menor que  $5 \times 10^{14}$  Hz.
  - c) só haverá emissão de elétrons quando o material for iluminado com luz de frequência igual que  $5 \times 10^{14}$  Hz.
  - d) não haverá emissão de elétrons em nenhuma das três situações anteriores.
  - e) o material será cortado apenas quando for iluminado com luz e frequência maior que  $5 \times 10^{14}$  Hz.
13. (UFC-CE) A função trabalho de um dado metal é 2,5 eV.
- a) Verifique se ocorre emissão fotoelétrica quando sobre esse metal incide luz de comprimento de onda  $\lambda = 6,0 \times 10^{-7}$  m. A constante de Planck é  $h = 4,2 \times 10^{-15}$  eV.s e a velocidade da luz no vácuo é  $c = 3,0 \times 10^8$  m/s.
  - b) Qual é a frequência mais baixa da luz incidente capaz de arrancar elétrons do metal?

**16 ANEXO E**

## Descrição das tarefas dos exercícios – Livro Didático 4

Exercício 1: tarefa sobre a radiação eletromagnética, listar aparelhos do cotidiano ( $t_1$ ).

Exercício 2: tarefa sobre a radiação eletromagnética, descrição da perspectiva do estudante ( $t_2$ ).

Exercício 3: tarefa sobre a radiação eletromagnética, explicar mudança nos últimos 60 anos ( $t_3$ ).

Exercício 4: tarefa sobre a radiação eletromagnética, explicar relação entre comprimento de onda, frequência e velocidade da luz ( $t_4$ ).

Exercício 5: tarefa sobre a radiação eletromagnética de raios-X, cálculo da frequência ( $t_5$ ), fornecidos comprimento de onda e velocidade.

Exercício 6: tarefa sobre a radiação eletromagnética do visível, cálculo da frequência ( $t_6$ ), fornecidos comprimento de onda e velocidade.

Exercício 7: tarefa sobre a radiação eletromagnética gama, cálculo do comprimento de onda ( $t_7$ ), fornecido a frequência e velocidade.

Exercício 8: tarefa sobre a radiação eletromagnética, detecção utilizando um rádio portátil ( $t_8$ ) (lâmpadas, corrente em um fio, etc.).

Exercício 9: tarefa sobre a radiação eletromagnética, detecção utilizando um rádio portátil ( $t_9$ ) (aparelhos domésticos).

Exercício 10: tarefa sobre a radiação eletromagnética, descrever a interferência na detecção com o isolamento do instrumento ( $t_{10}$ ).

Exercício 11: tarefa sobre a radiação eletromagnética, analisar o feixe infravermelho do controle remoto em relação ao alcance ( $t_{11}$ ) e a penetrabilidade ( $t_{12}$ ).

Exercício 12: tarefa sobre a radiação eletromagnética, analisar o feixe infravermelho do controle remoto em relação à reflexão ( $t_{13}$ ) e à interferência ( $t_{14}$ ).

Exercício 13 ao exercício 20: tarefa sobre o espectro eletromagnético, construção de uma representação do espectro em escala de quatro folhas A4 dos exercícios 13 ao 19 ( $t_{15}$ ); ( $t_{16}$ ); ( $t_{17}$ ); ( $t_{18}$ ); ( $t_{19}$ ); ( $t_{20}$ ); ( $t_{21}$ ); cinco tarefas sobre a escala da tabela no exercício 20 ( $t_{22}$ ); ( $t_{23}$ ); ( $t_{24}$ ); ( $t_{25}$ ); ( $t_{26}$ ).

Exercício 21: tarefa sobre a radiação eletromagnética, verificar ( $t_{27}$ ) e descrever ( $t_{28}$ ) aparelhos utilizados na medicina.

Exercício 22: tarefa sobre a radiação eletromagnética, pesquisar sobre aparelhos médicos não expostos no texto ( $t_{29}$ ).

Exercício 23: tarefa sobre a radiação eletromagnética, construção de painel representativo ( $t_{30}$ ).

Exercício 24: tarefa sobre a radiação eletromagnética, explicar sobre aplicação no cotidiano ( $t_{31}$ ).

Exercício 25: tarefa sobre o modelo atômico, definir outras perspectivas além da científica ( $t_{32}$ ).

Exercício 26: tarefa sobre o modelo atômico, discutir relação com o cotidiano ( $t_{33}$ ).

Exercício 27: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da energia de um quantum ( $t_{34}$ ), fornecendo a frequência.

Exercício 28: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da energia em relação à frequência ( $t_{35}$ ).

Exercício 29: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, definir relação da emissão de elétrons e frequência ( $t_{36}$ ).

Exercício 30: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da frequência de corte de materiais quatro específicos ( $t_{37}$ ); ( $t_{38}$ ); ( $t_{39}$ ); ( $t_{40}$ ).

Exercício 31: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculos da intensidade da radiação ( $t_{41}$ ) e energia cinética do fóton ( $t_{42}$ ).

Exercício 32: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da energia ( $t_{43}$ ) e comprimento de ondas do fóton ( $t_{44}$ ).

Exercício 33: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, explicar a ocorrência do fenômeno ( $t_{45}$ ).

Exercício 34: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da energia do fóton ( $t_{46}$ ), dadas frequência e função trabalho.

Exercício 35: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da energia do fóton ( $t_{47}$ ) e mudança de trajetória do elétron ( $t_{48}$ ).

Exercício 36: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da energia de  $n$  fótons ( $t_{49}$ ).

Exercício 37: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da energia do fóton ( $t_{50}$ ) e energia cinética do elétron ( $t_{51}$ ), dadas as frequência.

Exercício 38: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, definir na expressão formal o comprimento de onda ( $t_{52}$ ), energia ( $t_{53}$ ) e função trabalho ( $t_{54}$ ).

Exercício 39: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da energia ( $t_{55}$ ) e comprimento de onda do fóton ( $t_{56}$ ), e interpretação frente às questões propostas para ocorrência do fenômeno ( $t_{57}$ ).

Exercício 40: tarefa sobre a radiação térmica (radiação solar), pesquisar ( $t_{58}$ ) e discutir ( $t_{59}$ ).

Exercício 41: tarefa sobre a ruptura (quantização da energia), comparação do espectro contínuo e discreto ( $t_{60}$ ).

Exercício 42: tarefa sobre o modelo atômico de Bohr, cálculo da energia entre diferentes níveis ( $t_{61}$ ).

Exercício 43: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo da energia de excitação eletrônica ( $t_{62}$ ), fornecida a faixa de frequência.

Exercício 44: tarefa sobre a radiação eletromagnética, definir a diferença da energia entre frequências do verde e amarelo ( $t_{63}$ ).

Exercício 45: tarefa sobre o modelo atômico, definir energia do fóton emitido em transição eletrônica no átomo ( $t_{64}$ ).

Exercício 46: tarefa sobre o modelo atômico, calcular níveis de energia do átomo de hidrogênio ( $t_{65}$ ).

Exercício 47: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculos da energia ( $t_{66}$ ) e frequência do fóton emitido ( $t_{67}$ ) e cálculo função trabalho de cinco materiais específicos ( $t_{68}$ ); ( $t_{69}$ ); ( $t_{70}$ ); ( $t_{71}$ ); ( $t_{72}$ ).

Exercício 48: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da energia ( $t_{73}$ ) e função trabalho de um fóton específico ( $t_{74}$ ).

Exercício 49: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo da energia do estado fundamental (átomo do ouro) ( $t_{75}$ ).

Exercício 50: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo dos níveis atômicos referentes a um fóton específico ( $t_{76}$ ) e construção de diagrama ( $t_{77}$ ).

Exercício 51: tarefa sobre o modelo atômico, cálculos da energia de excitação ( $t_{78}$ ) e emissão ( $t_{79}$ ), construção de diagrama ( $t_{80}$ ) e classificação do fóton emitido ( $t_{81}$ ).

Exercício 52: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculos da energia do fóton ( $t_{82}$ ) e função trabalho ( $t_{83}$ ).

Exercício 53: tarefa sobre a interferência e difração, observação das fendas de interferência entre os dedos ( $t_{84}$ ).

Exercício 54: tarefa sobre a interferência e difração, explicação sobre ondas sonoras e eletromagnéticas ( $t_{85}$ ).

Exercício 55: tarefa sobre a difração e interferência, cálculo da largura da fenda de difração ( $t_{86}$ ).

Exercício 56: tarefa sobre a difração e interferência, cálculo da frequência para difração em fendas específicas ( $t_{87}$ ).

Exercício 57: tarefa sobre a interferência e difração, definir interferência destrutiva ( $t_{88}$ ) e construtiva ( $t_{89}$ ) em relação a duas fontes.

Exercício 58: tarefa sobre a interferência e difração, explicar a diferença de fase onda construtiva ( $t_{90}$ ) e destrutiva ( $t_{91}$ ).

Exercício 59: tarefa sobre a difração e interferência, cálculos do comprimento de onda ( $t_{92}$ ), velocidade ( $t_{93}$ ) e diferença de fase ( $t_{94}$ ).

Exercício 60: tarefa sobre a interferência e difração, analisar o espectro de difração e interferência de um CD ( $t_{95}$ ).

Exercício 61: tarefa sobre a difração e interferência, analisar diferentes fontes luminosas refletidas em um CD ( $t_{96}$ ).

Exercício 62: tarefa sobre a interferência e difração, definir relação entre a frequência de emissão e absorção de fótons ( $t_{97}$ ).

Exercício 63: tarefa sobre a interferência e difração, análise do espectro ( $t_{98}$ ).

Exercício 64: tarefa sobre a interferência e difração, luz difratada, cálculo entre as distancia dos sulcos de difração ( $t_{99}$ ) e verificação das medidas ( $t_{100}$ ).

Exercício 65: tarefa sobre a interferência e difração, explicar sobre a modificação da frequência da luz incidente ( $t_{101}$ ) e sobre distância da fonte emissora ( $t_{102}$ ).

Exercício 66: tarefa sobre a difração e interferência de ondas, explicação sobre duas fontes mudando de frequências ( $t_{103}$ ).

Exercício 67: tarefa sobre a interferência e difração, cálculos dos ângulos de difração para quatro diferentes frequências de luz ( $t_{104}$ ); ( $t_{105}$ ); ( $t_{106}$ ); ( $t_{107}$ ).

Exercício 68: tarefa sobre a dualidade, interpretação de frases de música ( $t_{108}$ ).

Exercício 69: tarefa sobre a dualidade, cálculo da massa do elétron ( $t_{109}$ ) e comprimento de onda de um próton específico ( $t_{110}$ ).

Exercício 70: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculos do comprimento de onda ( $t_{111}$ ) e quantidade de movimento do fóton ( $t_{112}$ ), e cálculo da velocidade do elétron ( $t_{113}$ ).

Exercício 71: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculos da frequência de corte ( $t_{114}$ ) e quantidade de movimento ( $t_{115}$ ).

Exercício 72: tarefa sobre a dualidade, cálculos da quantidade de movimento ( $t_{116}$ ) e velocidade da partícula ( $t_{117}$ ).

Exercício 73: tarefa sobre a dualidade, cálculos da frequência ( $t_{118}$ ); ( $t_{119}$ ); ( $t_{120}$ ); ( $t_{121}$ ), energia ( $t_{122}$ ); ( $t_{123}$ ); ( $t_{124}$ ); ( $t_{125}$ ) e comprimento de ondas ( $t_{126}$ ); ( $t_{127}$ ); ( $t_{128}$ ); ( $t_{129}$ ) de quatro radiações específicas.

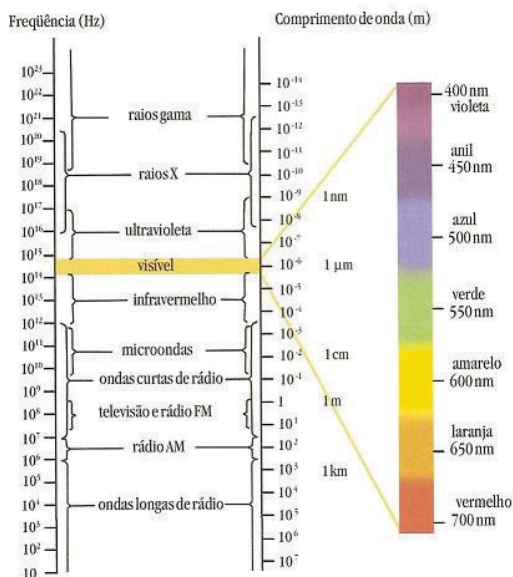
Exercício 74: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da expressão para energia do fóton após a colisão ( $t_{130}$ ).

## **Exercícios do Livro Didático 4 sobre a Teoria Quântica. –**

### **Transcritos na íntegra**



1. Que formas de radiação eletromagnética você utilizou hoje ou ainda vai utilizar nas próximas horas? Em seu caderno, faça uma lista delas.
2. Considere as radiações mencionadas no texto e na lista que você elaborou. Sobre quais você dispõe, hoje, de conhecimentos acerca da maneira pela qual são produzidas e como são utilizadas?
3. Conversando com pessoas acima de 60 anos, procure identificar quais dessas radiações eram disponíveis no tempo de infância delas e quais são de uso cotidiano mais recente.
4. (Fuvest) Radiações, como raios-X, luz verde, luz ultravioleta, micro-ondas ou ondas de rádio, são caracterizadas pelo comprimento de onda ( $\lambda$ ) e pela frequência ( $f$ ). Quando essas radiações se propagam no vácuo, todas apresentam o mesmo valor para:
  - a)  $\lambda$
  - b)  $f$
  - c)  $\lambda f$
  - d)  $\lambda/f$
  - e)  $\lambda^2/f$
5. (PUC-MG) Uma pessoa verificou que um dispositivo gerador de ondas eletromagnéticas emitia, predominantemente, radiações cujo comprimento de onda, no ar, era  $\lambda = 1,5 \times 10^{-10}$  m. Sabendo que a velocidade da luz vale  $3 \times 10^8$  m/s e tendo em vista o diagrama da figura a seguir, que apresenta, de maneira aproximada, as frequências das diversas radiações componentes do espectro eletromagnético, podemos concluir que o dispositivo observado deveria ser:
  - a) uma antena de uma emissora FM.
  - b) um ferro de passar roupa a  $300^\circ\text{C}$ .
  - c) uma antena de micro-ondas da Embratel.
  - d) uma lâmpada elétrica comum.
  - e) um tubo de raio X.



6. (PUC-SP) A parte do espectro eletromagnético, englobando o visível e o infravermelho, pode ser dividida, aproximadamente, nas seguintes faixas de frequência (em unidades de  $10^{14}$  Hz): infravermelho (3-4,3); vermelho (4,4-4,6); laranja/amarelo (4,7-5,3); verde (5,4-6,4); azul/violeta (6,5-7,4).

O *laser* usado na leitura de um CD tem comprimento de onda no ar de 780 nm, sendo o nanômetro (nm) igual a  $10^{-9}$  metro. Como a velocidade da luz no ar vale 300.000 km/s, esse *laser* está na faixa do:

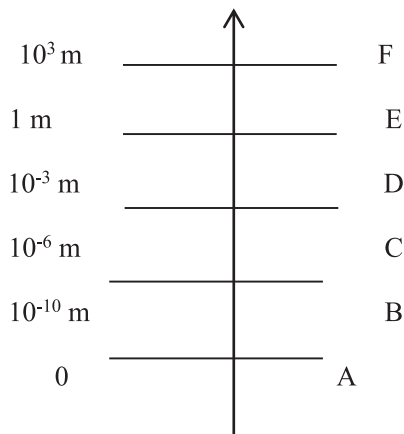
- Infravermelho
  - Vermelho
  - Laranja/amarelo
  - Verde
  - Azul/violeta
7. (Facil) Em 1939, no início da Segunda Guerra Mundial, Einstein enviou uma carta ao presidente norte-americano Roosevelt, alertando para a seguinte questão:

*Durante os últimos quatro meses, tornou-se provável – através dos trabalhos de Joliot na França e Fermi e Szilard na América – que pode ser tornar possível estabelecer uma reação em cadeia em uma larga massa de urânio, pela qual uma vasta quantidade*

*de potência... poderia ser gerada... Este fenômeno poderia também conduzir à criação de bombas.*

De fato o foi e, em 1945, bombas atômicas caíram sobre Hiroshima e Nagasaki. Houve centenas de milhares de mortos. Parte dos danos aos organismos humanos veio da exposição à radiação gama, que corresponde, no espectro eletromagnético, a frequência da ordem de  $10^{19}$  Hz.

Com base nesse dado, identifique no gráfico a região em que melhor é situado o espectro de radiação gama. Considere: velocidade da luz =  $3 \times 10^8$  m/s.



- a) Entre os pontos A e B.
- b) Entre os pontos B e C.
- c) Entre os pontos C e D.
- d) Entre os pontos D e E.
- e) Entre os pontos E e F.

Investigação de ondas de rádio e infravermelho dentro de casa (exercícios 8 a 12).

Não são apenas as estações de AM e FM que produzem ondas eletromagnéticas. É muito fácil produzir uma onda eletromagnética em casa. Fazemos isso muitas vezes ao dia quando, por exemplo, acionamos o interruptor para acender ao apagar uma lâmpada, o que significa variar abruptamente a corrente elétrica dentro do fio.

8. Com um radinho portátil qualquer você poderá detectar essa onda eletromagnética, basta colocá-lo perto do interruptor, ligado “fora de estação”; poderá verificar que seu rádio fará um ruído quando você ligar e desligar a lâmpada, indicando que a oscilação eletromagnética foi captada pela antena do rádio.
9. Investigue, também, que outras ondas eletromagnéticas, produzidas em sua casa, seu rádio pode sintonizar. Por exemplo, ele sintoniza as ondas produzidas por liquidificadores, acendedores elétricos de foção ou telefones celulares?
10. Sintonize seu rádio em uma estação AM e FM e faça um teste sobre que materiais interferem na recepção feita pelo aparelho. Para tanto, envolva-o com diversos materiais, como papel celofane, plástico transparente, papel comum, papelão, agasalho de lã, papel-alumínio e lata. O resultado é o mesmo para todos os materiais? Que materiais interferem mais?
11. E quanto à radiação infravermelha produzida por um controle remoto? Será que ela atravessa qualquer coisa? Faça o teste colocando entre o controle e a TV os mesmo materiais do item anterior e verifique: o nível de interferência é o mesmo, tanto no caso de ondas de rádio como de radiação infravermelha? Proponha uma explicação para o que você observou e troque opiniões com seus colegas de classe.
12. A radiação infravermelha pode ser refletida pelo espelho como a luz visível? Para responder, você pode fazer outra experiência, também com o controle remoto. Ligue sua TV em outro cômodo de sua casa e a partir dela, utilizando um ou mais espelhos, direcione os raios infravermelhos produzidos pelo controle remoto até a tela. Conseguiu mudar de canal ou mudar o volume do som?

Duas representações para o espectro eletromagnético (exercícios 13 a 20). Para compreender melhor como interpretar a largura das faixas de radiação do espectro eletromagnético, siga as instruções e, junto a um ou mais colegas, construa em um mesmo painel a representação por potenciação e a linear desse espectro.

13. Montem um painel colando 4 folhas de papel sulfite, tamanho carta, uma na outra, de modo que se sobreponham 3 cm e fiquem com os lados mais compridos na posição horizontal:

14. Trace uma linha vertical a 2 cm da borda esquerda do painel e, a partir dessa linha, trace em duas linhas horizontais que se estendem até a borda direita do painel; uma linha a 8 cm da borda superior do painel e a outra 10 cm abaixo dessa primeira linha horizontal:
15. A linha horizontal superior será utilizada para representar a escala por potenciação. Ao longo dela façam, de centímetro em centímetro, uma sequência de 24 marcas e rotulem cada qual com uma potência de 10, na ordem crescente, da esquerda para a direita, desde  $10^1$  até  $10^{24}$ :
16. Utilizem os dados da tabela a seguir para representar na linha horizontal as faixas de radiação eletromagnéticas indicadas. Representem a sequência do vermelho ao violeta, que é a faixa da luz visível, em uma única faixa. Utilizem canetas coloridas para destacar essa faixa do espectro, desde a cor vermelha até a violeta.

<b>Radiação eletromagnéticas</b>	<b>Faixas de frequência (Hz)</b>
Rádio e Micro-ondas	Próximo a zero até $3 \times 10^{12}$
Infravermelho	$3 \times 10^{12}$ a $4,6 \times 10^{14}$
Vermelho	$4,6 \times 10^{14}$ a $5,1 \times 10^{14}$
Laranja	$5,1 \times 10^{14}$ a $5,6 \times 10^{14}$
Amarelo	$5,6 \times 10^{14}$ a $6,1 \times 10^{14}$
Verde	$6,1 \times 10^{14}$ a $6,5 \times 10^{14}$
Azul	$6,5 \times 10^{14}$ a $7,0 \times 10^{14}$
Violeta	$7,0 \times 10^{14}$ a $7,5 \times 10^{14}$
Ultravioleta	$7,5 \times 10^{14}$ a $6,0 \times 10^{16}$
Raios X	$6,0 \times 10^{16}$ a $1,0 \times 10^{20}$
Raios gama	$1,0 \times 10^{20}$ a ...

17. Na linha horizontal inferior vocês farão a representação linear de parte do espectro eletromagnético. Ao longo da linha façam, a

- cada 10 cm, uma sequência de 10 marcas e rotulem cada uma delas com potências de  $10^{14}$ , desde  $1 \times 10^{14}$  até  $10 \times 10^{14}$ .
18. Utilizando os valores descritos no item 16, representem na linha horizontal inferior as faixas de frequência cujos valores estiverem compreendidos entre  $1 \times 10^{14}$  e  $10 \times 10^{14}$ . Destaquem com canetas coloridas cada uma das faixas correspondentes às cores do espectro visível.
  19. Antes de prosseguir para o próximo item, é necessário escrever todos os valores de frequência com múltiplos de uma mesma potência de 10. O valor  $6 \times 10^{16}$  Hz, por exemplo, pode ser reescrito como  $600 \times 10^{14}$ . Escolha a potência de  $10^{14}$  e realizem as conversões de todos os valores indicados na tabela anteriormente apresentada.
  20. Analisem as duas escalas e discutam as vantagens e desvantagens de cada representação. Algumas questões para a discussão.
    - ♦ Qual deveria ser o comprimento do painel para que nele coubesse toda a faixa do ultravioleta? E quanto à faixa dos raios X? Vocês teriam fita métrica suficiente para medir a distância desde o final da faixa do ultravioleta até o final da faixa dos raios X?
    - ♦ E quanto ao conjunto de todo o espectro eletromagnético? Mantidas as proporções da escala linear indicada na atividade, o comprimento do espectro inteiro seria maior ou menor do que a extensão de ponta a ponta de uma grande metrópole como São Paulo?  
Observação: Utilize  $10^{24}$  Hz como limite do espectro eletromagnético.
  21. Informe-se com seus familiares e conhecidos sobre que tipo de equipamento de diagnóstico ou de terapia, entre os mencionados no texto, eles já utilizaram e se conhecem seu princípio de funcionamento.
  22. Amplie seus conhecimentos sobre esses equipamentos entrevistando médicos e técnicos de laboratórios ou pesquisando em livros e revistas ou na internet.
  23. Com seu professor e colegas de classe, elabore um painel que propicie uma ampla visão de como as radiações eletromagnéticas são aplicadas na medicina, ordenando-as em ordem crescente suas frequências medida em hertz (Hz).

24. (Unama) Um grupo de candidatos aos vários cursos superiores da Unama discute sobre a importância de dominar os conceitos fundamentais da física, para se poder ter entendimento básico das aplicações da ciência e tecnologia em nosso mundo moderno. Procuram, então, relacionar as ondas eletromagnéticas a algumas de suas aplicações. Ajude esses candidatos, relacionando os itens da coluna 1 com os da coluna 2, a seguir: Observação: Apenas 4 componentes da Coluna 1 deverão ser relacionados.

Coluna 1: Ondas eletromagnéticas	Coluna 2: Exemplo de aplicação
1. Ondas de rádio	A. Terapia de calor
2. Infravermelho	B. Tratamento do câncer
3. Luz visível	C. Comunicação navio para terra
4. Raio X	D. Fotossíntese
5. Raios gama	
6. Raios cósmicos	

A relação correta é:

- a) 1C, 2A, 3D, 5B
- b) 2A, 4B, 5C, 6D
- c) 1C, 2B, 3D, 4A
- d) 1A, 2B, 3C, 6D

Antigas explicações para fenômenos do cotidiano (exercícios 25 e 26).

Por mais estranha que hoje possam nos parecer, as teorias sobre a constituição da matéria elaborada no mundo antigo explicavam satisfatoriamente muitos dos fenômenos naturais que ocorrem em nosso dia a dia.

25. Em enciclopédias, livros ou sites da internet especializados em história da ciência, pesquisem as teorias sobre a composição da matéria de outros filósofos da Grécia Antiga, como Tales de Mileto, Empédocles e Heráclito, ou pensamentos originais em

outras civilizações, como o *yin e yang* chinês ou os *dyzds e triads* hindus.

26. Discutam em grupo o resultado de suas pesquisas, procurando analisar a adequação das explicações dadas pelas antigas teorias a fenômenos culturais cotidianos, como a fumaça que sobe e a chuva que cai. Faça o mesmo com as teorias de Demócrito e Aristóteles, citadas no texto.
27. O valor de um *quantum* de energia depende da frequência da radiação emitida. Para uma luz azul de frequência igual a  $6 \times 10^{14}$  Hz, por exemplo, o *quantum* de energia vale:  $hf = 6,6 \times 10^{-34} \text{ Js} \cdot \frac{6 \times 10^{14}}{\text{s}} = 3,96 \times 10^{-19} \text{ J}$ . Da mesma forma que o quilowatt-hora (kWh) é utilizado para expressar valores de energia bem maiores que o joule ( $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$ ), no mundo do muito pequeno utiliza-se o elétron-volt (eV), unidade que corresponde à energia adquirida por um elétron acelerado por uma tensão elétrica de um volt (V) e que equivale a  $1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ . Assim, a energia do *quantum* daquela luz azul valeria 2,5 eV. A própria constante de Planck pode ser expressa utilizando a unidade eV, resultando  $h = 4,1 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ . Para familiarizar-se com o uso da unidade eV e com valores de energia do mundo subatômico, junte-se a um ou mais colegas e descubra o valor, em J e em eV, dos *quanta* (*quanta* é o plural de *quantum* em latim) de energia correspondentes às seguintes radiações:
- ◆ Luz infravermelha de  $1,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ;
  - ◆ Luz vermelha de  $4,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ;
  - ◆ Luz ultravioleta de  $2,5 \times 10^{15} \text{ Hz}$ ;
  - ◆ Raio X de  $4 \times 10^{18} \text{ Hz}$ ;
  - ◆ Raio  $\gamma$  de  $2 \times 10^{20} \text{ Hz}$ .
28. (UFMG) Dois feixes de raios X, I e II, incidem sobre uma placa de chumbo e são totalmente absorvidos por ela. O comprimento de onda do feixe II é três vezes maior que o comprimento de onda do feixe I. Ao serem absorvidos, um fóton de feixe I transfere à placa de chumbo uma  $E_1$ , e um fóton do feixe II, uma energia  $E_2$ . Considerando essas informações, é correto afirmar que:
- a)  $E_2 = E_1/3$
  - b)  $E_2 = E_1$
  - c)  $E_2 = 3 E_1$
  - d)  $E_2 = 9 E_1$



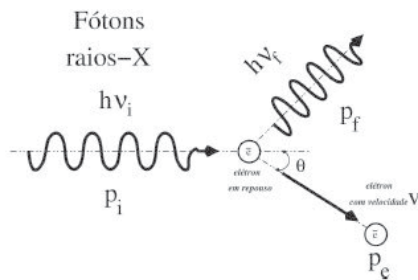
29. (UFRGS) Selecione a alternativa que apresenta as palavras que completam corretamente as lacunas, pela ordem, no seguinte texto relacionado ao efeito fotoelétrico. O efeito fotoelétrico, isto é, a emissão de \_\_\_\_\_ por metais sob a ação da luz, é um experimento dentro de um contexto físico extremamente rico, incluindo a oportunidade de pensar sobre o funcionamento do equipamento que leva à evidência experimental relacionada com a emissão e a energia dessas partículas, bem como a oportunidade de entender a inadequacidade da visão clássica do fenômeno. Em 1905, ao analisar esse efeito, Einstein fez a superposição revolucionária de que a luz, até então considerada um fenômeno ondulatório, poderia também ser concebida como constituída por conteúdo energético que obedecem a uma distribuição \_\_\_\_\_, os quanta de luz, mais tarde denominados \_\_\_\_\_.
- Fótons – continua – fótons.
  - Fótons – continua – elétrons.
  - Elétrons – continua – fótons.
  - Elétrons – discreta – elétrons.
  - Elétrons – discreta – fótons.
30. A energia mínima necessária para liberar um elétron de um material por meio da incidência de luz, também chamada de *função trabalho*, é uma característica de cada material. Para o tungstênio, por exemplo, o valor dessa energia é de 4,58 eV. Assim, para que ocorra o efeito fotoelétrico no tungstênio, é preciso iluminá-lo com luz que tenha fótons com, no mínimo, essa energia, o que corresponde à luz ultravioleta de  $1,1 \times 10^{15}$  Hz, pois:

$$E = hf \quad \therefore f = \frac{E}{h} = \frac{4,58eV}{4,1x10^{-15}} = 1,1x10^{15} Hz$$

Utilize os valores das energias mínimas de cada um dos materiais apresentados a seguir para descobrir com que luz ele deve ser iluminado para começar a emitir elétrons:

- Platina: E mínima = 6,35 eV;
- Prata: E mínima = 4,74 eV;
- Potássio: E mínima = 2,20 eV;
- Césio: E mínima = 1,90 eV.

31. (Unicamp) O projeto Auger (pronuncia-se ogê) é uma iniciativa científica internacional, com importante participação de pesquisadores brasileiros, que tem como objetivo aumentar nosso conhecimento sobre os raios cósmicos. Raios cósmicos são partículas subatômicas que, vindas de todas as direções e provavelmente até dos confins do Universo, bombardeiam constantemente a Terra. O gráfico a seguir mostra o fluxo (número de partículas por  $\text{m}^2$  por segundo) que atinge a superfície terrestre em função da energia da partícula, expressa em eV ( $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ). Considere a área da superfície terrestre  $5,0 \times 10^{14} \text{ m}^2$ .



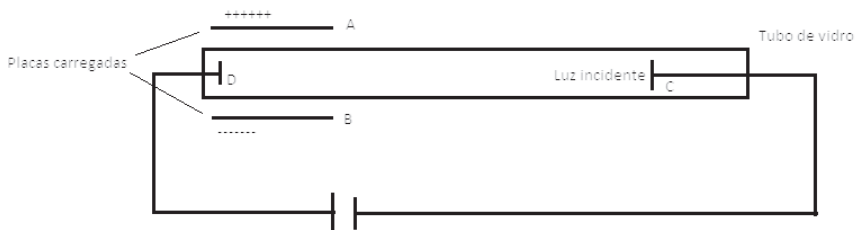
- a) Quantas partículas com energia de  $10^{16} \text{ eV}$  atingem a Terra ao longo de um dia?
- b) O raio cósmico mais energético já detectado atingiu a Terra em 1991. Sua energia era  $3,0 \times 10^{20} \text{ eV}$ . Compare essa energia com a energia cinética de uma bola de tênis de massa  $0,060 \text{ kg}$  em um saque a  $144 \text{ km/h}$ .
32. (UEL) Os tubos catódicos de televisão em cores operam com diferença de potencial em torno de  $22.000 \text{ V}$ , produzindo raios X. Assinale a alternativa que fornece a energia máxima de um fóton produzindo nessas condições e o comprimento de onda de feixe de raios X correspondente.
- a) Energia máxima de  $35,20 \text{ KeV}$  e comprimento de onda de  $0,35 \text{ \AA}$ .
- b) Energia máxima de  $22,00 \text{ KeV}$  e comprimento de onda de  $0,35 \text{ \AA}$ .
- c) Energia máxima de  $22,00 \text{ KeV}$  e comprimento de onda de  $0,56 \text{ \AA}$ .

- d) Energia máxima de 13,75 KeV e comprimento de onda de 0,83Å.
- e) Energia máxima de 13,75 KeV e comprimento de onda de 0,48Å.

Dados:  $1e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$ .  
 $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$   
 $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$

- 33. (ITA) Incide-se em um material fotoelétrico, e não se observa a emissão de elétrons. Para que ocorra a emissão de elétrons do mesmo material basta que aumente (m):
  - a) A intensidade de luz.
  - b) A frequência da luz.
  - c) O comprimento de onda da luz.
  - d) A intensidade e a frequência da luz.
  - e) A intensidade e o comprimento de onda da luz.
- 34. Uma luz de comprimento de 7000 Å (angstrom;  $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ ) incide sobre uma placa metálica cuja função trabalho vale 1,79 eV. O que é correto dizer a respeito do que acontecerá?
  - a) Não ocorrerá efeito fotoelétrico.
  - b) Elétrons serão arrancados da placa sem aquisição, porém, de energia cinética.
  - c) Dependerá da intensidade de luz incidente.
  - d) Elétrons serão emitidos da placa com energia cinética de 1,768 eV.
  - e) Dependerá da área iluminada da placa.

35. (UFJF-MG) A figura a seguir mostra uma montagem experimental em que o efeito fotoelétrico pode ser observado. A placa C é constituída de prata, cuja função trabalho é de 4,74 eV, e iluminada com luz de frequência  $1,6 \times 10^{15} \text{ Hz}$ .



- a) Compare a energia do fóton da luz incidente com a função trabalho da prata e determine se, nessas condições, ocorrerá o efeito fotoelétrico.
- b) Supondo que efeito fotoelétrico ocorra, as partículas ejetadas pela placa C se moverão até a placa D, sofrendo também o efeito do campo elétrico produzido pelas placas A e B. Nesse caso, a trajetória dessas partículas será desviada para A, para B ou não será modificada?
36. (ITA) No processo de fotossíntese, as moléculas de clorofila nas plantas verdes apresentam um pico de absorção da radiação eletromagnéticas no comprimento de ondas  $\lambda = 6,80 \times 10^{-7}$  m. Considere que a formação de glicose ( $C_6H_{12}O_6$ ) por esse processo de fotossíntese é descrita, de forma simplificada, pela reação:



Sabendo que a energia total necessária para que uma molécula de  $CO_2$  reaja é de  $2,34 \times 10^{-18}J$ , o número de fótons que deve ser absorvido para formar 1 molécula de glicose é:

- a) 8  
 b) 24  
 c) 48  
 d) 120  
 e) 240
37. (Unicamp) O efeito fotoelétrico, cuja descrição por Albert Einstein completou 100 anos em 2005 (ano internacional de Física), consiste na emissão de elétrons por um metal no qual incide um feixe de luz. No processo, “pacotes” bem definidos de energia luminosa, chamados fótons, são absorvidos um a um pelos elétrons do metal. O valor da energia de cada fóton é dado por  $F_{\text{fóton}} = hf$ , onde  $h = 4 \times 10^{-15}$  eV.s é a chamada constante de Planck e  $f$  é a frequência da luz incidente. Um elétron só é emitido do interior do metal se a energia do fóton absorvido for maior que uma energia mínima. Para os elétrons mais fracamente ligados ao metal, essa energia mínima é chamada função trabalho  $W$  e varia de metal para metal (ver a tabela a seguir).

Metal	W(eV)
Césio	2,1
Potássio	2,3
Sódio	2,8

Considere  $c = 300.000 \text{ m/s}$ .

- Calcule a energia do fóton (em eV), quando o comprimento de onda da luz incidente for  $5 \times 10^{-7} \text{ m}$ .
- A luz de  $5 \times 10^{-7} \text{ m}$  é capaz de arrancar elétrons de quais metais apresentados na tabela?
- Qual será a energia cinética de elétrons emitidos dos pelo potássio, se o comprimento da onda da luz incidente for  $3 \times 10^{-7} \text{ m}$ ? Considere os elétrons mais fracamente ligados do potássio e que a diferença entre a energia do fóton absorvido e a função trabalho  $W$  é inteiramente convertida em energia cinética.

38. (UFRGS) Em 1887, quando pesquisava sobre a geração e a detecção de ondas eletromagnéticas, o físico Heinrich Hertz (1857-1894) descobriu o que hoje conhecemos por efeito fotoelétrico. Após a morte de Hertz, seu principal auxiliar, Philip Lenard (1862 – 1947), prosseguiu a pesquisa sistemática sobre o efeito descoberto por Hertz. Entre as várias constatações experimentais daí decorrentes, Lenard observou que a energia cinética máxima,  $K_{\text{máx}}$ , dos elétrons emitidos pelo metal era dada por uma expressão matemática bastante simples,  $K_{\text{máx}} = Bf - C$ , onde  $B$  e  $C$  são duas constantes cujos valores podem ser determinados experimentalmente.

A respeito da referida expressão a frequência das oscilações de uma força eletromotriz alternada que deve ser aplicada ao metal.

- A letra  $f$  representa a frequência das oscilações de uma força eletromotriz alternada que deve ser aplicada ao metal.
- A letra  $B$  representa a conhecida Constante de Planck, cuja unidade no Sistema Internacional é J.s.
- A letra  $C$  representa uma constante, cuja unidade no Sistema Internacional é J, que corresponde à energia mínima que a luz incidente deve fornecer a um elétron do metal para removê-lo dali.

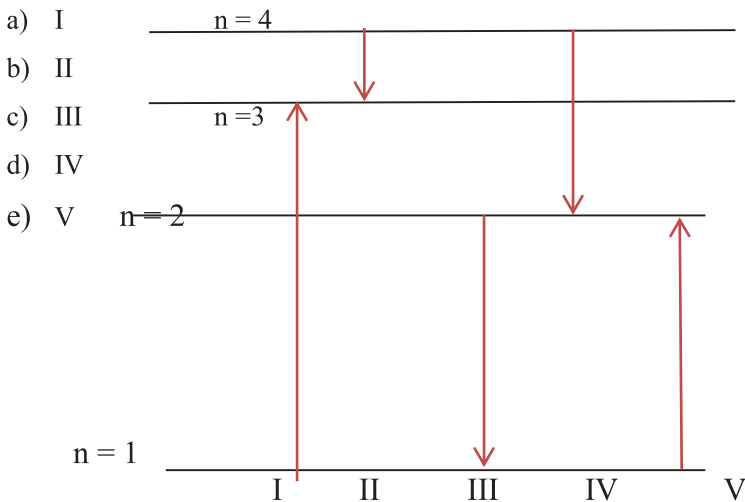
Quais estão corretas?

- a) Apenas I.  
 b) Apenas II.  
 c) Apenas I e III.  
 d) Apenas II e III.  
 e) I, II e III.
39. (Unama) As células fotoelétricas são dispositivos que possuem um comportamento semelhante aos LDR, pois também dependem da interação com a energia luminosa. Essas células, porém, constituem um perfeito exemplo de aplicação do efeito fotoelétrico, pois possui uma placa (catodo) que, quando iluminada por um feixe de luz, emite elétrons, que são atraídos por outra placa, o anodo. Esse fenômeno gera uma corrente elétrica que interfere em um circuito paralelo de função específica, como no caso dos alarmes contra ladrão. Quando o feixe de luz é interrompido (pelo ladrão), a célula libera o acionamento do circuito paralelo, disparando o alarme. Considerando que o catodo é feito de sódio metálico, cuja função de trabalho é de 2,28 eV, analise as afirmativas seguir.
- Dado: O produto da Constante de Planck ( $h$ ) pela velocidade da luz ( $c$ ) vale:  $1,24 \times 10^{-6}$  eV.m. Comprimento de onda na faixa do visível: 4000 a 7000 Angstrom. (1 Angstrom =  $10^{-10}$ )
- I. Na faixa do visível, somente algumas ondas possuirão comprimento de onda adequado para arrancar elétrons da placa.  
 II. Na faixa de onda dos raios X, os elétrons ejetados possuirão maior energia cinética do que os ejetados na faixa de onda do visível.  
 III. Na faixa de onda do infravermelho, haverá maior probabilidade de os elétrons serem ejetado da placa.  
 IV. No feixe de onda do visível, a corrente elétrica produzida é maior que a corrente produzida na faixa de onda do ultravioleta.
- Está correto o que ser afirma em:  
 a) I e II.  
 b) I e III.  
 c) II e III.  
 d) II e IV.
40. Como saber do que é feita uma estrela?  
 A substância hélio tem esse nome, que é como se chama o Sol em grego, porque sua existência foi descoberta primeiramente no Sol e só mais tarde na Terra.

É impossível ir até o Sol. Então, como se descobriu a presença de hélio no Sol e em qualquer outra estrela? Pesquise e discuta com seus colegas.

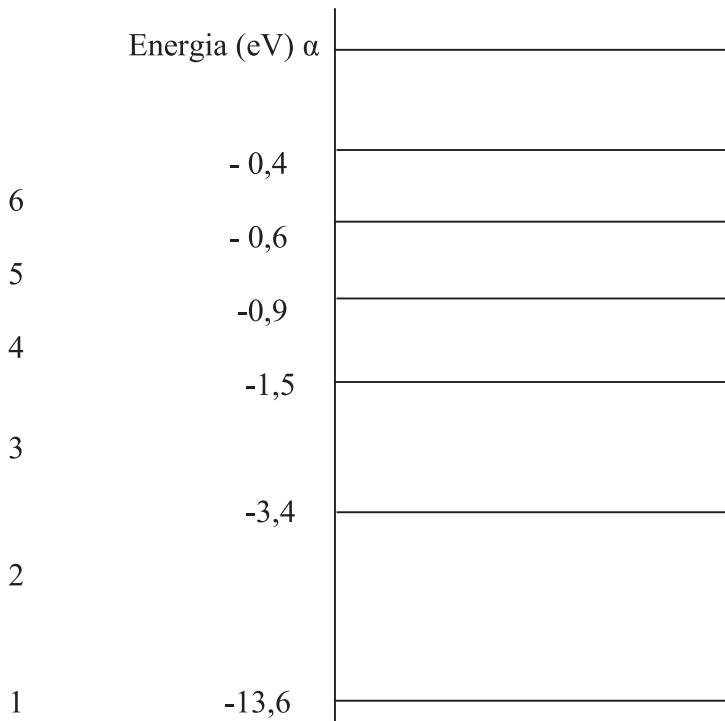
41. Um arco-íris
- Você não precisa esperar que chova em um dia ensolarado para ver um arco-íris; pode produzi-lo quando quiser, em um dia de sol.
- Em um dia ensolarado, posicione-se de costas para o Sol e, utilizando uma mangueira de jardim, produza sua própria chuva, esguichando água para o alto de modo a deixar o ar repleto de gotículas. Quando a luz do Sol atravessar as gotas de água, você verá o efeito de sua separação nas cores do arco-íris. Observe que entre uma cor e outra não há uma separação nítida; elas mudam, transformando-se uma na outra gradualmente. O arco-íris apresenta-se como um espectro luminoso contínuo.
- Para ver um “arco-íris” diferente, que seja “fatiado”, você vai precisar de uma luminária de mesa com lâmpada fluorescente compacta e de um CD (ou um disco em formato DVD). Coloque uma embalagem cilíndrica furada nas duas bases em frente à lâmpada, de modo que um feixe de luz possa incidir no centro da face espelhada do CD, e posicione a lâmpada, o eixo do CD e seu olho em uma mesma linha. Perceba como, nesse caso, as faixas coloridas são bem definidas, mudando abruptamente de uma para outra. Isso é o que se chama de espectro luminoso discreto.
42. No modelo de átomo de Bohr (modelo planetário do átomo), os elétrons estariam em camadas definidas (numeradas de 1 até infinito), das quais poderiam saltar conforme ganhassem ou perdessem energia. Qual o valor mínimo da energia dos fótons para excitar o átomo de hidrogênio nas seguintes transições:
- Do nível fundamental ( $n = 1$ ) para o segundo nível energético ( $n = 2$ )?
  - Do nível fundamental ( $n = 1$ ) para o terceiro nível energético ( $n = 3$ )?
  - Do nível fundamental ( $n = 1$ ) para o quarto nível energético ( $n = 4$ )?
  - Do segundo nível energético ( $n = 2$ ) para o terceiro nível energético ( $n = 3$ )?
  - Do terceiro nível energético ( $n = 3$ ) para o quarto nível energético ( $n = 4$ )?

43. Qual(is) da(s) transição(ões) mencionada(s) poderia(m) ser realizada(s) pela luz visível (de  $f = 4,5 \times 10^{14}$  Hz até  $f = 6 \times 10^{14}$  Hz)?
44. (UFMG) Para produzir fogos de artifício de diversas cores, misturam-se diferentes compostos químicos à pólvora. Os compostos à base de sódio produzem luz amarela, e os à base de bário, luz verde. Sabe-se que a frequência da luz amarela é menor que a da verde. Sejam  $E_{\text{Na}}$  e  $E_{\text{Ba}}$  as diferenças de energia entre os níveis de energia envolvidos na emissão de luz pelos átomos de sódio e de bário, respectivamente, e  $v_{\text{Na}}$  e  $v_{\text{Ba}}$  as velocidades dos fótons emitidos, também respectivamente. Assim sendo, é correto afirmar que:
- $E_{\text{Na}} < E_{\text{Ba}}$  e  $v_{\text{Na}} = v_{\text{Ba}}$
  - $E_{\text{Na}} < E_{\text{Ba}}$  e  $v_{\text{Na}} \neq v_{\text{Ba}}$
  - $E_{\text{Na}} > E_{\text{Ba}}$  e  $v_{\text{Na}} = v_{\text{Ba}}$
  - $E_{\text{Na}} > E_{\text{Ba}}$  e  $v_{\text{Na}} \neq v_{\text{Ba}}$
45. (ITA) O diagrama a seguir mostra os níveis de energia ( $n$ ) de um elétron em certo átomo. Qual das transições mostradas na figura representa a emissão de um fóton com o menor comprimento de onda?





46. (UFJF) A figura a seguir mostra os níveis de energia do átomo de hidrogênio. Se inicialmente o elétron está no estado quântico fundamental (de menor energia), qual a sua energia cinética após o átomo ter sido ionizado por um fóton de energia 20 eV?



- a) 33,6 eV  
b) 13,6 eV  
c) 6,4 eV  
d) 10,2 eV
47. Suponha que um elétron tenha saltado do nível 4 para o nível 2 do átomo de hidrogênio.
- a) Calcule a energia e a frequência do fóton emitido.  
b) Determine para quais dos materiais listados a seguir esse fóton poderá provocar o efeito fotoelétrico.

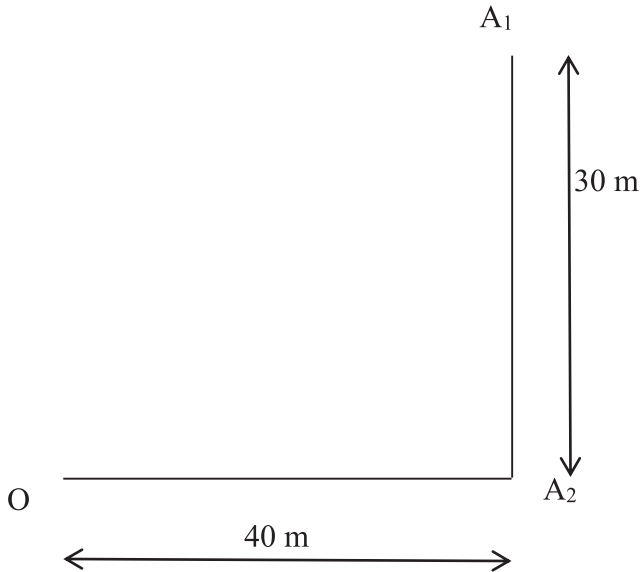
Materiais:

- ♦ Platina:  $E_{\text{mínima}} = 6,35 \text{ eV}$ ;
- ♦ Prata:  $E_{\text{mínima}} = 4,74 \text{ eV}$ ;
- ♦ Antimônio:  $E_{\text{mínima}} = 2,4 \text{ eV}$ ;
- ♦ Potássio:  $E_{\text{mínima}} = 2,20 \text{ eV}$ ;
- ♦ Césio:  $E_{\text{mínima}} = 1,90 \text{ eV}$ .

48. Qual o nível de menor energia do átomo de hidrogênio em que deve estar um elétron para que, ao saltar para o nível  $n = 2$ , emita um fóton que provoque o efeito fotoelétrico em um material cuja função trabalho valha  $2,7 \text{ eV}$ ?
49. Uma linha do espectro de raios X do ouro tem comprimento de onda  $0,18 \text{ angstroms}$ . Determine a energia do estado estacionário inferior, sabendo que a energia do estado superior, cuja transição resulta na linha observada é  $-13,7 \text{ KeV}$ .
50. Mostre, em um diagrama de níveis de energia do hidrogênio, os números quânticos que correspondem a uma transição em que o fóton emitido tem o comprimento de onda  $120,6 \text{ nm}$ .
51. Suponha que um átomo de hidrogênio seja excitado de um estado com  $n = 1$  até um estado com  $n = 4$ .
- a) Calcule a energia que deve ser absorvida pelo átomo.
  - b) Calcule as diferentes energias dos fótons que podem ser emitidos se o átomo retornar ao estado  $n = 1$ .
  - c) Desenhe um diagrama desses níveis de energia.
  - d) Classifique os fótons identificados no item “b” como correspondentes à luz infravermelha, à luz visível ou à luz ultravioleta. Para tal, observe os seguintes dados relacionados ao espectro eletromagnético: luz infravermelha: de  $1 \text{ mm}$  a  $700 \text{ nm}$ ; luz visível: de  $700 \text{ nm}$  a  $400 \text{ nm}$ ; luz ultravioleta: de  $400 \text{ nm}$  a  $1 \text{ nm}$ .
52. De forma simplificada, o cálculo dos níveis quânticos de energia do átomo de hélio ionizado pode ser efetuado pela seguinte expressão:  $E_n = \frac{-54,4}{n^2}$ , onde  $n$  é o número quântico correspondente a cada nível energético, com  $n = 1$  correspondendo ao estado de menor energia, ou fundamental. Qual o nível de menor energia do átomo de hélio ionizado para que um elétron ao saltar para o nível  $n = 2$  emita um fóton que provoca o efeito fotoelétrico no tântalo de função trabalho  $4,2 \text{ eV}$ ?

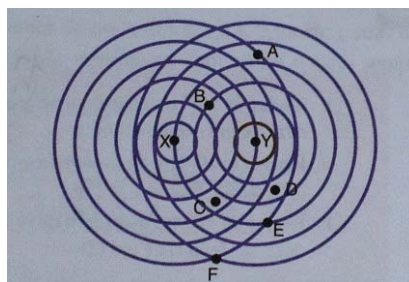
53. Nesta atividade, você poderá perceber as franjas claras e escuras formadas pela luz ao passar por pequenas fendas, de uma forma simples.
- Forme uma estreita fenda entre seus dedos e, através dela, olhe para a luz emitida por uma lâmpada: observe as franjas claras e escuras formadas pela luz que atravessa a fenda.
  - Use a criatividade para inventar outras maneiras de observar o efeito da difração e interferência das ondas, como olhar para uma lâmpada através do tecido de um guarda-chuva ou através de fendas formadas entre duas folhas de papel sulfite.
54. Um muro muito espesso e alto, sem orifícios, separa duas pessoas em uma região plana, sem outros obstáculos. As pessoas não se veem, mas, apesar do muro, se ouvem claramente.
- Explique por que elas podem se ouvir.
  - Explique por que elas não podem se ver.
55. No quadro a seguir, estão relacionadas três radiações (A,B,C), ondas eletromagnéticas que se propagam a uma velocidade de  $3 \times 10^8$  m/s e três tipos de fendas (I, II, III). Determine o valor do comprimento de onda de cada radiação e associe fendas e radiações para que o efeito da difração se dê com a maior intensidade possível.
- A: luz azul de frequência  $6 \times 10^{14}$  Hz  
 B: raios X de frequência  $6 \times 10^{19}$  Hz  
 C: raio  $\gamma$  (gama) de frequência  $6 \times 10^{22}$  Hz  
 I: fendas de  $10^{-15}$  m, da ordem de grandeza de um núcleo atômico.  
 II: fendas de  $10^{-10}$  m, da ordem de grandeza das fendas de um CD.  
 III: fendas de  $10^{-7}$  m, da ordem de grandeza das fendas de um CD.
56. Deseja-se observar o fenômeno de difração de ondas sonoras, de velocidade igual a 1.224 km/h, utilizando dois obstáculos, A e B, de largura respectivamente iguais a 20 cm e 10 m. Quais devem ser os valores das frequências das ondas que devem incidir em cada um desses obstáculos de forma que a difração seja verificada com a maior eficiência possível?
57. Na figura a seguir  $A_1$  e  $A_2$  representam duas fontes sonoras que emitem ondas com mesma frequência e em fase. No ponto O está localizado um observador. As ondas emitidas provocam 102.000 oscilações completas por minuto nas partículas do meio e

percorrem 17 km em 50 s. Com base nessas informações, determine se o observador escutará ou não algum som.

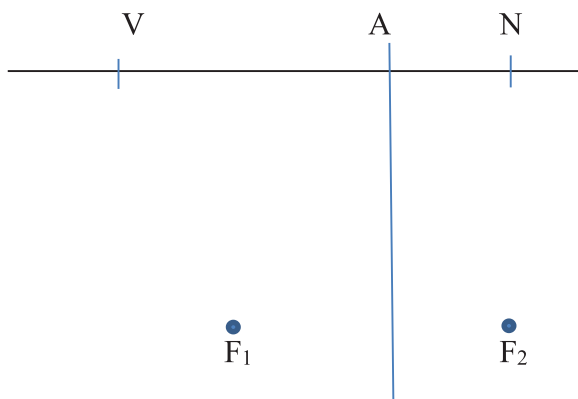


58. Na figura a seguir, as linhas circulares representam cristas sucessivas de duas ondas que se propagam na superfície de um tanque de água, originadas nos pontos X e Y. Supondo a inexistência de qualquer outra perturbação:
- Qual o tipo de interferência que ocorre em cada um dos seis pontos (A, B, C, D, E, F) e o que acontece com água em cada uma dessas posições?
  - Supondo que a velocidade de propagação dessas ondas seja de 8 cm/s e que suas frequências valham 4 Hz, quanto vale  $XA - YA$  (diferença entre as distâncias do ponto A até cada um dos centros X e Y)?

Faça o mesmo cálculo para todos os demais pontos, isto é,  $XB - YB$ ,  $XC - YC$  etc.



59. Duas fontes  $F_1$  e  $F_2$ , oscilam em fase na superfície da água contida em um tanque, com período de 5 milissegundos. O ponto A é equidistante das fontes. Observa-se que o ponto mais próximo do ponto A em que a superfície da água permanece em repouso, é o ponto N. Medindo-se  $NF_1$  e  $NF_2$ , encontra-se uma diferença de 2,5 cm entre duas distâncias. A situação, fora de escala, é esquematizada a seguir.



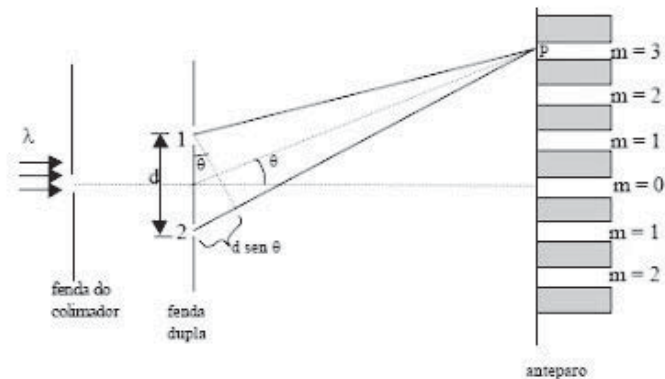
- Determine o valor do comprimento de onda das ondas na superfície da água.
  - Determine a velocidade das ondas na superfície da água.
  - Se V é o segundo ponto mais próximo à esquerda do ponto A, que se movimenta com amplitude máxima, calcule o valor de  $NF_2 - NF_1$ .
60. Faça sua própria análise espectral.

As faixas coloridas que se formam quando iluminamos um CD também são um efeito da difração e interferência da luz. A superfície de um CD não é lisa como a de um espelho plano comum; em cada milímetro de sua superfície existem cerca de 600 sulcos com larguras de mesma ordem que o comprimento de onda da luz visível. O CD opera normalmente em luz *laser*, coerente e de cor única. No entanto, quando uma luz composta atinge um CD, o efeito dos sulcos é de difratá-la e refleti-la. A luz composta, então, sofre interferência, resultante do encontro das diferentes ondas de luz refletidas pelos diversos sulcos. Isso leva à separação de cores da luz visível, que pode ser analisada para identificar a substância que emite luz. Por exemplo, é possível ver diferença do padrão de cores formado quando se ilumina um CD com luz natural do Sol, com luz de lâmpada de filamento incandescente de tungstênio ou com luz de lâmpada fluorescente. Assim, um CD pode ser utilizado como um “espectroscópio de rede”, com efeito semelhante ao das análises físico-químicas feitas em laboratório científico com outros equipamentos, como prismas. Para radiações de alta frequência, como os raios X, as fendas devem ser tão estreitas quanto o diâmetro atômico. Isso é conseguido com o uso de cristais, como o quartzo, que são formados por uma organização regular de átomos muito próximos entre si que fazem o papel dos sulcos da rede.

61. Coloque a face espelhada do CD sob a luz emitida por diversos tipos de lâmpada e, tomando cuidado quanto à intensidade da luz refletida em seus olhos, identifique os diferentes padrões de cores formados. Comece pelas lâmpadas encontradas facilmente em sua casa ou escola, como as incandescentes e fluorescentes, e, depois, amplie a experiência procurando por lâmpadas halógenas, muito utilizadas em decorações de ambiente por sua maior capacidade de focalização, ou pelas de vapores de mercúrio e de sódio, encontradas em potentes refletores e na iluminação de vias públicas.
62. Pesquise na Internet sobre a composição e o funcionamento de diferentes tipos de lâmpadas, (como a lâmpada incandescente, por exemplo, que emite luz a partir do aquecimento do filamento de tungstênio) e, com base, nos dados encontrados, procure

estabelecer relações entre os padrões de cores identificados no CD e os materiais que emitem luz em cada lâmpada.

63. Melhore a precisão de sua análise espectral, utilizando o CD para montar um espectroscópio; pesquisando na Internet você poderá encontrar vários modelos de montagem; monte o seu e observe com maior nitidez o padrão de cores que caracteriza o espectro ótico de cada tipo de lâmpada.
64. Medida da espessura dos sulcos de um CD ou DVD. Experimentos de interferência com luz *laser* podem ser uteis para medir a espessura de fendas muito estreitas como as existentes em CDs e DVDs. Duas fendas, 1 e 2, separadas por um distancia  $d$ , permitem a propagação de ondas luminosas em fase e de mesmo comprimento de onda ( $\lambda$ ). Imagine que P seja o primeiro máximo de interferência acima de um ponto A, equidistantes das duas fendas. Se a distancia  $d$  for muito pequena, os segmentos de reta que ligam P a cada uma das fendas são praticamente paralelos e a diferença entre seus comprimentos pode ser dada pela medida de  $x$ , cateto oposto do triangulo retângulo de hipotenusa  $d$ . Assim, vale a relação  $x = d \text{ sen } \theta$ .

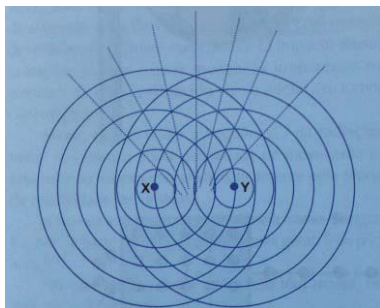


. Representação gráfica do experimento da dupla fenda.

Como em P ocorre a primeira interferência construtiva após o ponto central A, o valor de  $x$  deve corresponder a uma defasagem de um comprimento de onda,  $\lambda$ , portanto,  $d \text{ sen } \theta = \lambda$ . Conhecidos os valores de  $\lambda$  e  $\theta$ , determina-se o valor da distancia  $d$ . Com isso em mente, junte-se a um ou mais colegas e realize as seguintes atividades:

- a) Em uma sala escura, execute a montagem sugerida na figura, apontando a luz vermelha de uma caneta *laser* para um CD na direção perpendicular à sua superfície espelhada, de forma a enxergar na parede os pontos luminosos P e P', formados pela interferência da luz refletida na CD.
  - b) Em seguida, enquanto você, com o uso de prendedores de varais ou outros instrumentos, mantém o CD fixo na posição correta, um de seus colegas deve fazer as medidas das distâncias do CD até a parede (y) e do ponto luminoso central até o próximo ponto luminoso (h), de forma a descobrir o valor do seno daquele ângulo  $\theta$  apontando na figura anterior. Se você conhecer o valor do comprimento de onda da luz *laser* utilizada (geralmente inscrita no corpo da caneta), utilizando a expressão  $d \sin \theta = \lambda$ , poderá encontrar o valor de  $d$ , que, neste caso, é a distância entre os sulcos do CD.
  - c) Você pode certificar-se da precisão de suas medidas e cálculos utilizando o valor encontrado no item anterior. Por meio de uma regra de três, descubra quanto sulcos existem em cada milímetro, sua experiência e cálculos foram bem sucedidos; caso contrário, refaça a atividade.
  - d) Realize o procedimento descrito, mas agora com um DVD e descubra porque ele pode armazenar um número bem maior de dados do que um CD.
65. Considere o procedimento experimental sugerido na *Faça Parte – Medidas da espessura dos sulcos de um CD ou DVD*. Em cada um dos itens a seguir descreve-se uma modificação nesse procedimento. Analise se tais modificações provocariam ou não aumento ou diminuição das distâncias observadas entre os pontos luminosos projetados na parede.
- a) Utilização de luz azul em vez de luz vermelha.
  - b) Posicionamento do CD a uma maior distância da parede.
  - c) Substituição do CD por um fio de cabelo (com a luz *laser* direcionada para a parede, já que não se trataria mais de uma rede de difração por reflexão).
66. As linhas circulares na figura a seguir representam cristas sucessivas de duas ondas que se propagam na superfície de um tanque de água, originadas nos pontos X e Y.





Supondo a inexistência de qualquer outra perturbação:

- a) De acordo com o estudo feito neste texto sobre difração e interferência, o que devem representar as linhas tracejadas na figura?
  - b) Se X e Y começarem a se afastar um do outro, o que acontecerá com essas linhas?
  - c) Se a frequência das ondas emitidas por X e Y diminuir, o que acontecerá com essas linhas.
67. Da mesma forma que ocorre ao passar por um prisma, a luz branca se decompõe em faixas coloridas ao passar por uma rede de difração.

Suponha que um feixe de luz branca atravessa uma rede de difração de 5.000 linhas por centímetro. Determine os ângulos (ou o valor de seus senos) correspondentes à primeira faixa brilhante para os seguintes comprimentos de onda:

- ◆ Luz violeta:  $f = 7,5 \times 10^{14}$  Hz
- ◆ Luz verde:  $f = 6,0 \times 10^{14}$  Hz
- ◆ Luz amarela:  $f = 5,0 \times 10^{14}$  Hz
- ◆ Luz vermelha:  $f = 4,0 \times 10^{14}$  Hz

Dado: velocidade de luz =  $3 \times 10^8$  m/s.

68. (ITA) Um trecho da música *Quanta*, de Gilberto Gil, é reproduzido a seguir:

*Fragmento infinitésimo  
 Quase que apenas mental,  
 Quantum granulado no mel,  
 Quantum ondulado do sal,  
 Mel de urânio, sal de rádio,  
 Qualquer coisa quase ideal.*

As Frases “*Quantum granulado no mel*” e “*Quantum ondulado do sal*” relacionam-se, na física, com:

- a) Conservação de energia.
  - b) Conservação da quantidade de movimento.
  - c) Dualidade partícula-onda.
  - d) Princípio da causalidade.
  - e) Conservação do momento angular.
69. (Unicamp) A Física de Partículas nasceu com a descoberta do elétron, em 1897. Em seguida foram descobertos o próton, o nêutron e várias outras partículas, dentre elas o pión, em 1947, com a participação do brasileiro César Lattes.
- a) Em um experimento similar ao que levou à descoberta de nêutron, em 1932, um nêutron de massa  $m$  desconhecida e velocidade  $v_0 = 4 \times 10^7$  m/s colide frontalmente com um átomo de nitrogênio de massa  $M = 14$  u (unidade de massa atômica) que se encontra em repouso. Após a colisão, o nêutron retorna com velocidade  $v'$  e o átomo de nitrogênio adquire uma velocidade  $v = 5 \times 10^6$  m/s. Em consequência da conservação da energia cinética, a velocidade de afastamento das partículas é igual à velocidade de aproximação. Qual é a massa  $m$ , em unidades de massa atômica, encontrada para o nêutron no experimento?
  - b) O Grande Colisor de Hádrons é um acelerador de partículas que tem, entre outros propósitos, o de detectar uma partícula, prevista teoricamente, chamada de bóson de Higgs. Para esse fim, um próton com energia de  $E = 7 \times 10^{12}$  eV colide frontalmente com outro próton de mesma energia produzindo muitas partículas. O comprimento de onda ( $\lambda$ ) de uma partícula fornece o tamanho típico que pode ser observado quando a partícula interage com outra. No caso dos prótons do LHC,  $E = hc/\lambda$ , onde  $h = 4 \times 10^{-15}$  eV.s, e  $c = 3 \times 10^8$  m/s. Qual é o comprimento de onda dos prótons do LHC?
70. Um satélite artificial, ou uma astronave, em órbita terrestre, pode ficar eletricamente carregado, em virtude da perda de elétrons por efeito fotoelétrico, provocado pelos raios solares na sua superfície externa. Suponha que um satélite esteja revestido por platina, metal que tem 6,35 eV com função trabalho.

- a) Determine o maior comprimento de onda do fóton capaz de ejetar elétrons de platina.
- b) Determine a quantidade de movimento desse fóton.
- c) Que velocidade deve ter um elétron para possuir a quantidade de movimento calculada no item anterior?
71. Quer-se provocar o efeito fotoelétrico em um material de função trabalho igual a  $E_{\min} = 1,5 \text{ eV}$ .
- a) Qual a menor frequência que um fóton poderia ter para provocar o efeito?
- b) Suponha que esse fóton tenha sido emitido pelo salto de um elétron no átomo de hidrogênio desde certo nível  $n'$  até o nível  $n = 2$ . Qual o menor valor de  $n'$  para que o fóton emitido provoque o efeito fotoelétrico nesse material?
- c) Qual a quantidade de movimento do fóton correspondente a esse salto?
72. A difração de uma partícula somente é detectada quando seu comprimento de onda tem a mesma ordem de grandeza que o comprimento da fenda na qual incide. Sabendo disso, determine:
- a) A quantidade de movimento associada a um comprimento de onda de  $10^{-10} \text{ m}$ .
- b) A velocidade que deve estar uma partícula alfa de massa  $6,645 \times 10^{-27} \text{ kg}$  para que sua difração seja percebida em uma experiência com cristais formados por átomos distanciados entre si de  $10^{-10} \text{ m}$ .
73. O esquema a seguir apresenta valores de frequência ( $f$ ) e comprimento de onda ( $\lambda$ ) de ondas componentes de trecho visível de espectro eletromagnético.



- a) A partir de valores apresentados nesse esquema, demonstre que a velocidade da luz é de  $3 \times 10^8$  m/s.
- b) Determine os valores das energias, das frequências e dos comprimentos de onda dos fótons correspondentes às radiações associadas às letras x, y, z e w.
74. (Faci) Durante a Segunda Guerra Mundial, investigações realizadas pelo Físico Arthur Compton contribuíram para o estabelecimento dos primeiros reatores para fissão controlada de urânio e para a larga produção de plutônio que acabou por ser usada na bomba lançada sobre Nagasaki. Compton ficou famoso pelo efeito que leva seu nome, o qual foi uma conclusiva evidência do caráter corpuscular da radiação eletromagnética. Considere um *quantum* de luz (fóton) – ao qual está associado um comprimento de onda  $L_1$  – que, ao colidir com um elétron, transfere a ele parte de sua energia. Após a colisão o comprimento de onda associado ao fóton torna-se  $L_2$ , sendo que  $L_2 - L_1 = L_0 (1 - \cos(A))$ , onde  $A$  é o ângulo de espalhamento do fóton e  $L_0 = 0,0242$  angstrom. Identifique a opção que melhor expressa a energia do fóton espalhado após a colisão:
- a)  $hc/(L_1 + L_0(1 - \cos(A)))$
- b)  $hc/(L_2 - L_0(1 - \cos(A)))$
- c)  $hc/(L_0(1 - \cos(A)))$
- d)  $hc/L_1$
- e)  $hc/L_0$

## 17 ANEXO F

### Descrição das tarefas dos exercícios – Livro Didático 5

Exercício 1: tarefa sobre a radiação térmica, cálculos da temperatura de corpo negro (Sol) ( $t_1$ ) e da frequência ( $t_2$ ).

Exercício 2: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculos da função trabalho ( $t_3$ ), energia cinética ( $t_4$ ) e velocidade do elétron ( $t_5$ ).

Exercício 3: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculos da função trabalho ( $t_6$ ) e constante de Planck ( $t_7$ ).

Exercício 4: tarefa sobre a radiação eletromagnética, explicação da Teoria de Maxwell para produção de raios X ( $t_8$ ).

Exercício 5: tarefa sobre a radiação térmica, cálculo da temperatura do filamento de uma lâmpada incandescente ( $t_9$ ).

Exercício 6: tarefa sobre a radiação térmica, cálculo do comprimento de onda ( $t_{10}$ ).

Exercício 7: tarefa sobre a radiação térmica, cálculo da frequência da radiação ( $t_{11}$ ).

Exercício 8: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculos da energia de dois do fóton diferentes. ( $t_{12}$ ) e ( $t_{13}$ ).

Exercício 9: tarefa sobre a radiação térmica, cálculo do número de fótons irradiados de uma lâmpada ( $t_{14}$ ).

Exercício 10: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, explicação sobre o efeito ( $t_{15}$ ).

Exercício 11: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da frequência do fóton ( $t_{16}$ ).

Exercício 12: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculos da constante de Planck ( $t_{17}$ ) e da função trabalho ( $t_{18}$ ).

Exercício 13: tarefa sobre o modelo atômico, cálculos de energia de seis transições eletrônicas ( $t_{19}$ ), ( $t_{20}$ ), ( $t_{21}$ ), ( $t_{22}$ ), ( $t_{23}$ ), ( $t_{24}$ ); interpretação acerca da absorção de energia ( $t_{25}$ ) e cálculos da frequência mínima ( $t_{26}$ ) e da energia de excitação ( $t_{27}$ ).

Exercício 14: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo da energia de dois estados atômicos ( $t_{28}$ ) e ( $t_{29}$ ); e explicação sobre efeito de absorção ( $t_{30}$ ).

Exercício 15: tarefa sobre o modelo atômico, explicação sobre absorção eletrônicas no átomo ( $t_{31}$ ), e duas tarefas sobre a relação do comprimento de onda e energia ( $t_{32}$ ) e ( $t_{33}$ ).

Exercício 16: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo da frequência de um fóton emitido em transição eletrônica ( $t_{34}$ ).

Exercício 17: tarefa sobre o modelo atômico, explicações sobre a frequência ( $t_{35}$ ) e as transições eletrônicas ( $t_{36}$ ).

Exercício 18: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo do comprimento de onda de dois fótons emitidos em transições eletrônicas ( $t_{37}$ ) e ( $t_{38}$ ).

Exercício 19: tarefa sobre a radiação térmica, explicação sobre o espectro de uma vela ( $t_{39}$ ).

Exercício 20: tarefa sobre a radiação térmica, cálculos do comprimento de onda ( $t_{40}$ ) e da taxa de energia trocada de um corpo negro com o ambiente ( $t_{41}$ ).

Exercício 21: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, relato sobre um eletroscópio ( $t_{42}$ ) explicação sobre a absorção de fótons ( $t_{43}$ ) e emissão de elétrons ( $t_{44}$ ).

Exercício 22: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, explicação sobre o efeito ( $t_{45}$ ).

Exercício 23: tarefa sobre a radiação térmica, cálculos da energia ( $t_{46}$ ) e número de fótons emitidos pela Terra ( $t_{47}$ ).

Exercício 24: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculo da função trabalho ( $t_{48}$ ).

Exercício 25: tarefa sobre a radiação térmica, cálculo da Potência da radiação absorvida pela água ( $t_{49}$ ).

Exercício 26: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, explicação sobre circuito LDR ( $t_{50}$ ).

Exercício 27: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, cálculos da função trabalho ( $t_{51}$ ) e potencial de corte ( $t_{52}$ ).

Exercício 28: tarefa sobre o modelo atômico, cálculos de três frequências específicas ( $t_{53}$ ), ( $t_{54}$ ) e ( $t_{55}$ ), e interpretação sobre a absorção atômica ( $t_{56}$ ).

Exercício 29: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo da diferença de energia entre níveis ( $t_{57}$ ).

Exercício 30: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo da energia de dois fótons específicos ( $t_{58}$ ) e ( $t_{59}$ ).

Exercício 31: tarefa sobre o modelo atômico, cálculo dos níveis de energia após absorção ( $t_{60}$ ).

Exercício 32: tarefa sobre a radiação térmica, cálculo da idade do Universo ( $t_{61}$ ).

Exercício 33: tarefa sobre a radiação térmica, cálculo da frequência da radiação térmica de fundo ( $t_{62}$ ) e interpretação em relação ao espectro ( $t_{63}$ ).

Exercício 34: tarefa sobre a radiação térmica, explicações sobre o espectro solar e a visão humana ( $t_{64}$ ).

Exercício 35: tarefa sobre a radiação térmica, explicação sobre a radiação que atinge a Terra ( $t_{65}$ ).

Exercício 36: tarefa sobre a radiação térmica, explicação sobre a temperatura do espaço ( $t_{66}$ ) e sua medição ( $t_{67}$ ).

Exercício 37: tarefa sobre o modelo atômico, explicação sobre emissão de laser ( $t_{68}$ ).

Exercício 38: tarefa sobre o efeito fotoelétrico, explicação sobre o efeito ( $t_{69}$ ).

Exercício 39: tarefa sobre a dualidade, cálculo do comprimento de onda de De Broglie ( $t_{70}$ ).

Exercício 40: tarefa sobre a radiação térmica, explicação sobre o tubo de imagem de TV ( $t_{71}$ ).

Exercício 41: tarefa sobre o modelo atômico, explicação sobre a estabilidade atômica ( $t_{72}$ ) e demonstração da equação para os orbitais ( $t_{73}$ ).

Exercício 42: tarefa sobre o efeito Compton, explicação sobre o efeito ( $t_{74}$ ).

Exercício 43: tarefa sobre o modelo atômico, explicação sobre emissão e absorção ( $t_{75}$ ).

### **Exercícios do Livro Didático 5 sobre a Teoria Quântica. – Transcritos na íntegra**

1. A potência total irradiada pelo Sol ( $P_{ot}$ ) é aproximadamente igual a  $3,8 \times 10^{26}$  W, e seu raio ( $R$ ) mede cerca de  $7,0 \times 10^8$  m. Adote ainda as seguintes aproximações:

$$\sigma = 5,7 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \text{ (constante de Stefan-Boltzmann)}$$

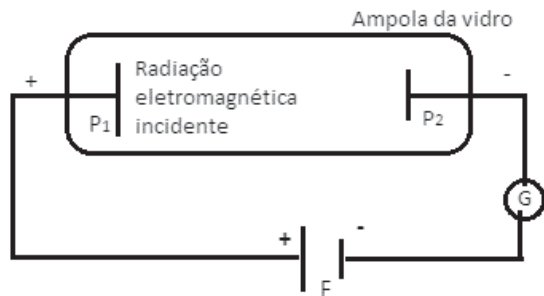
$$\pi = 3,14$$

$$b = 2,9 \times 10^{-3} \text{ mK (constante da Lei de Wien)}$$

$$c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s (velocidade da luz no vácuo)}$$

- a) Estime a temperatura na superfície do Sol, considerando-a um corpo negro (emissividade  $e$  igual a 1)
- b) Estime a frequência da radiação solar emitida com a máxima intensidade.

2. A frequência mínima que uma radiação precisa ter para extrair elétrons de uma placa de tungstênio é igual a  $1,1 \times 10^{15}$  Hz. Sendo  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s a constante de Planck,  $c = 3,0 \times 10^8$  m/s a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo, e  $m = 9,1 \times 10^{-31}$  kg a massa do elétron, calcule:
- A função trabalho para o tungstênio, em joule e em elétron-volts;
  - A energia cinética máxima e a velocidade máxima dos elétrons emitidos pelo tungstênio, no vácuo, quando nele incide uma radiação de comprimento de onda igual a  $0,18 \mu\text{m}$ .
3. Na ilustração a seguir temos um capacitor de placas metálicas,  $P_1$  e  $P_2$ , planas e paralelas, situadas no vácuo. Esse capacitor esta em série com um galvanômetro  $G$  e com uma fonte  $F$  de tensão contínua e ajustável de  $0,0$  V a  $3,0$  V.

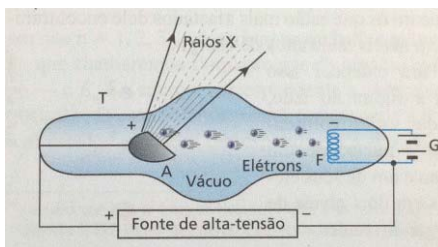


Com a fonte  $F$  ajustada em  $0,0$  V, irradiou-se a placa  $P_1$  com uma radiação eletromagnética de frequência  $f$ , e uma corrente elétrica foi detectada no galvanômetro. Entretanto, aumentando gradualmente a força eletromotriz  $\varepsilon$  da fonte, observou-se que a corrente elétrica cessou quando  $\varepsilon$  atingiu um valor  $V_0$ , denominado potencial de corte. Para radiações de frequência iguais a  $5,5 \times 10^{14}$  Hz e  $7,0 \times 10^{14}$  Hz, os valores de  $V_0$ , para o metal da placa  $P_1$ , são iguais a  $0,4$  V e  $1,0$  V, respectivamente. Com base nessas informações e considerando a carga elétrica elementar  $e = 1,6 \times 10^{-19}$  C, determine:

- A constante de Planck ( $h$ );
  - A função trabalho ( $W$ ) do metal da placa  $P_1$ .
4. Raios X são radiações eletromagnéticas cujos comprimentos de onda, no vácuo, podem variar de  $10^{-9}$  m a  $10^{-11}$  m, ou seja, de  $10$



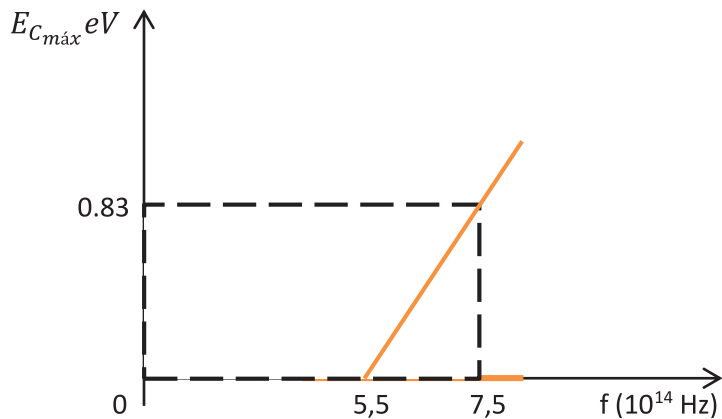
À a 0,1 Å. A figura representa um equipamento para a produção de raios X, em que  $T$  é um tubo de vidro,  $G$  um gerador que aquece o filamento de tungstênio  $F$  (cátodo) e  $A$  um alvo metálico que também pode ser de tungstênio. O filamento aquecido libera elétrons (efeito termiônico), que são acelerados pela fonte de alta-tensão e, em seguida, bombardeiam o alvo  $A$ , ocorrendo aí a produção de raios X. Do ponto de vista da Teoria de Maxwell, como se explica essa produção?



5. Faça uma estimativa da temperatura do filamento de uma lâmpada incandescente, supondo que:
  - ♣ A potência total irradiada seja  $P_{\text{ot}} = 60 \text{ W}$ ;
  - ♣ A emissividade do filamento seja  $e = 0,30$ ;
  - ♣ O filamento seja um fio cilíndrico de comprimento  $l = 20 \text{ cm}$  e seção transversal de raio  $r = 50 \mu\text{m}$ .
  - ♣ (Constante de Stefan-Boltzmann:  $\sigma = 5,7 \times 10^{-8} \text{ (SI)}$ ).
6. A radiação cósmica de fundo detectada atualmente no espaço é, segundo a teoria do *big-bang*, a radiação de corpo negro emitida naquela grande explosão, “esfriada” ao longo do tempo em virtude da expansão do Universo. Hoje a temperatura, associada a essa radiação pela lei de Wien, é de 2,7 K. Na lei de Wien ( $\lambda_{l_{\text{máx}}} = \frac{b}{T}$ ), considere a constante  $b$  igual a  $2,9 \times 10^{-3} \text{ mK}$  e calcule o comprimento de onda correspondente ao pico de intensidade de radiação cósmica de fundo. Verifique que esse pico está na faixa das micro-ondas, conforme medidas obtidas pelo satélite Cobe (*Cosmic Background Explorer*), em 1989, e outras obtidas desde 1965. Informação adicional: as micro-ondas são radiações eletromagnéticas com comprimento de onda entre 1 mm e 30 cm, aproximadamente.

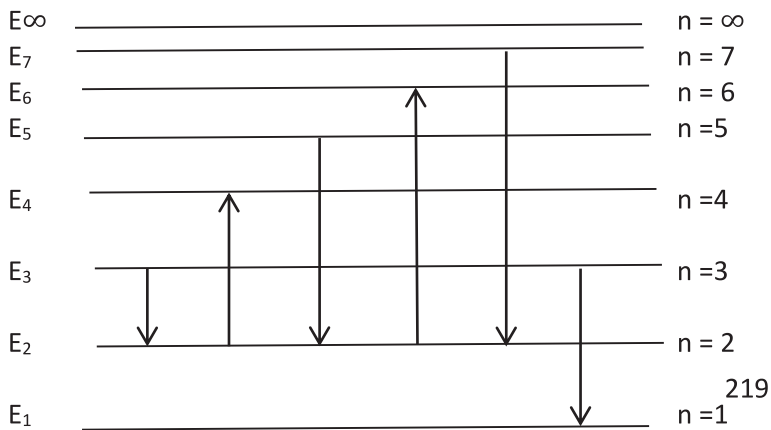
7. Suponha que a pele de uma pessoa esteja na temperatura de 35 °C. Calcule a frequência da radiação mais intensa emitida pela pele. Use a constante de Wien =  $2,9 \times 10^{-3}$  mK e velocidade de luz =  $3,0 \times 10^8$  m/s.
8. Considere a constante de Planck igual a  $6,6 \times 10^{-34}$  J s, calcule, em joules, a energia do fóton:
  - a) De luz violeta de frequência igual a  $7,7 \times 10^{14}$  Hz;
  - b) De radiação  $\gamma$  de frequência igual a  $5,0 \times 10^{21}$  Hz (essa radiação é emitida por núcleos instáveis de átomos radioativos, quando se desintegram).
9. A potência luminosa (Pot) irradiada por uma lâmpada que emite, no ar, luz de comprimento de onda ( $\lambda$ ) igual a 5500 Å é igual a 40 W. Determine o número de fótons emitidos por uma lâmpada durante 1,0 minutos. Dados: velocidade de luz =  $3,0 \times 10^8$  m/s, constante de Planck igual a  $6,63 \times 10^{-34}$  J s.
10. Com relação ao efeito fotoelétrico, julgue as seguintes afirmações:
  - 01 A ocorrência desse efeito da frequência, e não da intensidade da radiação utilizada.
  - 02 É possível que esse efeito ocorra com a luz azul fraca e não ocorra com a luz vermelha intensa.
  - 04 A velocidade com que um elétron é ejetado depende da frequência da radiação usada, mas não de sua intensidade.
  - 08 Suponha que o fenômeno ocorra em uma determinada região de uma placa metálica, o número de elétrons extraído depende de intensidade da luz utilizada.
  - 16 Para uma determinada radiação incidente, a velocidade dos elétrons ejetados depende do metal usado na experiência.
 Dê como resposta a soma dos números associados às afirmações corretas.
11. A mínima energia necessária para extrair um elétron de uma chapa de ferro é igual a 4,5 eV, Quando fótons de radiação ultravioleta incidem nessa chapa, a energia cinética máxima dos elétrons ejetados dela é igual a 1,5 eV. Determine a frequência dos fótons incidentes na chapa (Constante de Planck =  $6,63 \times 10^{-34}$  J s).
12. O gráfico a seguir fornece dados extraídos de um experimento em que se investigou o efeito fotoelétrico no metal sódio. Nesse

gráfico,  $E_{C_{máx}}$  é a energia cinética máxima dos fotoelétrons e  $f$  é a frequência da luz que incide no metal.

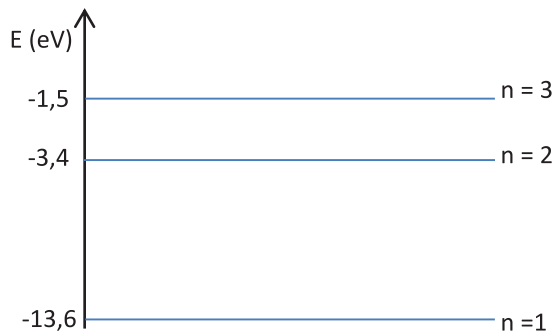


Com base nos valores indicados no gráfico:

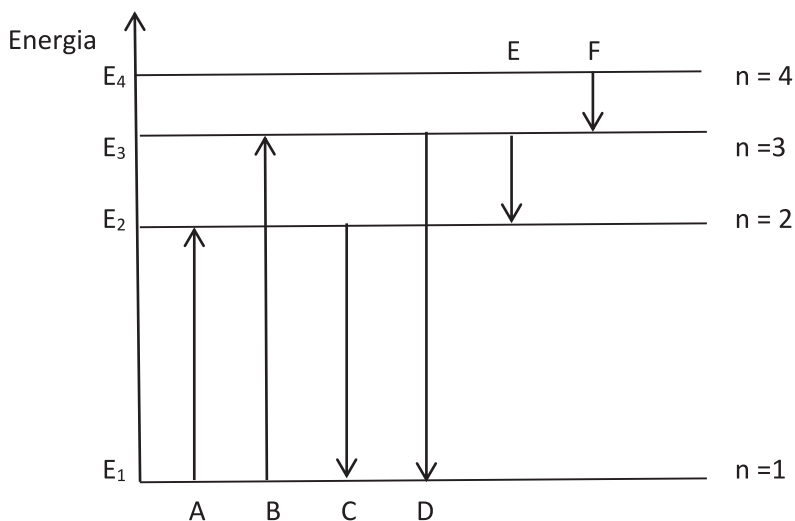
- Calcule a constante de Planck, em unidades do SI;
  - Calcule a função trabalho do sódio, em eV.
13. O esquema a seguir representa algumas das possíveis transições do átomo de hidrogênio. Nesse esquema,  $n = \infty$  significa que o elétron foi removido do átomo, ou seja, o átomo está ionizado. Dado: Constante de Planck =  $6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ .



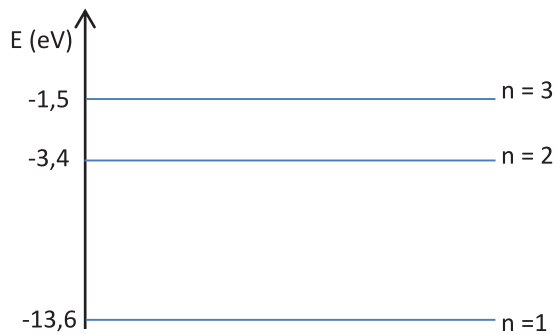
- a) Calcule, em elétron-volt, a energia  $E_n$  associada a cada nível quântico  $n$ , indicado no esquema.
- b) Observe os sentidos das transições indicadas e determine quais indicam que o elétron absorve energia.
- c) Considerando as transições indicadas, calcule a menor frequência que uma radiação emitida pelo átomo pode ter.
- d) Estando o elétron no estado fundamental, calcule a mínima energia necessária para ionizar o átomo.
14. A figura a seguir representa os níveis de energia  $E$  para o estado fundamental ( $n = 1$ ), para o primeiro estado excitado ( $n = 2$ ) e para o segundo estado excitado ( $n = 3$ ) do átomo de hidrogênio. Considere um átomo de hidrogênio no estado fundamental ( $n = 1$ ).
- a) Se o elétron desse átomo receber um fóton de energia igual a 12,1 eV, o átomo será excitado para qual estado?
- b) Repita o item *a* para o caso de o elétron receber um fóton de energia igual a 11,4 eV.
- c) Se o elétron do átomo de hidrogênio, ainda no estado fundamental, for atingido por outro elétron de energia cinética igual a 11,4 eV, que bombardeia o átomo, para que estado esse átomo será excitado?



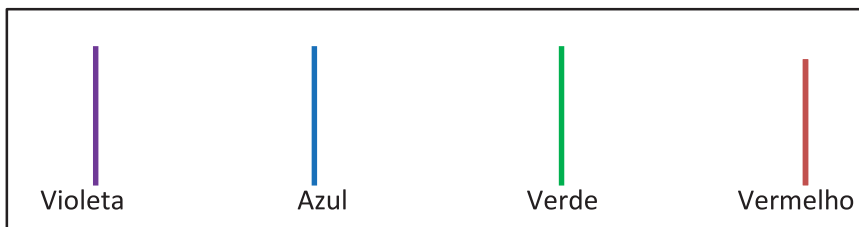
15. A figura a seguir representa algumas transições possíveis (*A*, *B*, *C*, *D*, *E* e *F*) de um elétron de determinado átomo quando ele absorve ou emite um fóton.



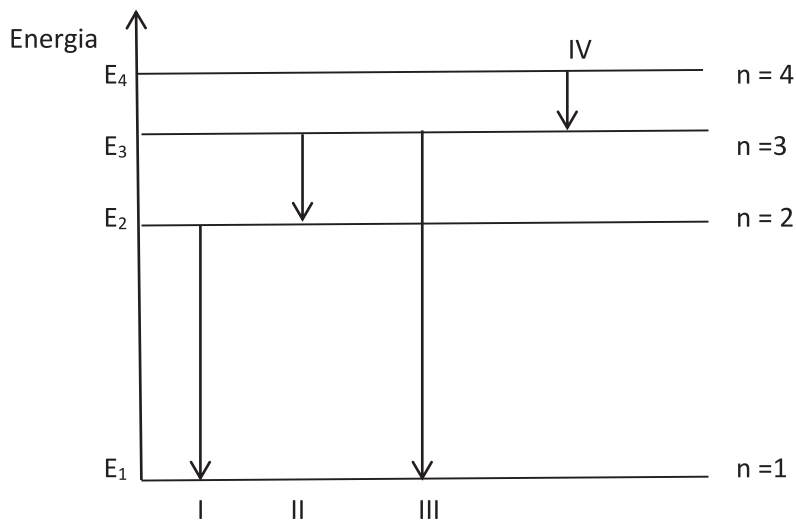
- Em quais das transições indicadas o elétron absorve energia?
  - Em qual dessas transições é absorvido um fóton de menor comprimento de onda?
  - Em qual das transições é emitido um fóton com o maior comprimento de onda?
16. O diagrama informa alguns níveis de energia ( $n$ ) para o elemento químico hidrogênio, no estado gasoso atômico. Qual é a frequência do fóton emitido em uma transição do segundo estado excitado para o estado fundamental? Use: constante de Planck ( $h$ ) =  $4,1 \times 10^{-15}$  eV.s.



17. Uma ampola de vidro contém um elemento químico no estado gasoso atômico. Quando esse gás é excitado ele emite luz, e em estreito feixe dessa luz atravessa um prisma ótico, decompondo-se em estreitos feixes cujas cores estão indicadas na figura A.



A figura B representa as transições (I, II, III e IV) responsáveis pela emissão dos feixes da figura A.

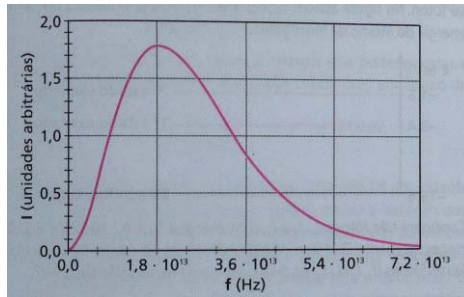


A cada cor representada na figura A associe a transição correspondente indicada na figura B.

18. Sejam  $n = 1$ ,  $n = 2$  e  $n = 3$  alguns dos níveis de energia em que um elétron de determinado átomo pode estar, correspondentes às

energias  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$ , respectivamente. Na transição de  $n = 3$  para  $n = 2$ , esse elétron emite um fóton de comprimento de onda igual a 570 nm. Dado que  $E_2 = 5E_1$  e  $E_3 = 7E_1$ , determine o comprimento de onda do fóton emitido pelo elétron na transição:

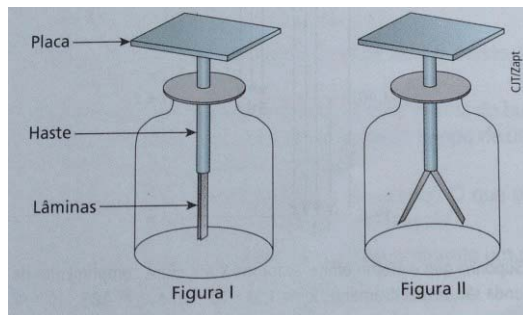
- a) De  $n = 3$  para  $n = 1$ .
  - b) De  $n = 2$  para  $n = 1$ .
19. De que tipo é o espectro da luz emitida pela chama de uma vela: contínuo ou de linhas?
  20. (Unicamp-SP) todos os corpos trocam energia com seu ambiente por meio da emissão e absorção de ondas eletromagnéticas em todas as frequências. Um corpo negro é um corpo que absorve toda onda eletromagnética nele incidente, e também apresenta a máxima eficiência de emissão. A intensidade das ondas emitidas por um corpo negro só depende da temperatura desse corpo. O corpo humano à temperatura normal de 37 graus celsius pode ser considerado como um corpo negro. Considere que a velocidade das ondas eletromagnéticas é igual a  $3,0 \times 10^8$  m/s.



- a) A figura acima mostra a intensidade das ondas eletromagnéticas emitidas por um corpo negro de 37 °C em função da frequência. Qual é o comprimento de onda correspondente à frequência para a qual a intensidade é máxima?
- b) Se um corpo negro cuja temperatura absoluta é  $T$  se encontra em um ambiente cuja temperatura absoluta é  $T_a$ , a potência líquida que ele perde por emissão e absorção de ondas eletromagnéticas é dada por  $P = \sigma A(T^4 - T_a^4)$ , em que  $A$  é

a área da superfície de corpo e  $\sigma = 6 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ . Usando como referência uma pessoa com 1,70 m de altura e 70 kg de massa, faça uma estimativa da área da superfície do corpo humano. A partir da área estimada, calcule a perda total diária de energia por emissão e absorção de ondas eletromagnéticas por essa pessoa se ela se encontra num ambiente a 27 °C. Aproxime a duração de 1 dia por  $9,0 \times 10^4$  s.

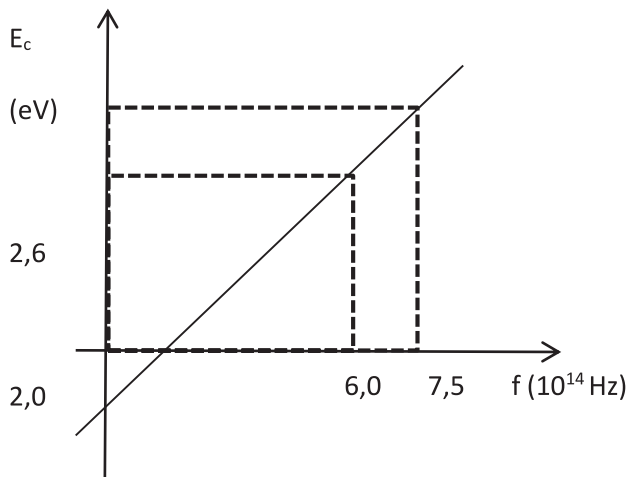
21. (UFMG) O eletroscópio é um aparelho utilizado para detectar cargas elétricas. Ele é constituído de uma placa metálica, que é ligada a duas lâminas metálicas por uma haste condutora elétrica. As duas lâminas podem se movimentar, afastando-se ou aproximando-se uma da outra. A figura I mostra um eletroscópio eletricamente descarregado e a figura II, o mesmo eletroscópio carregado.



1. Explique por que as lâminas de um eletroscópio se separam quando ele está carregado.
  2. Considere ele eletroscópio inicialmente descarregado, explique:
    - a) Por que as laminas se afastam quando luz branca incide sobre a placa.
    - b) Por que as laminas não se movem quando luz monocromática vermelha incide sobre a placa.
22. (UFSC) Indique as afirmativas corretas e some os valores respectivos para dar a resposta. Com relação ao efeito fotoelétrico, é correto afirmar que:



01. Em uma célula fotoelétrica, a velocidade dos fotoelétrons emitidos aumenta quando diminuimos o comprimento de onda da radiação luminosa utilizada para provocar o fenômeno.
02. Em uma célula fotoelétrica, a velocidade dos fotoelétrons emitidos aumenta quando aumentamos o comprimento de onda da radiação luminosa utilizada para provocar o fenômeno.
04. Em uma célula fotoelétrica, a velocidade dos fotoelétrons emitidos será maior se utilizamos, para provocar o fenômeno, luz vermelha forte, em vez de luz violeta fraca.
08. Em uma célula fotoelétrica, a energia cinética dos elétrons arrancados da superfície do metal depende da frequência da luz incidente.
16. Em uma célula fotoelétrica, a energia cinética dos elétrons arrancados da superfície do metal depende da intensidade da luz incidente.
32. A emissão de fotoelétrons por uma placa fotossensível só pode ocorrer quando a luz incidente tem comprimento de onda igual ou menor que certo comprimento de onda crítico e característico para cada metal.
23. (UFPA) Por meio de ondas eletromagnéticas a Terra recebe radiação solar a uma taxa de 2,0 cal/min para cada  $\text{cm}^2$  de sua superfície. Admitindo para essas ondas eletromagnéticas um comprimento de onda médio 5800 Å, calcule em elétron-volt a energia correspondente a um fóton dessa radiação e também o número de fótons por minuto que atinge uma área de  $1 \text{ cm}^2$  sobre a Terra. Adote: Constante de Planck =  $6,6 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ,  $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$  e  $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ .
24. (UFC-CE) O gráfico mostrado abaixo resultou de uma experiência na qual a superfície metálica de uma célula fotoelétrica foi iluminada, separadamente, por duas fontes de luz monocromática distintas, de frequência  $f_1 = 6,0 \times 10^{14} \text{ Hz}$  e  $f_2 = 7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ , respectivamente.



As energias cinéticas máximas,  $E_{C_1} = 2,0$  eV e  $E_{C_2} = 2,6$  eV, dos elétrons arrancados do metal, pelos dois tipos de luz, estão indicadas no gráfico. A reta que passa pelos dois pontos experimentais do gráfico obedece à relação estabelecida por Einstein para o efeito fotoelétrico, ou seja,  $E_C = hf - \tau$ , em que  $h$  é a constante de Planck e  $\tau$  é a chamada função trabalho, característica de cada material. Baseando-se na relação de Einstein o valor calculado de  $\tau$  em eV é

- a) 0,4    b) 1,6    c) 1,8    d) 2,0    e) 2,3
25. Uma gota de água de volume igual a 0,20 mL é aquecida no ar, por radiação de comprimento de onda igual a 7500 Å, absorvendo  $1,0 \times 10^{18}$  fótons por segundo. Calcule o intervalo de tempo necessário para que a temperatura dessa gota sofra uma elevação de 1,0 K (1,0 °C). Dados: calor específico da água =  $4,2 \times 10^3$  J/kg K; densidade da água =  $1,0 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>; constante de Planck =  $6,63 \times 10^{-34}$  J s; e  $c = 3,0 \times 10^8$  m/s.
26. (ITA-SP) Certos resistores quando expostos à luz variam sua resistência. Tais resistores são chamados LDR. Considere um típico resistor LDR feito de sulfeto de cádmio, o qual adquire uma resistência de aproximadamente 100 Ω quando exposto à luz intensa, e de 1 MΩ quando na mais completa escuridão. Utilizando esse LDR e um resistor de resistência fixo  $R$  para construir um divisor de tensão, como mostrado na figura, é

possível converter a variação da resistência em variação de tensão sobre o LDR, com o objetivo de operar o circuito como um interruptor de corrente. Para esse fim, deseja-se que a tensão através do LDR, quando iluminado, seja muito pequena comparativamente à tensão fornecida, e que seja de valor muito próxima ao desta, no caso do LDR não iluminado. Qual dos valores de  $R$  abaixo é mais conveniente para que isso ocorrer?

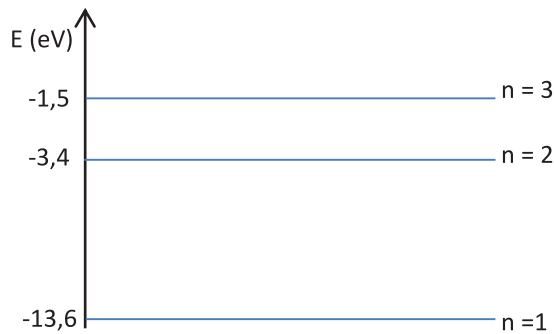


- a)  $100 \Omega$       b)  $1 \text{ M}\Omega$       c)  $10 \text{ k}\Omega$       d)  $10 \text{ M}\Omega$   
 e)  $10 \Omega$

27. (UFRN) Uma das aplicações do efeito fotoelétrico é o visor noturno, aparelho de visão sensível à radiação infravermelha. Um aparelho desse tipo foi utilizado por membro das forças especiais norte-americanas para observar supostos integrantes da rede al-Qaeda. Nesse tipo de equipamento, a radiação infravermelha atinge suas lentes e é direcionada para uma placa de vidro revestida de material de baixa função de trabalho ( $W$ ). Os elétrons arrancados desse material são “transformados”, eletronicamente, em imagens. A teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico estabelece que:  $E_c = hf - W$ . Sendo:  $E_c$  a energia cinética máxima de um fotoelétron;  $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J s}$  a constante de Planck;  $f$  a frequência da radiação incidente. Considere que um visor noturno recebe radiação de frequência  $f = 2,4 \times 10^{14} \text{ Hz}$  e que os elétrons mais rápidos ejetados do material têm energia cinética  $E_c = 0,90 \text{ eV}$ . Sabe-se que a carga do elétron é  $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ eV}$  e  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ . Baseando-se nessas informações, calcule:

- a) A função trabalho ( $W$ ) do material utilizado para revestir a placa de vidro desse visor noturno, em eV;

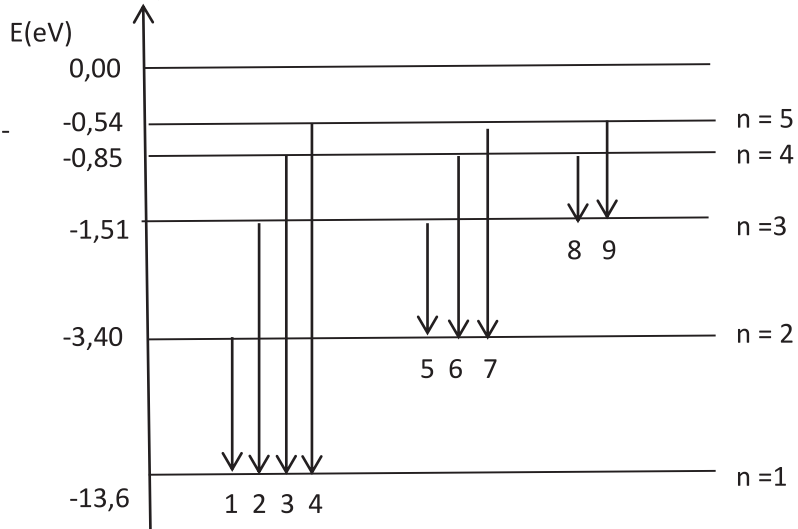
- b) O potencial de corte ( $V_0$ ) desse material para a frequência ( $f$ ) da radiação incidente.
28. (Olimpíada Paulista de Física) Um elétron de um átomo de hidrogênio, ao passar de um estado quântico para outro, emite ou absorve fóton. Na figura abaixo, representamos os três primeiros níveis de energia do átomo de hidrogênio. Considere três fótons,  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$ , com energias 12,1 eV, 10,2 eV e 8,5 eV, respectivamente. O átomo de hidrogênio está no estado fundamental. Quais fótons ( $f_1$ ,  $f_2$  ou  $f_3$ ) poderá o átomo de hidrogênio absorver?



29. (UFG-GO) A cor amarela característica das lâmpadas de vapor de sódio tem comprimento de onda de 590 nm e é o resultado de transições eletrônicas do subnível 3 p para o subnível 3 s do átomo de sódio. Calcule, em elétron-volts, a diferença de energia entre esses subníveis. Dados: velocidade da luz = 300 000 km/s; constante de Planck =  $4,1 \times 10^{-15}$  eV.s.
30. (UFC-CE) Na figura a seguir, as fechas numeradas de 1 até 9 representam transições possíveis de ocorrer entre alguns níveis de energia do átomo de hidrogênio, de acordo com o modelo de Bohr. Para ocorrer uma transição, o átomo emite (ou absorve) um fóton cuja energia  $\frac{hc}{\lambda}$  é igual a  $|\Delta E|$  ( $h$  é a constante de Planck,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $\lambda$  é o comprimento de onda do fóton e  $\Delta E$  é a diferença de energia entre os dois níveis envolvidos na transição). Suponha que o átomo emite os fótons X e Y, cujos comprimentos de onda são, respectivamente,  $\lambda_x =$

$1,03 \times 10^{-7} \text{ m}$  e  $\lambda_y = 4,85 \times 10^{-7} \text{ m}$ . As transições correspondentes associadas às emissões desses dois fótons são (use  $h = 4,13 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$  e  $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ).

- a)  $4 \text{ e } 8$                       b)  $2 \text{ e } 6$                       c)  $3 \text{ e } 9$                       d)  $5 \text{ e } 7$   
 e)  $1 \text{ e } 7$



31. (ITA-SP) A tabela abaixo mostra os níveis de energia de um átomo de elemento  $X$  que se encontra no estado gasoso. Dentro das possibilidades a seguir, a energia que poderia restar a um elétron com energia de  $15,0 \text{ eV}$ , após colidir com um átomo de  $X$ , seria de:

- a)  $0 \text{ eV}$                       b)  $4,4 \text{ eV}$                       c)  $16,0 \text{ eV}$                       d)  $2,0 \text{ eV}$   
 e)  $14,0 \text{ eV}$

$E_0$	0
$E_1$	$7,0 \text{ eV}$
$E_2$	$13,0 \text{ eV}$
$E_3$	$17,4 \text{ eV}$
Ionização	$21,4 \text{ eV}$

32. (UFC-CE) No modelo do *Universo em Expansão*, há um instante de tempo no passado em toda a matéria e toda radiação, que hoje constituem o Universo, estiveram espetacularmente concentrados, formando um estado termodinâmico de altíssima temperatura ( $T \rightarrow \infty$ ), conhecido como big-bang. De acordo com o físico russo G. Gamov, nesse estado inicial, a densidade de energia eletromagnética (radiação) teria sido muito superior à densidade de matéria. Em consequência disso, a temperatura média do Universo, ( $T$ ), em um instante de tempo  $t$  após o *big-bang* satisfaria a relação:

$$\langle T \rangle = \frac{2,1 \times 10^9}{\sqrt{t}}$$

sendo o tempo  $t$  medido em segundos e a temperatura  $T$ , em kelvins. Um ano equivale a  $3,2 \times 10^7$  segundos e atualmente a temperatura médio do Universo é  $\langle T \rangle = 3,0$  K. Assim, de acordo com Gamov, podemos afirmar corretamente que a idade aproximada do Universo é:

- 700 bilhões de anos.
  - 210 bilhões de anos.
  - 15 bilhões de anos.
  - 1 bilhão de anos.
  - 350 bilhões de anos.
33. (Vunesp-SP) Leia o texto: “A radiação cósmica de fundo (RCF) é um sinal eletromagnético, de origem cosmológica, que pode ser observado hoje em dia em todo o céu. É uma espécie de ruído que permeia todo Universo. Ela, portanto, atinge a Terra vinda de todas as direções e pode ser detectada, por exemplo, por um aparelho de TV: algo em torno de 3% do ruído eletromagnético recebido por um televisor deve-se a essa radiação.”

Radiação eletromagnética	Intervalo de frequência
Denominação	Frequência (Hz)
Baixas Frequências	50/60
Rádio, radar e TV	$10^4$ a $10^{11}$
Micro-ondas	$10^9$ a $10^{12}$

Infravermelho	$10^{11}$ a $4 \times 10^{14}$
Visível	$4 \times 10^{14}$ a $8 \times 10^{14}$
Ultravioleta	$8 \times 10^{14}$ a $10^{17}$
Raios X	$10^{15}$ a $10^{20}$
Raios gama	$10^{19}$ a $10^{24}$

(módulo da velocidade da luz no vácuo =  $3 \times 10^8$  m/s)

A tabela nos mostra as denominações das radiações eletromagnéticas para cada intervalo de frequência. Sabendo-se que o comprimento de onda ( $\lambda$ ) médio da radiação cósmica de fundo (RCF) é de  $10^{-3}$  m, pode-se afirmar, quando à detecção da RCF, que o texto:

- a) Está incorreto, porque a frequência da RCF está na faixa do ultravioleta e um aparelho de TV não capta esse intervalo de frequências.
  - b) Está incorreto, porque a RCF está no intervalo de frequência do raios X então pode ser captada por um aparelho de TV.
  - c) Está incorreto, porque o aparelho de TV não capta radiação na faixa do infravermelho, e a RCF está nessa faixa.
  - d) Está correto, porque a RCF está na faixa de frequência das micro-ondas e o aparelho de TV capta essas frequências.
  - e) Está correto, porque a frequência da RCF está na faixa da luz visível, a qual é captada pelo aparelho de TV.
34. A intensidade máxima da luz solar ocorre em uma frequência aproximadamente igual a  $5,6 \times 10^{14}$  Hz, que é praticamente igual à frequência da luz correspondente à máxima sensibilidade dos nossos olhos. Será que isso é mera coincidência?
  35. Ignorando a participação de outros astros, existe, além do Sol, alguma fonte da energia que chega à superfície da Terra?
  36. Pode-se falar em temperatura do vácuo? O que um termômetro abandonado no espaço, solitário em uma região de vácuo, vai indicar em sua escala?
  37. Como ocorre a emissão de *laser*?
  38. (ITA-SP) Einstein propôs que a energia da luz é transportada por pacotes de energia  $hf$ , em que  $h$  é a constante de Planck e  $f$  é a frequência da luz, num referencial no qual a fonte esta em repouso. Explicou, assim, a existência de uma frequência mínima

- $f_0$  para arrancar elétron de um material, no chamado efeito fotoelétrico. Suponha que a fonte emissora de luz está em movimento em relação ao material. Indique a alternativa correta.
- a) Se  $f = f_0$ , é possível que haja emissão de elétrons desde que a fonte esteja se afastando do material.
  - b) Se  $f < f_0$ , é possível que elétrons sejam emitidos, desde que a fonte esteja se afastando do material.
  - c) Se  $f < f_0$ , não há emissão de elétrons, qualquer que seja a velocidade da fonte.
  - d) Se  $f > f_0$ , é sempre possível que elétrons sejam emitidos pelo material, desde que a fonte esteja se afastando do material.
  - e) Se  $f < f_0$ , é possível que elétrons sejam emitidos, desde que a fonte esteja se aproximando do material.
39. (UFPI) O comprimento de onda de De Broglie para uma partícula alfa com velocidade  $v_\alpha = 6,0 \times 10^6$  m/s é dado aproximadamente por: (massa do próton =  $1,6 \times 10^{-27}$  kg;  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J s).
- a)  $6,8 \times 10^{-14}$  m.
  - b)  $3,4 \times 10^{-14}$  m.
  - c)  $1,7 \times 10^{-14}$  m.
  - d)  $8,0 \times 10^{-15}$  m.
  - e)  $4,0 \times 10^{-15}$  m.
40. (UFRN) Em um aparelho de televisão, existem três funções básicas (cor, brilho e contraste), que podem ser controladas continuamente, para se obter uma boa imagem. Ajustar uma dessas funções depende de essencialmente do controle da diferença de potencial que acelera os elétrons emitidos pelo tubo de raios catódicos e que incidirão na tela fluorescente. Assim, no tubo de imagem do televisor, os elétrons podem ter qualquer valor de energia, dependendo da diferença de potencial aplicada a esses elétrons. A Física Quântica, quando aplicada ao estudo de átomos isolados, constata que a energia dos elétrons nesses átomos é uma grandeza discreta ao invés de continua, como estabelecido pela Física Clássica. Essas afirmações, valores contínuos de energia para os elétrons emitidos pelo tubo e energias discretas para os elétrons do átomo, não são contraditórias, porque os elétrons emitidos pelo tubo de raios catódicos:
- a) São livres e os elétrons que estão nos átomos são confinados.



- b) São em grande quantidade, diferentemente dos elétrons que estão nos átomos.
- c) Perdem a carga elétrica, transformando-se em fótons, e os elétrons que estão nos átomos permanecem carregados.
- d) Tem comprimento de onda de De Broglie associado igual ao dos elétrons que estão nos átomos.
41. (UFPE) No modelo planetário do átomo, o núcleo tem carga positiva e pequena dimensão, e os elétrons circulam em volta dele. De acordo com a Mecânica Clássica de Newton, o equilíbrio da órbita depende de que a força de atração entre núcleo e elétron faça o papel de força centrípeta. Desse modo, os raios das órbitas atômicas poderiam ter qualquer valor. Na prática, observa-se que só algumas órbitas são permitidas. Conforme a Teoria Eletromagnética, de Maxwell, cargas elétricas aceleradas irradiam. O elétron girando tem aceleração centrípeta e, como carga acelerada, perde energia. Assim, o modelo atômico de Bohr seria inviável. Entretanto, várias evidências apoiam esse modelo. Para preservar a concepção do átomo, propôs-se que, em determinadas órbitas o elétron não irradiaria energia, contrariando o eletromagnetismo. Essas órbitas especiais atenderiam à condição de quantização da quantidade de movimento angular ou, equivalentemente, do perímetro de cada órbita eletrônica. Sejam:
- $Z$  = número atômico;  
 $m$  = massa do elétron;  
 $e$  = carga do elétron;  
 $K$  = constante elétrica;  
 $h$  = constante de Planck;  
 $v$  = módulo da velocidade do elétron na órbita;  
 $n = 0, 1, 2, 3, \dots$
- Quais das seguintes proposições são verdadeiras?
- (1) A condição clássica para estabilidade da órbita é  $mv^2r = KZe^2$
- (2) A condição quântica para a estabilidade da órbita é  $2\pi rnv = nh$ .
- (3) A condição quântica para a estabilidade da órbita é  $2\pi nr = mvh$ .
- (4) A condição clássica para estabilidade da órbita é  $mw^2r^3 = KZe^2$ .

- (5) A condição quântica para estabilidade da órbita é  $mvr = KZe^2$ .
42. Outro fenômeno que só pode ser explicado pelo modelo quântico da radiação eletromagnética é o efeito Compton. O que é o efeito Compton?
43. Existe uma técnica de diagnóstico médico por imagem denominada tomografia por emissão de pósitron e conhecida por PET. Como a imagem é obtida por esse processo?