



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**  
Instituto de Física e Química – CAC  
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física  
Mestrado Profissional em Ensino de Física



**PROPOSTA DE UNIDADE DIDÁTICA PARA A APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE  
CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA**

Thiago Sebastião de Oliveira Coelho

Produto Educacional associado à Dissertação de Mestrado de Thiago Sebastião de Oliveira Coelho, apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão, no curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte integrante dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

**Orientador:**

Prof. Dr. Julio Santiago Espinoza Ortiz

Catalão, GO.  
Dezembro, 2015.

# PROPOSTA DE UNIDADE DIDÁTICA PARA A APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

Thiago Sebastião de Oliveira Coelho

## RESUMO

O produto aqui descrito está organizado no formato de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), e para isso foi dividida em duas partes: as Sequências Didáticas e o Texto de Apoio ao Aluno, respectivamente. Os conteúdos da UEPS são os tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC), geralmente discutidos de forma superficial nos meses finais do 3º ano do ensino médio. Nossa proposta consiste na inserção destes conteúdos de modo que a assimilação dos conceitos e significados, por parte dos alunos, não sejam pautados de maneira literal e arbitrária, isto é, que a aprendizagem se caracterize como significativa. Em cada passo da sequência são levados em conta o conhecimento prévio do aluno, assim como uma *tentativa* de mapeamento da estrutura cognitiva de cada um deles. As propostas de verificação da aprendizagem são feitas através de atividades individuais e em grupo, constantemente avaliadas durante todo o processo de *ensinagem*.

O Texto de Apoio consiste na união de vários recortes (na maioria das vezes adaptados) de vários livros e periódicos científicos. Enfatizamos que, mesmo que este material seja composto por informações de fontes diversas, não deve ser utilizado como única fonte de consulta, mas em conjunto com outras obras e até mesmo ambientes virtuais. As imagens inseridas no corpo do texto têm como finalidade facilitar a interação com os novos conceitos, visto que existem materiais que exibem as figuras no final, burocratizando a leitura. Ao fim de alguns capítulos do Texto de Apoio estão as *Questões para interpretar e criticar*, parte integrante das atividades proposta pela UEPS, assim como a leitura dos tópicos contidos no texto.

As Sequências Didáticas foram divididas em três partes, com uma quantidade aproximada de aulas necessárias para o desenvolvimento das atividades propostas. As atividades selecionadas para verificar se a aprendizagem dos conceitos foi significativa, foram: mapas mentais e mapas conceituais, produções de texto, discussões em grupo, resolução de exercícios em grupo e individualmente, interação com softwares computacionais (*Phet Colorado*). Todas as tarefas propostas na UEPS foram avaliadas de forma somativa, isto é,

levando em consideração todo o processo para a produção dos trabalhos, e não apenas o que o aluno formalizou numa folha de papel. Assim, o caráter recursivo das atividades é um incentivo ao indivíduo que busca pela aprendizagem significativa dos conceitos, já que, na correção das irregularidades de um trabalho, o estudante tem a possibilidade de aprender com os “*erros*” cometidos anteriormente.

É válido destacar que a aplicação desta UEPS deve contemplar as particularidades de cada ambiente escolar. Este produto foi confeccionado para atender um grupo específico de alunos de uma escola em uma pequena cidade, e mesmo assim existe um potencial para a aplicação deste material em outros ambientes, diferentes realidades. Portanto professor(a), sinta-se livre para realizar as adaptações necessárias e faça um bom uso deste produto educacional.

## Sumário

<b>SEQUÊNCIAS DIDÁTICAS</b> .....	5
Objetivos .....	6
Cronograma sugerido.....	7
Parte 1: Quantização e a constante de Planck .....	8
Parte 2: Os efeitos fotoelétrico e fotovoltaico.....	11
Parte 3: O átomo quântico e a produção de luz .....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	18
<b>TEXTO DE APOIO AO ALUNO</b> .....	19
<b>PARTE 1: Noções de física quântica e a estrutura da matéria</b> .....	20
1 - Uma introdução ao estudo da física moderna e contemporânea .....	20
2 - A FMC e as novas tecnologias .....	21
3 - A estrutura da matéria e o atomismo clássico.....	24
3.1 – <i>Os raios catódicos e o modelo de Thomson</i> .....	27
3.2 - <i>O modelo atômico nuclear</i> .....	30
4 - O despertar da física quântica .....	33
4.1 - <i>A radiação térmica e o corpo negro</i> .....	34
4.2 – <i>A proposta de Planck e o conceito de quantização</i> .....	37
<b>PARTE 2 – Interação entre radiação e matéria</b> .....	40
5 - O efeito fotoelétrico.....	40
5.1 – <i>Os problemas clássicos do efeito fotoelétrico</i> .....	40
5.2 – <i>Um pouco sobre os semicondutores</i> .....	42
5.3 – <i>O efeito fotovoltaico e as células solares</i> .....	44
5.4 – <i>A interpretação de Einstein para o efeito fotoelétrico</i> .....	48
6 – Luz: onda ou matéria? .....	51
6.1 – <i>A dualidade da luz</i> .....	53
<b>PARTE 3 - A física quântica na modelagem atômica e produção de luz</b> .....	55
7 – O átomo de Bohr: um modelo baseado na teoria quântica.....	55
8 – A emissão estimulada.....	58
9 – A produção luminosa e suas aplicações.....	59
9.1 – <i>Fontes de LASER</i> .....	60
9.2 – <i>LED e OLED: aplicações e potencialidades</i> .....	63
Referências Bibliográficas .....	68

## **SEQUÊNCIAS DIDÁTICAS**

## **Proposta de UEPS para o ensino de tópicos de Física Moderna e Contemporânea**

Thiago Sebastião de Oliveira Coelho<sup>\*</sup>

### **Objetivos**

Esta proposta consiste na apresentação dos conteúdos específicos previamente organizados, de modo a facilitar a negociação (ou intercâmbio) entre conceitos básicos de Física Moderna e Contemporânea em nível médio. Levando em conta o conhecimento prévio do indivíduo, este será capaz de diferenciar e integrar conceitos como: grandezas quantizadas e contínuas, efeito fotoelétrico e fotovoltaico, emissão estimulada, dualidade da luz, materiais semicondutores, teoria de bandas, fóton, quantum, dentre outras.

---

<sup>\*</sup> Aluno do Mestrado Profissional em Ensino de Física da UFG, campus Catalão – GO. Professor de Física no Instituto Federal Goiano, campus Morrinhos – GO.

## Cronograma sugerido

<b>Conteúdo</b>	<b>Quantidade de aulas previstas</b>
Parte 1- Quantização e a constante de Planck - A FMC e as novas tecnologias - O atomismo clássico - O início da física quântica - Quantização da energia	10
Parte 2 – O efeito fotoelétrico e fotovoltaico - O efeito fotoelétrico - Um pouco sobre semicondutores - O efeito fotovoltaico e as células solares - A dualidade da luz	09
Parte 3 – O átomo quântico e a produção de luz - O modelo atômico de Bohr - Emissão espontânea e emissão estimulada - Fontes de LASER - LED e OLED	12
<b>Total de aulas previstas:</b>	<b>31</b>

## Parte 1: Quantização e a constante de Planck

### Situação inicial:

Os alunos responderão um *questionário introdutório* contendo perguntas com alto grau de generalidade. O questionário tem por objetivo analisar as concepções iniciais dos estudantes sobre temas que envolvam conceitos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) e suas aplicações. Após a atividade, o professor organizará um debate entre o grande grupo sobre a relação da Física e as novas tecnologias de uso cotidiano: LASER, LED, OLED, transistor, computadores quânticos. Esse assunto será aprofundado em uma aula expositiva preparada com slides contendo fotografias e audiovisuais.

Em seguida, os alunos serão orientados a elaborar um *resumo* referente às possíveis aplicações das teorias atuais de Física em aparelhos eletrônicos e outras tecnologias. Por fim, um texto a ser utilizado em todos os encontros será distribuído. Os alunos devem ler, durante a aula, ou em casa, os tópicos 1 e 2 como reforço do conteúdo. Essa atividade consumirá *duas aulas*.

### Revisão:

Talvez a maior parte da turma tenha conhecimento dos modelos atômicos na disciplina de Química. Mesmo assim, seria pertinente que essa parte fosse tratada durante um episódio de ensino, não só como critério de revisão, mas também para deixar claro o estudo da Mecânica Quântica como domínio do mundo microscópico. Além do mais, a evolução dos modelos atômicos está ligada à conceitos da Física Quântica.

Nessa parte o professor questionará aos alunos sobre a composição da matéria, como a matéria é formada. Todas as sugestões serão anotadas na lousa. Em seguida, uma apresentação em slides sobre os modelos atômicos será utilizada para facilitar a interação e compreensão do texto entregue na última aula. Dando seguimento, os alunos serão orientados para que façam a leitura do texto (tópicos 3, 3.1 e 3.2) e *confeccionem um mapa mental sobre o conteúdo visto até agora*. Por fim, serão formados grupos de até 03 estudantes para que possam comparar os mapas e também responder a questões propostas. Essa etapa ocupará *duas aulas*.



### **Situações-problema:**

As questões a seguir serão expostas na lousa de forma a induzir um debate entre o grande grupo, com a mediação do professor: a) em que contexto surge a Física Moderna? b) o que estuda a Física Quântica? c) você sabe o que é *quantum*? d) qual a diferença entre contínuo e quantizado (discreto)?

Em seguida, o professor fará uma intervenção através de uma aula expositiva utilizando slides e a lousa como recursos para reforçar a negociação de significados envolvendo conceitos como *discreto e contínuo*, além de deixar claro o contexto histórico e científico que se fez necessário ao surgimento da Física Moderna. Será utilizado também um software computacional de uso livre, disponível no site *Phet Colorado* (in: <<http://phet.colorado.edu/pt/simulation/blackbody-spectrum>>). Esse programa é uma simulação que mostra um diagrama da intensidade de radiação emitida por um corpo negro, em função do comprimento de onda dessa radiação.

Para finalizar, os alunos serão orientados a retomar o texto entregue na última aula para que seja desenvolvida uma atividade de leitura e discussão em grupo, especificamente dos tópicos 4 e 4.1. O processo tomará mais *duas aulas*.

### **Aprofundar e revisar o conteúdo:**

Essa aula deve ser utilizada para reforçar e diferenciar o conceito de *quantização*. Para dar início, o professor pode utilizar o exemplo contido no texto: um oscilador massa-mola clássico e quântico. Nesse momento é importante deixar claro que Planck quantizou a energia dos osciladores, e não os osciladores em si. Mostrar que a *constante de Planck (h)* é uma quantidade física exibida pela natureza, assim como a velocidade da luz e a carga elétrica elementar.

Por fim, os mapas mentais serão novamente entregues para que os alunos acoplem os novos conceitos, mas dessa vez no formato de *mapas conceituais*. Antes de serem devolvidos ao professor, os *mapas serão comparados* e discutidos entre os grupos formados no último encontro. A etapa será desenvolvida em *duas aulas*.

### **Diferenciar e integrar o conteúdo:**

Nesse encontro o professor dará início a uma breve revisão pedindo aos alunos para exemplificarem grandezas contínuas e discretas. Como proposta de nova situação, será reproduzida a faixa *Music of the Quantum*, composta por Jaz Coleman, com a colaboração de seu irmão, o físico Piers Coleman, do Departamento de Física e Astronomia da Universidade Rutgers (Escola de Artes e Ciências, Nova Jérsei - EUA.). A faixa está disponível em: <<http://www.emergentuniverse.org/#/music>>. A atividade tem por objetivo instigar o grupo a perceber que mesmo na música é possível identificar os arranjos discretos e contínuos das notas.

Ao fim da discussão o professor deve propor um trabalho de leitura em grupo do tópico 4.2, além da resolução das questões propostas. Isso para que os alunos possam externalizar sua compreensão do conceito de quantização. Durante a atividade o professor poderá devolver os mapas conceituais para que os estudantes tenham uma nova oportunidade de modificar/acrescentar conceitos. O procedimento ocupará *uma aula*.

### **Avaliação da aprendizagem na sequência didática:**

Todas as atividades desenvolvidas em sala de aula terão a supervisão do professor e serão avaliadas de maneira somativa e recursiva. Os trabalhos que de alguma forma não consigam demonstrar que a aprendizagem dos conceitos foi significativa, podem ser devolvidos aos alunos para serem reorganizados.

### **Avaliando a sequência didática:**

Esse é o momento onde o professor tem espaço para refletir sobre o desenvolvimento do processo executado. Se algum aluno ou um grupo de estudantes apresentarem dificuldades nas relações com os novos conceitos, as atividades podem ser modificadas ou adicionadas à sequência.

***Total de aulas previstas: de 9 a 10.***

## Parte 2: Os efeitos fotoelétrico e fotovoltaico

### Situação-problema inicial:

O professor iniciará um debate sobre Energia e suas formas. O foco será mantido na geração de energia elétrica para grandes centros urbanos, rurais e industriais e seus impactos no meio ambiente. Existe alguma forma de produzir energia elétrica de forma limpa, renovável e sustentável?

Em seguida **será exibido o vídeo educativo** *Maravilhas Modernas – Energia Renovável*, produzido pelo canal History Channel. O vídeo completo e dublado está disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=DgOB85gd118>>. Fazendo uso do Texto de Apoio e também das conclusões tiradas do vídeo educativo, os alunos serão orientados a analisar um *infográfico* que mostra impactos ambientais para a instalação de uma usina hidrelétrica. A orientação é que façam uma discussão sobre as questões energéticas do Brasil e as possíveis alternativas para geração de energia elétrica através de fontes renováveis. Todo processo ocorrerá em *duas aulas*.

### Questionamentos iniciais:

Após a exibição do vídeo o professor colocará algumas questões de forma a adentrar no assunto, que são os efeitos fotoelétrico e fotovoltaico: a) é possível usar a luz do Sol para gerar energia elétrica? b) como distinguir o efeito fotoelétrico do efeito fotovoltaico? c) mesmo quando o Sol se põe é possível ter energia elétrica através desse efeito? d) você sabe o que é uma fotocélula semicondutora?

Nesse contexto, além dos painéis solares mais comuns para geração de energia elétrica, o professor irá discutir outras aplicações para o efeito fotovoltaico e fotoelétrico: impressoras a jato, sondas enviadas a outros astros, e placas fotovoltaicas semicondutoras. Isso pode ser feito através de uma aula expositiva com slides e audiovisual. As respostas de algumas dessas questões podem ser elaboradas nessa aula, deixando os semicondutores para encontros futuros. A atividade ocupará *uma aula*.

### **Exposição dialogada e nova situação-problema:**

Nessa aula o professor deve discutir as tentativas de explicar o efeito fotoelétrico através da teoria clássica. Além de utilizar a lousa como instrumento para organizar conceitos e palavras-chave, o processo de abstração do modelo torna-se mais interessante quando o efeito é apresentado através de um software computacional. Como sugestão, recomendo novamente o conteúdo do site *Phet Colorado. O Efeito Fotoelétrico* está disponível em: <<http://phet.colorado.edu/pt/simulation/photoelectric>>.

Os problemas clássicos envolvidos na explicação do fenômeno devem ser muito bem estabelecidos, dessa forma o professor terá condições de ressaltar (mais uma vez) que o conhecimento científico pode ser provisório. Ao fim da aula, o professor pode questionar ao grande grupo se existe alguma ideia de como superar os problemas apresentados pelo efeito fotoelétrico. A atividade ocupará *uma aula*.

### **Diferenciação progressiva do conteúdo**

Os problemas apresentados na explicação do efeito fotoelétrico serão novamente tratados à luz da teoria quântica. Aqui o professor deve introduzir o conceito do fóton proposto por Albert Einstein e esclarecer o fenômeno (para facilitar, o professor poderá utilizar novamente o software *O Efeito Fotoelétrico*). Nesse processo novos conceitos farão parte da discussão, como: *função trabalho* e *frequência de corte*, assim como suas aplicações na famosa equação de Einstein para o efeito fotoelétrico.

Por fim, o professor deve *propor duas questões sobre o assunto*. Uma questão teórica e outra de aplicação da equação de Einstein. Nesse momento entra a discussão sobre a unidade *elétron-volt* (eV) e sua relação com o *joule* (J). A etapa ocupará *uma aula*.

### **Aprofundar e contextualizar**

Antes de iniciar as discussões sobre células fotovoltaicas, o professor deve falar um pouco mais sobre a natureza dos materiais semicondutores, sem aprofundar na física dos materiais.

Nessa etapa é importante que o aluno utilize seu conhecimento prévio dos modelos atômicos para que adquira outros, como: *banda de valência e banda de condução, buracos*

(lacunas), *semicondutor tipo n e tipo p, diodo semicondutor*. Em grupos, os alunos devem escrever algumas linhas sobre o efeito fotovoltaico, tomando como base a *Figura 26*, contida no tópico 5.3 do Texto de Apoio. A atividade ocupará *uma aula*.

### **Reconciliação integrativa**

Nesse encontro o professor deve discutir a dualidade da luz através de um breve histórico a respeito das concepções para os modelos de Huygens e Newton. Para recordar sobre a experiência da fenda dupla, o professor pode utilizar o software *Interferência Quântica* do site *Phet Colorado* (in: <<http://phet.colorado.edu/pt/simulation/quantum-wave-interference>>). Os alunos serão orientados *a responderem (em grupo) as questões propostas ao término do capítulo* contido no texto. Todo o processo ocupará *uma aula*.

### **Avaliação integradora**

De modo a dar continuidade aos processos de diferenciação progressiva e reconciliação integradora, cada um dos alunos deverão escrever um texto que, supostamente, seria enviado à Presidência da República. Este texto deve convencer o(a) Presidente(a) que a obtenção de energia elétrica através da energia solar seria uma melhor opção energética para o país. Os alunos devem partir do princípio de que nossos representantes políticos não tenham conhecimento prévio de física moderna, como fóton, efeito fotovoltaico, materiais semicondutores, etc. A atividade ocupará *duas aulas*.

### **Avaliação da aprendizagem na sequência didática:**

A participação do aluno nas atividades propostas é importante no processo de avaliação, juntamente com a aprendizagem dos conceitos de forma significativa.

As avaliações serão realizadas de forma somativa, levando em conta todos os passos do aluno para fazer valer a aquisição significativa do conhecimento implícito/explicito na atividade.

**Avaliando a sequência didática:**

Atividades individuais e em grupo são formas úteis para que o estudante manifeste parte de sua estrutura cognitiva em perspectivas operacionais diferenciadas. A compreensão não arbitrária e não literal dos conceitos é pré-requisito para que a sequência cumpra seu papel enquanto objeto de ensino e aprendizagem.

*Total de aulas previstas: de 8 a 9.*

## Parte 3: O átomo quântico e a produção de luz

### Revisão e situação-problema:

Na última parte vamos tratar de duas formas diferentes de emissão luminosa através do processo físico chamado de *emissão estimulada*. Discutiremos também o processo de emissão de luz através de materiais semicondutores, já discutido nos tópicos anteriores. Esse episódio de ensino deve ser utilizado para revisar o atomismo clássico. O pouco tempo que é gasto nesse procedimento é útil para introdução do átomo de Bohr.

O professor pode utilizar uma aula expositiva dialogada em conjunto com slides para facilitar a retomada dos conhecimentos prévios, e também para expor o problema do espectro emitido pelos gases, que deveria ser contínuo e não discreto. O aluno terá a oportunidade de adquirir novos conceitos, como *níveis de energia*, *transição eletrônica* e *emissão espontânea*. O processo ocupará *uma aula*.

### Diferenciação progressiva do conteúdo:

Nessa aula, questões introdutórias serão propostas visando despertar o interesse dos alunos ali presentes: a) é possível cortar objetos utilizando a luz? b) podemos enviar sinais de luz da Terra à Lua? A seguir, o professor deve discutir a importância da luz no meio econômico, social e ambiental, assim como ressaltar sua notoriedade no Ano Internacional da Luz, promovido pela UNESCO. Em seguida, a aula deve ser utilizada para esclarecer o funcionamento de dispositivos que emitem luz LASER. Fazendo uso do que foi discutido em sala de aula, e também através da leitura do Texto de Apoio, os alunos devem *responder as questões propostas no início do encontro*. A atividade ocupará *duas aulas*.

### Exposição dialogada e contextualização integrativa:

Nessa etapa o professor fará uma breve revisão sobre a natureza dos materiais semicondutores, assim como a útil *junção p-n*. Utilizando uma apresentação de slides, subsidiada no Texto de Apoio, o aluno deve ser capaz de compreender como se dá a emissão de luz através de materiais do estado sólido. Dentro desse contexto, o funcionamento de

dispositivos, como LED e OLED, podem ser introduzidos na discussão. Aqui, cabe muito bem o lembrete de que essa linha de pesquisa rendeu o prêmio Nobel de Física do ano de 2014 (após 50 anos de pesquisa, finalmente o LED azul). Por fim, os alunos serão orientados a responderem, em grupo, *as questões ao fim do capítulo*. A atividade ocupará *duas aulas*.

### **Proposta de atividade final:**

Como trabalho final é proposta apresentação de qualquer tópico dos conteúdos de FMC discutidos no decorrer da sequência. A atividade será exposta em forma de pôsteres ou cartazes a todos os membros da classe. Não é necessário que os temas escolhidos estejam contidos no Texto de Apoio, podem ser selecionados temas transversais, como: Arte e Física Moderna; Energia Solar: os custos com a conta de luz vão para zero?

Já nesse encontro, o professor dará início a um processo de orientação aos grupos na produção do trabalho, principalmente no formato de confecção do pôster e no material a ser consultado. Podem ser utilizados mapas mentais e mapas conceituais para externalizar as ideias, e assim facilitar a exposição e organização dos conteúdos. Todo o processo ocupará *duas aulas*.

### **Encontro final integrador:**

Nessa aula o professor deve prosseguir com o procedimento de orientação aos grupos. Em cada grupo será investigado a montagem dos painéis, assim como a interação com os materiais propostos, como artigos, vídeos, sites, etc. Essa etapa ocupará *duas aulas*.

### **Avaliação da aprendizagem:**

Para finalizar o processo de avaliação na sequência didática, os grupos apresentarão os temas escolhidos nas aulas anteriores. Cada grupo terá um tempo máximo de 15 minutos para expor o assunto, e depois mais 05 minutos para questionamento do grande grupo. A atividade ocupará de *duas a três aulas*.



### **Avaliação da sequência didática:**

Mais uma vez o professor deve refletir a eficiência das atividades desenvolvidas na sequência. O professor deve atuar não só como observador, mas também interagir com os alunos nos trabalhos propostos; isso é de suma importância para que um diagnóstico mais justo possa ser feito. Esse é um momento de reflexão para ambas as partes, tanto professor quanto aluno. A aprendizagem dos tópicos de FMC foi de forma significativa? Existem vestígios da aprendizagem mecânica? O que foi ensinado ao aluno está de acordo com o conteúdo aceitável pela comunidade científica? O que o aluno “aprendeu” está de acordo com esse conteúdo aceitável?

***Total de aulas previstas: de 11 a 12.***

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, W. L., MENDES, E. S., PITANGA, P. S. A. Possibilidade metodológica na inserção do tema OLED no ensino médio: um olhar a partir das regras da transposição didática. **VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação**. 2012. Grupo de Pesquisa em Ensino de Ciências e Matemática do Vale do Jari. Palmas-TO.

ANO INTERNACIONAL DA LUZ. **Sobre o ano internacional da luz**. Disponível em: <<http://ail2015.org/index.php/ail2015/>>. Acesso em: 24-08-2015.

HERMANN, W., BOVO, V. **Mapas mentais: enriquecendo inteligências: captação, seleção, organização, síntese, criação e gerenciamento de informação**. 2ª edição. Campinas-SP. 2005. Disponível em: <<http://www.mapasmentais.idph.com.br/conteudos.php#download>>. Acesso em: 06-09-2015.

HISTORY CHANNEL. Documentário: **Maravilhas Modernas**. 2010. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=DgOB85gd118>>. Acesso em: 03-08-2015.

MÁXIMO, A., ALVARENGA, B. **Física: contexto e aplicações**. Volume 03. 1ª edição. Editora Scipione. São Paulo, 2014.

MOREIRA, M. A. Unidades de Enseñanza Potencialmente Significativas - UEPS. **Aprendizagem Significativa em Revista**, v. 1, n. 2, p. 43-63, 2011. Disponível em: <[http://www.if.ufrgs.br/asr/artigos/Artigo\\_ID10/v1\\_n2\\_a2011.pdf](http://www.if.ufrgs.br/asr/artigos/Artigo_ID10/v1_n2_a2011.pdf)>. Acesso em 15-08-2015.

\_\_\_\_\_. Aprendizagem Significativa Crítica. **Instituto de Física da UFRGS**. Porto Alegre-RS, 2000. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~moreira/apsigcritport.pdf>>. Acesso em 15-08-2015.

PHET COLORADO. **Phet – Interactive Simulations**. Universidade do Colorado. Disponível em: <[https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/](https://phet.colorado.edu/pt_BR/)>. Acesso em: 24-08-2015.

RUTGERS. Music of the Quantum. University of New Jersey. Disponível em: <<http://musicofthequantum.rutgers.edu/>>. Acesso em: 10-09-2015.

## **TEXTO DE APOIO AO ALUNO**

## PARTE 1: Noções de física quântica e a estrutura da matéria

### 1 - Uma introdução ao estudo da física moderna e contemporânea

Praticamente tudo o que você estudou até agora faz parte da chamada *Física Clássica*, onde são essenciais os conceitos ligados às Leis de Newton e também às Leis de Conservação. Mesmo sendo muito útil, a Física Clássica não é capaz de explicar alguns acontecimentos restritos a outros pontos de vista, como por exemplo, o comportamento de corpos com altas velocidades<sup>1</sup> ou em escalas microscópicas, isto é, na perspectiva do átomo. No final do século XIX surgiram resultados de experiências que não estavam de acordo com as teorias existentes, assim, algumas questões ainda estavam sem resposta.

Em 1860, o físico escocês James Clerk Maxwell estabeleceu quatro equações que unificam: óptica, eletricidade e magnetismo (eletromagnetismo). Sendo assim, as *equações de Maxwell* eram a base para o funcionamento de todos os dispositivos, que de alguma forma, utilizam de recursos eletromagnéticos.

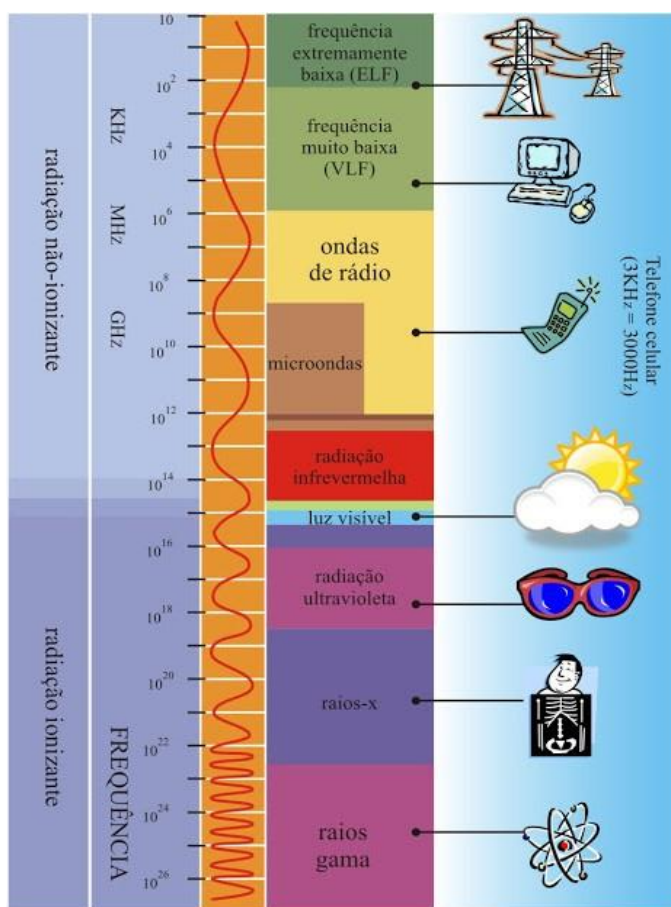


Figura 1 – Espectro eletromagnético. Disponível em: <http://pordentrodaonda.blogspot.com.br/2013/02/>.

A busca pela unificação das teorias da Física era, e ainda é, um processo desejado por toda a comunidade científica. A contribuição de Maxwell é de notável importância, em especial ao

<sup>1</sup> O termo “altas velocidades” é com referência a velocidades próximas à da luz ( $c$ ).

introduzir o conceito de *radiação eletromagnética*, como ondas de rádio, luz visível, raios X, etc.

No decorrer da unidade, vamos estudar situações que ganharam destaque por participarem de um processo pelo qual resulta na criação da chamada Física Moderna e Contemporânea (FMC). Esses processos não passavam de uma análise do comportamento da matéria em escala microscópica, e falhavam quando elementos da teoria clássica eram aplicados na tentativa de resolução dos problemas. Nesse momento, físicos/químicos/matemáticos/filósofos/historiadores (...) sentiam-se incomodados, já que os problemas detectados afetavam a validade de toda a teoria até então considerada verdadeira (paradigmas). A *crise* dos paradigmas praticados pela ciência motivou a comunidade científica de todo o mundo numa árdua busca por novas proposições ou falhas na teoria clássica. Todo esse cenário, não só científico, mas também social, está inserido num processo histórico chamado de *Revolução Científica*, onde muitos autores atribuem seu início com os trabalhos de Nicolau Copérnico (Revolução Copernicana). Com o surgimento da FMC (Relatividade e Mecânica Quântica), toda a base de conceitos da Física Clássica foi afetada; a crise nos paradigmas desencadeou um processo de *revolução*, que se estende até os dias de hoje.

As propostas de maior valor que deram início à Mecânica Quântica surgiram no ano de 1900, porém, apenas *trinta anos* depois a teoria sofreu importantes modificações que foram capazes de explicar muitos dos problemas que pareciam não ter solução. Nos tópicos a seguir, vamos tentar compreender um pouco mais sobre a teoria da Mecânica Quântica e sua importância nos meios de comunicação e informação, além de suas implicações filosóficas a respeito da composição da matéria.

## 2 - A FMC e as novas tecnologias<sup>2</sup>

Um ramo de interesse na Física são as aplicações de suas teorias em outras áreas, seja para análise de temas interdisciplinares, ou aplicações na tecnologia: carros, aviões, smartphones, tablets, televisores, impressoras sem fio e impressoras 3D, cartões magnéticos. Não caberiam nessas páginas todos os dispositivos eletrônicos de uso cotidiano. A descoberta

---

<sup>2</sup> Esse tópico foi extraído e adaptado de textos da página Ciência Hoje. A coluna "*Do laboratório para a fábrica*" é mantida pelo professor Carlos Alberto dos Santos. Os textos estão disponíveis em <<http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/do-laboratorio-para-a-fabrica/a-cereja-no-bolo-da-microeletronica>>; e também <<http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/do-laboratorio-para-a-fabrica/sera-quantico-o-computador-comprado-pelo-google>>.

de novos materiais ou um novo fenômeno é rapidamente absorvido por corporações com interesses na fabricação e venda de aparelhos modernos, como é o caso dos televisores de LED e OLED, que discutiremos no último capítulo.

O fato é que estamos na era do transistor. Esse dispositivo, cujos fundamentos foram descobertos nos anos 1940, é a base tecnológica que suporta a sociedade e o conhecimento. Desde que surgiu, sempre foi um dispositivo eletrônico popular. Seu nome foi usado como peça de propaganda de rádios e televisores e os chips dos computadores são construídos com milhares desses dispositivos. O transistor é como uma "torneira", que pode controlar o fluxo de elétrons que são enviados a um circuito eletrônico.

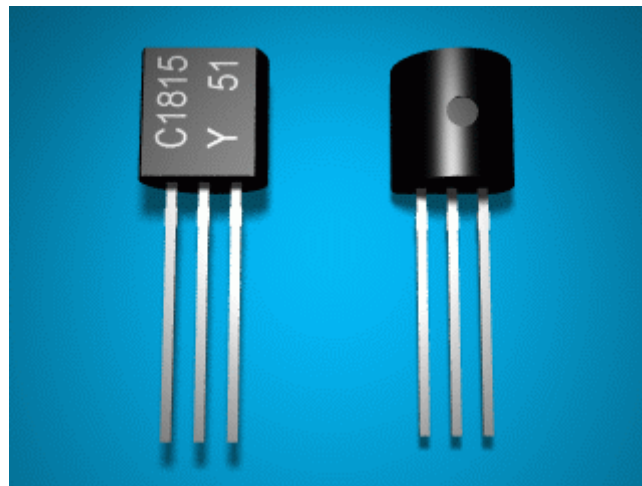


Figura 2 – Transistor moderno.

Disponível em: <[www.dailytech.com/Superlow+Power+With+New+Transistors/article](http://www.dailytech.com/Superlow+Power+With+New+Transistors/article)>.

O uso de transistores revolucionou o modo operacional dos computadores, possibilitando a criação de máquinas com maior capacidade de processamento em equipamentos cada vez menores. Nos transistores existem portas através das quais circulam correntes elétricas. Sempre que uma porta é acionada, o circuito gera um sinal, denominado 'bit', representado por 0 se não tem corrente passando e por 1 quando uma corrente é detectada. O fato importante é que o bit só tem dois valores, 0 ou 1. É por isso que esse sistema é chamado binário.

Com a redução das dimensões de chips e computadores, uma parte da comunidade científica dedica esforços para acoplar fundamentos da Mecânica Quântica conjuntamente com a Ciência da Computação. A ideia de desenvolver computadores que obedeçam à física quântica trata de uma linha de pesquisa recente, mas dos últimos 25 anos até agora, já é possível se

assustar com os resultados. Um bom computador comercial leva aproximadamente quatro dias para fatorar um número com mais de 50 dígitos, enquanto um computador quântico pode levar um pouco mais de 30 segundos. Fatoração de um número inteiro é a representação desse número em um produto de números primos. Por exemplo, a fatoração de 15 é  $3 \times 5$  e a de 2.552 é  $23 \times 11 \times 29$ . Trata-se de um problema computacional dos mais complicados, razão pela qual é a base dos processos modernos de criptografia eletrônica.

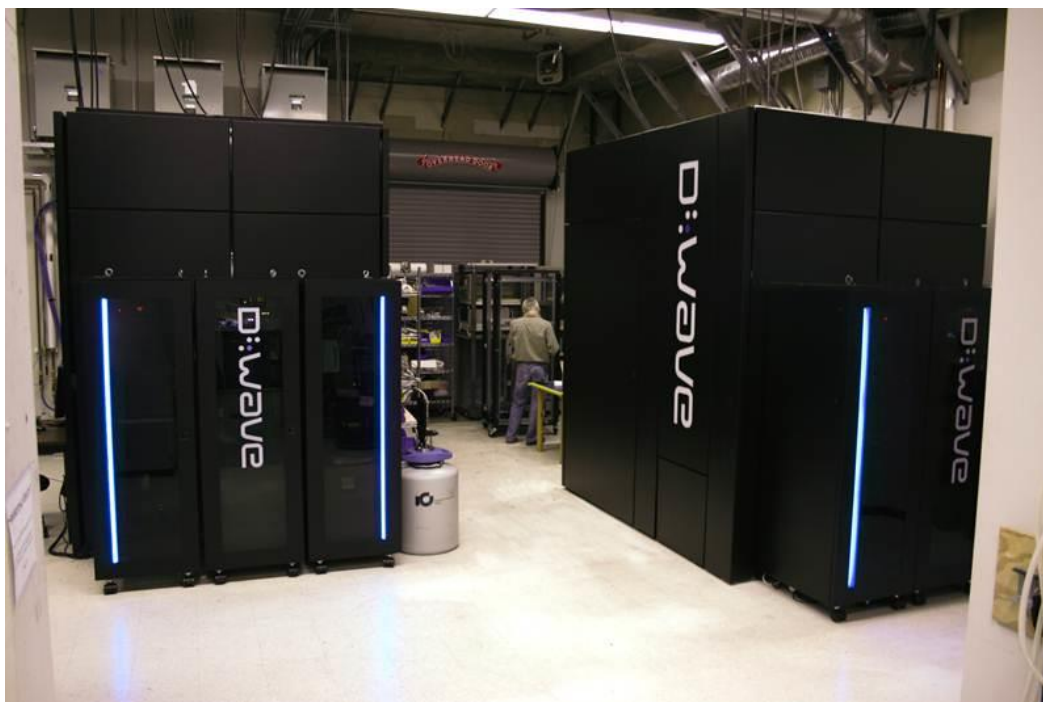


Figura 3 – Computador quântico DW2. Disponível em:  
<<http://www.guiadopc.com.br/artigos/36287/dw2-baseado-teoria-quantica-e-3-600x-mais-rapido-supercomputadores.html>>.

Para entrarmos na computação quântica, é indispensável ter em mente uma diferença fundamental entre o bit e o *quantum bit* (qubit), ou bit quântico. O bit clássico é representado por 0 ou 1, ao passo que o qubit, por causa das propriedades quânticas, pode ser 0, 1 ou 0 e 1 ao mesmo tempo. Então, na computação quântica, é possível dispor simultaneamente de todas as possíveis soluções de um problema e escolher a melhor. É como se fosse um processamento paralelo ou um conjunto de inúmeros computadores resolvendo ao mesmo tempo um problema complexo. Cada um resolve uma parte e depois alguém junta todas as soluções parciais para formar a solução final. Essa possibilidade resulta em um tempo de processamento muito menor do que a resolução de problemas em computadores clássicos, mesmo naqueles classificados como supercomputadores.

O estudo da FMC, em especial a Mecânica Quântica, está diretamente vinculado à transposição e a evolução dos meios tecnológicos em nosso dia a dia. Todo esse conhecimento só existe devido à compreensão da matéria em sua menor escala.

### 3 - A estrutura da matéria e o atomismo clássico<sup>3</sup>

Um dos maiores legados da humanidade é a construção do que se pode chamar de *cosmovisão científica*: um novo olhar sobre a natureza, ou seja, sobre a *Physis*, tal qual era entendida pelos gregos. A origem do processo de construção dessa nova visão, lenta e fascinante, corresponde à origem e ao florescimento da Filosofia e da Física na Grécia antiga. Há muitos anos a.C., filósofos gregos refletiam sobre a essência primordial da matéria, ou seja, se de fato todas as coisas são provenientes de um *único princípio*. Acredita-se que o conceito de *átomo* na filosofia surgiu em torno do século V a.C. com Leucipo de Abdera, e sua posterior elaboração a seu discípulo Demócrito.

Leucipo observou que o nascer e a mudança são incessantes no mundo e postulou a existência de inúmeros elementos em movimento perpétuo (os átomos). Essas ideias foram aceitas por Demócrito e retomadas por Epicuro de Samos. Mas como justificar a existência dos átomos? Segundo Epicuro, tal conceito, não sendo contestado por nenhuma prova dos sentidos, é verdadeiro. Por definição, os átomos e o vazio não são acessíveis aos sentidos humanos, apesar de comporem o mundo sensível. Vivemos em um mundo que se define basicamente por aquilo que somos capazes de perceber com nossos sentidos.



Figura 4 – Átomo indivisível. Disponível em: [www.entendendoquimica.blogspot.com.br/2012\\_06\\_11\\_archive.html](http://www.entendendoquimica.blogspot.com.br/2012_06_11_archive.html).

<sup>3</sup> Os tópicos 3, 3.1 e 3.2 foram extraídos, e parcialmente adaptados, das obras: *Física Moderna – Origens clássicas e fundamentos quânticos*, de Francisco Caruso e Vitor Oguri (2006). *Física Conceitual*, de Paul G. Hewitt (2011). *Física em contextos: pessoal, social e histórico*, de Maurício Pietrocola... [et al.] (2010).



A *indivisibilidade* atribuída ao átomo era defendida de maneira diferente por cada um dos atomistas: Leucipo sustentava que essa propriedade é decorrente de sua pequenez, enquanto, para Demócrito, decorria do fato de ele não conter vazio intrínseco, e para Epicuro, relacionava-se com sua dureza. Aristóteles de Estagira, o mais conhecido dos antigos filósofos gregos, discordava da ideia de átomos. No século IV a.C., ele ensinava que toda a matéria é composta por quatro características, que ele chamou de *qualidades primordiais*, donde as demais qualidades podem ser reduzidas a essas quatro, que são: terra e ar, fogo e água. Tais considerações ganharam destaque por mais de dois mil anos.



Figura 5 – Os quatro elementos de Aristóteles.  
Disponível em: <[http://www.quimlab.com.br/guidoselementos/conceito\\_elemento.htm](http://www.quimlab.com.br/guidoselementos/conceito_elemento.htm)>.

O pensamento atômico foi ressuscitado no início dos anos 1800 pelo meteorologista inglês e professor escolar, John Dalton (1766-1844). Ele explicou com sucesso a natureza das reações químicas supondo que toda matéria fosse formada de átomos. Além dele, outros cientistas da época não tinham evidências convincentes da existência de átomos. Então, em 1827, o botânico escocês Robert Brown (1773-1858) notou algo muito estranho em seu microscópio. Ele estava analisando grãos de pólen em suspensão na água e viu que os grãos se moviam e “saltavam” sem parar. Esse perpétuo movimento aleatório e irregular das partículas é atualmente conhecido como *movimento Browniano*. Embora Brown não pudesse enxergar o átomo, podia ver o efeito que eles tinham sobre as partículas que ele podia enxergar.

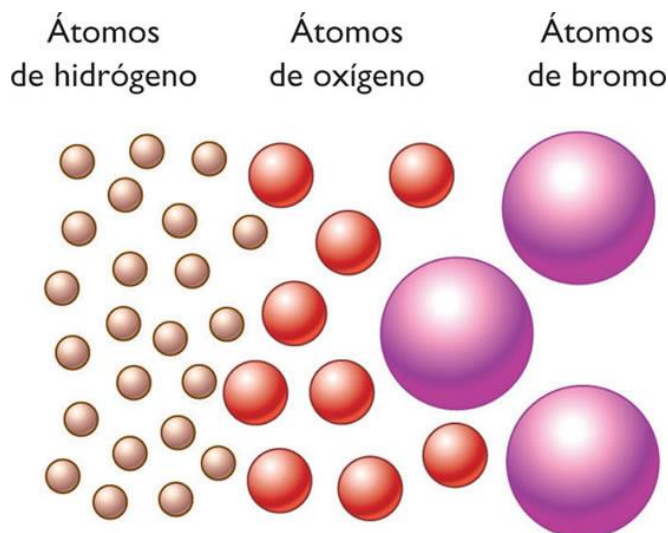


Figura 6 – O átomo de John Dalton.  
Disponível em: <<http://100ciainteractiva.webnode.es/modelodalton/>>.

A primeira evidência experimental sobre a estrutura do átomo foi verificada em 1833 pelo físico e químico Michael Faraday (1791-1867) ao descobrir o fenômeno da eletrólise, onde a passagem de corrente elétrica através de soluções químicas fazia com que os metais de tais soluções se depositassem nas barras metálicas introduzidas nas soluções. Mesmo assim, vemos que a realidade dos átomos só foi estabelecida em 1905 por Einstein, no mesmo ano em que publicou sua teoria da relatividade. Nesse artigo Einstein explicou o movimento Browniano das partículas, o que tornou possível a obtenção das massas atômicas. Não podemos ver os átomos porque eles são pequenos demais. Também não conseguimos ver as estrelas mais afastadas. Existe muito mais do que aquilo que podemos ver com nossos olhos. Mas isso não impede que possamos investigar coisas que conseguimos “ver” por meio de outros instrumentos.

Toda essa passagem pelo domínio atomista nos faz perceber a busca implacável do homem por um modelo aceitável da menor parte da matéria, e, além disso, descobrir se realmente existe essa parte ínfima, uma *partícula elementar*. Muitas pessoas compreendem o átomo como a unidade básica que compõe a matéria, os “tijolos” fundamentais, que combinados formam tudo que conhecemos. A tabela periódica que estudamos amplamente da Química oferece uma lista de mais de 100 átomos naturais conhecidos até hoje. De acordo com os ensinamentos de um brilhante físico estadunidense, Richard P. Feynman (1918-1988), se devido a algum grande cataclismo todo o conhecimento científico fosse destruído, e apenas uma frase pudesse ser transmitida, seria essa: “Todas as coisas são feitas de átomos – pequenas partículas que se mantêm em movimento perpétuo [...]”.

Mas até onde podemos ir com a ânsia de enxergar coisas muito pequenas? Um microscópio qualquer permite que enxerguemos coisas cada vez menores, e pensando nisso nos perguntamos: os aparelhos modernos seriam capazes de permitir que nossos olhos vissem um átomo? A resposta é não. É impossível ver um átomo como vemos as células de uma cebola. Mesmo assim utilizamos de observações indiretas capazes de estimar valores para algumas medidas físicas. Por exemplo, pode ser difícil medir a espessura de uma única folha de papel se só dispõe de uma régua milimetrada como instrumento de medida. Medindo-se a espessura de uma quantidade razoável de folhas e dividindo-se o resultado pelo número de folhas seria uma boa estimativa.

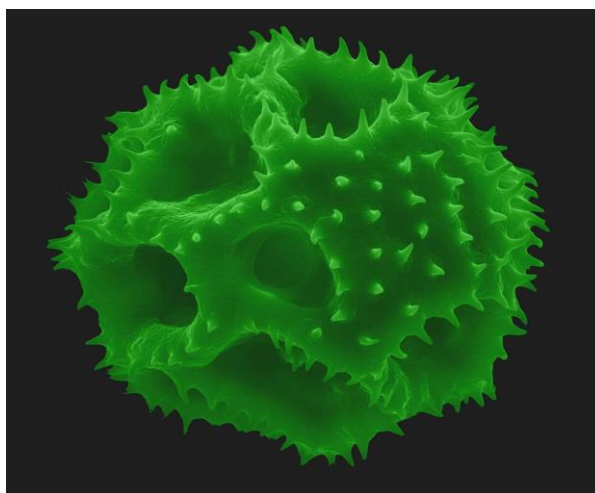


Figura 7 – Imagem microscópica de um grão de pólen da flor dente de leão.  
Disponível em: <<http://www.fotosdomundo.com.br/ciencia/imagens-microscopicas>>.

### 3.1 – Os raios catódicos e o modelo de Thomson

A possibilidade de se produzir uma descarga elétrica em gases rarefeitos foi um fenômeno importante para compreender a estrutura da matéria. As primeiras indicações de que poderiam haver partículas ainda menores que os átomos foram obtidas por William Crookes (1832-1919), um cientista inglês *não-ortodoxo* que acreditava poder se comunicar com os mortos. Ele é mais lembrado hoje por uma invenção chamada de “tubo de Crookes”, um tubo de vidro lacrado contendo um gás com densidade muito baixa e dotado de eletrodos no interior, próximo a cada uma das extremidades. Um feixe de luz é emitido da ampola de vidro através de uma descarga elétrica proveniente do terminal negativo, o catodo. Sendo assim, esses raios foram definidos como *raios catódicos*.



Figura 8 – Ampola de Crookes. Disponível em:  
<<http://thesaurusonline.museus.ul.pt/ficha.aspx?t=o&id=599>>.

Com um tubo similar ao mostrado na figura acima, Crookes observou que o feixe luminoso que atravessava o tubo do catodo propagava-se em linha reta, na ausência de ações externas. Graças a uma série de experimentos, chegou-se à conclusão de que o feixe luminoso era consequência de excitações das moléculas do gás, resultante dos choques com as partículas carregadas provenientes do catodo. Em 1887 o físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940) mostrou que, de fato, os raios catódicos eram formados por partículas menores e mais leves do que os átomos, e todas aparentemente idênticas. Esse feito concedeu a J.J. Thomson o prêmio Nobel no ano de 1906. A partícula de raio catódico foi popularizada como *elétron* a partir de 1910. O termo foi proposto pelo físico irlandês George Stoney (1826-1911) no ano de 1891.

Essa conclusão pode ser considerada um momento de *crise* no pensamento original do átomo, tanto como partícula indivisível, quanto por sua neutralidade. Ora, se havia uma partícula negativa, era necessário que também existisse outra partícula positiva para neutralizar a matéria. O átomo já não podia ser pensado como o elemento fundamental da matéria e muitas foram as tentativas de representa-lo com todas as suas partes. O estabelecimento do elétron como parte integrante do átomo levou o próprio Thomson a propor um modelo atômico em 1903, sendo um dos primeiros a estudar a dinâmica do átomo, ou seja, o que se “passava” dentro dele.

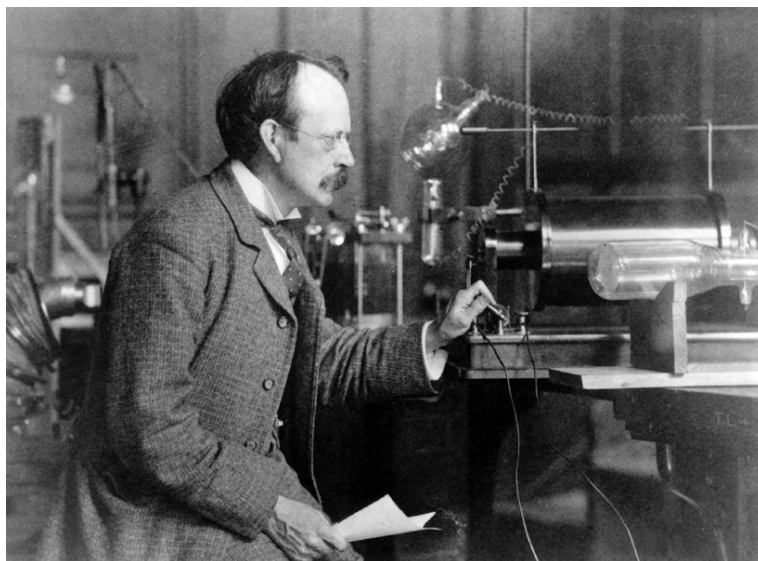


Figura 9 – J.J. Thomson no laboratório de Cavendish. Disponível em: <<http://www.aip.org/history/exhibits/rutherford/sections/young-rutherford.html>>.

J.J. Thomson imaginou o átomo composto de um grande número de elétrons imersos em uma distribuição esférica de cargas positivas<sup>4</sup>. Muitos contemporâneos de Thomson imaginaram seu modelo atômico como um pudim de passas: no qual as passas representavam os elétrons, e a pasta do pudim a carga positiva. Em seu artigo de 1904, Thomson substituiu esse modelo postulando que os elétrons, imersos em uma esfera de cargas positivas, estariam dispostos de maneira uniforme em anéis concêntricos.

Também em 1904, o físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950) propôs um modelo atômico onde os elétrons estão distribuídos em forma de anéis, ao redor de um pequeno núcleo positivo com massa e carga muito maiores que dos elétrons. Tal sistema é conhecido também como “sistema saturniano”, se comparado aos anéis de matéria do planeta Saturno. Em nenhum ponto de seu artigo Nagaoka menciona o número de elétrons contido em cada anel. Assim, o átomo de hidrogênio poderia ter vários elétrons em um anel. No entanto, já sabemos que o átomo de hidrogênio possui apenas um elétron.

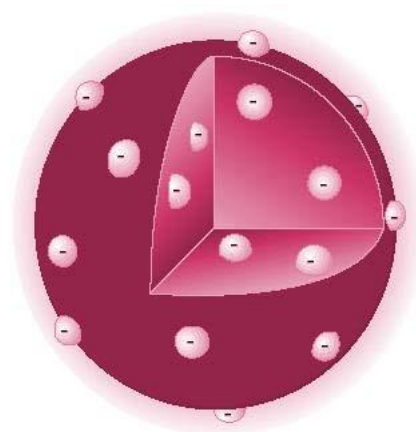


Figura 10 – Modelo atômico de Thomson. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/modelo-atomico>>.

<sup>4</sup> Distribuição já prevista por Lord Kelvin em 1902.

### 3.2 - O modelo atômico nuclear

No ano de 1911, o físico britânico nascido na Nova Zelândia Ernest Rutherford (1871-1937) supervisionou<sup>5</sup> seu hoje famoso experimento da folha de ouro. Esse experimento significativo revelou que o átomo é praticamente um espaço vazio, com a maior parte de sua massa concentrada na região central. Ele bombardeou uma folha fina de ouro com partículas  $\alpha$  (alfa), portadoras de carga positiva emitida por algum tipo de material radioativo.

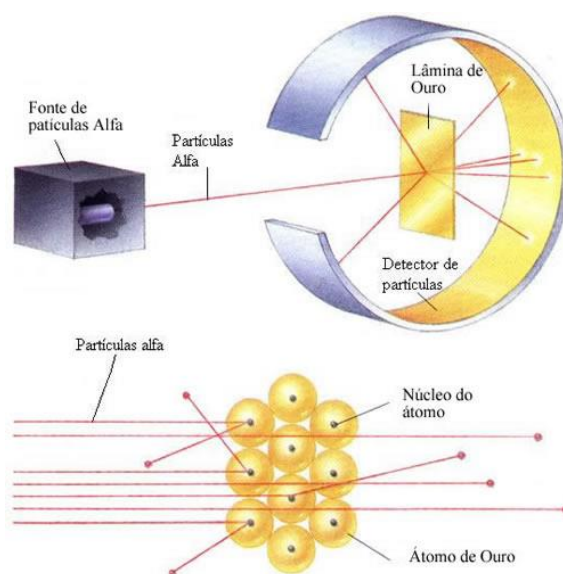


Figura 11 – O espalhamento de partículas alfa. Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/quimica/o-atomo-rutherford.htm>>.

No experimento, Rutherford observou que a maioria das partículas atravessou a lâmina de ouro, com algumas mudando de direção e até voltando em sentido oposto. Dando-lhe a palavra: “... foi tão inacreditável como se você atirasse um obus de 15 toneladas sobre um pedaço de papel de seda e ele atingisse e voltasse. ”. Desse experimento, ele também pôde concluir que o diâmetro do átomo seria da ordem de  $10^{-10}$  m e seu *núcleo* teria um diâmetro da ordem de  $10^{-4}$  m, ou seja, o núcleo é quase 100 mil vezes menor que o átomo. A medida  $10^{-10}$  m passou a ser conhecida por angstrom ( $1,0 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ). É importante ressaltar que, na perspectiva

<sup>5</sup> A palavra *supervisionou* foi usada para indicar que outros pesquisadores além de Rutherford estavam envolvidos no experimento. A prática largamente difundida de elevar um único cientista à posição de pesquisador solitário, o que raramente corresponde à realidade, com muita frequência renega o envolvimento de outros pesquisadores. Há algo de verdadeiro quando se diz “há duas coisas mais importantes para as pessoas do que sexo e dinheiro: *reconhecimento* e *valorização*”.



do átomo, o núcleo se encontra muito distante dos elétrons que giram em torno dele. O diâmetro de um átomo típico é 10 mil vezes maior que o diâmetro de seu núcleo. Veja a tirinha abaixo.



Figura 12 – Dimensões do átomo. Disponível em: *Física Moderna – Origens clássicas e fundamentos quânticos*. Caruso e Oguri (2006), p. 369. 2ª edição, RJ.

Pode parecer que o modelo de Rutherford não era diferente do proposto por Nagaoka, mas no modelo de Rutherford os elétrons seriam como satélites orbitando o núcleo com determinada velocidade, enquanto que para Nagaoka seriam anéis uniformes negativos.

Um dos problemas desses modelos era a incapacidade de explicar a estabilidade da matéria. Das teorias eletromagnéticas, era conhecido que cargas elétricas aceleradas emitem radiação. Se o elétron está em movimento acelerado em torno do núcleo, a radiação emitida ocasionará uma perda de energia. Nesse caso, os elétrons colidiriam com as cargas positivas e o átomo entraria em colapso.

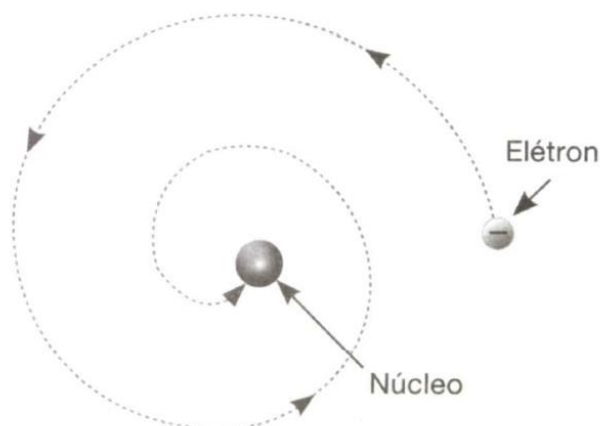


Figura 13 – Instabilidade do átomo.  
Disponível em: *Física em Contextos. Pietrocola... [et al.]* (2010), p.408. 1ª edição, SP.

---

## Questões para interpretar e criticar

---

- 1) Qual a principal diferença entre um *bit clássico* e um *quantum bit*?
- 2) Todas as correntes de filósofos da antiguidade concordavam quanto a um modelo representativo para a matéria em escala microscópica? Qual era o contexto?
- 3) Você acha que existem partículas menores que os átomos? O que sabe a respeito disso?
- 4) O que eram os raios catódicos analisados por J.J. Thomson e como isso refletiu na construção do seu modelo para o átomo?
- 5) Ernest Rutherford foi um dos pesquisadores envolvidos no famoso experimento da lâmina de ouro. Quais fatos o levaram a concluir que a lâmina de ouro era praticamente composta por espaço vazio?
- 6) Através dos anos a comunidade científica foi capaz de comprovar a existência do átomo de forma experimental. Se *não* somos capazes de enxergar os átomos, como é possível acreditar na existência deles?



#### 4 - O despertar da física quântica<sup>6</sup>

Voltando um pouco no tempo, mais especificamente na transição entre os séculos XIX e XX, a física passaria por um robusto processo de modificações em suas bases conceituais. A intensa mobilização de toda a comunidade científica foi necessária para tentar solucionar de vez os problemas apresentados pela teoria clássica. Em geral, o nome Albert Einstein surge como um dos responsáveis pelo surgimento de uma nova Física, mas devemos tomar cuidado e direcionar nosso pensamento no modelo de construção científica através da colaboração.

De forma curiosa, a hipótese de influência marcante para a física atômica e molecular foi determinada em outro ramo, a *física térmica*. Graças ao estudo das radiações térmicas emitidas pelos corpos, a teoria da Mecânica Quântica começa a fortificar sua base teórica. Cientistas como Planck dedicaram grande parte da carreira envolvidos em processos que desencadearam novas concepções.

Quando jovem, na Alemanha, Max Planck (1858-1947) foi um músico talentoso, cantava, compunha canções e óperas. Todavia, Planck preferiu estudar Física, tornando-se doutor em 1879, aos 21 anos. Ele não sabia que ao tentar combinar o eletromagnetismo e a termodinâmica, ele seria o arauto de toda uma nova área da física do século XX, a Mecânica Quântica. Planck teve filhas gêmeas, Emma e Grete, e dois filhos, Karl e o mais novo, Erwin. Durante a primeira Guerra Mundial Erwin foi feito prisioneiro em 1914 e Karl foi morto em ação, ambos na França. Dois anos depois suas duas filhas morreram ao dar a luz.

Quando Hitler chegou ao poder em 1933, Planck acreditava que o nazismo seria apenas uma aflição temporária, mas depois acabou adquirindo aversão pelos planos nazistas e em protesto renunciou à presidência da Academia Prussiana de Ciências, no ano de 1938. Em 1944 a casa de Planck foi completamente destruída pelos bombardeiros aliados. No mesmo ano, Erwin, seu

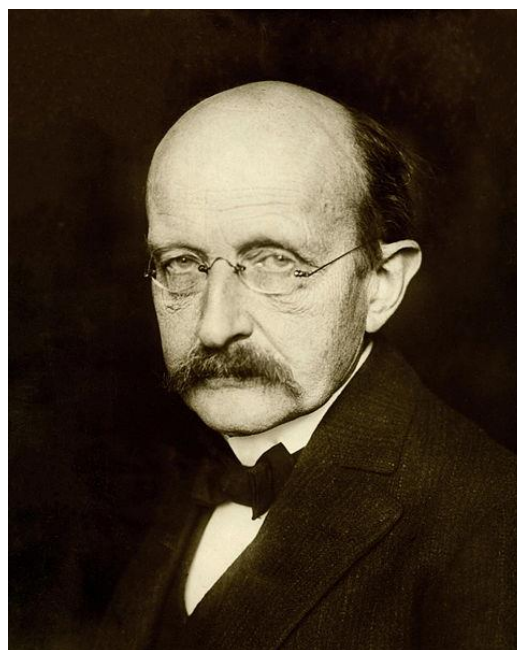


Figura 14 – Max Karl Ernst Ludwig Planck  
Disponível em:  
<[www.wikimedia.org/wiki/Planck\\_1933](http://www.wikimedia.org/wiki/Planck_1933)>.

<sup>6</sup> Texto extraído e adaptado do livro *Física Conceitual*, de Paul G. Hewitt (2011).

filho derradeiro, teve seu nome associado à famosa tentativa de assassinar Hitler, em 20 de Junho. Embora seja dito que Erwin seria poupado se Planck se filiasse ao partido nazista, ele manteve-se firme e recusou a filiação. Ao fim da segunda Guerra Mundial, em 1945, Erwin foi enforcado, o que deixou o idoso pai desolado. Planck faleceu dois anos mais tarde, aos 89 anos.

#### 4.1 - A radiação térmica e o corpo negro<sup>7</sup>

Entre 1895 e 1900 a pesquisa de Planck estava voltada para o estudo da radiação de calor emitida por um corpo submetido a altas temperaturas. A superfície de todo corpo, em qualquer temperatura acima do *zero absoluto*, emite energia na forma de radiação térmica. Quando a superfície do corpo está na temperatura ambiente, a radiação térmica emitida por ele é infravermelha, e como sabemos essa radiação não é visível. Elevando a temperatura do corpo – uma chapa metálica, por exemplo – até cerca de 600 °C, a radiação térmica continua sendo infravermelha, porém mais intensa. Aumentando ainda mais a temperatura o corpo passaria e emitir luz em diferentes cores, acompanhando essa variação progressiva, do vermelho ao violeta. É por isso que as estrelas mais quentes são azuladas.

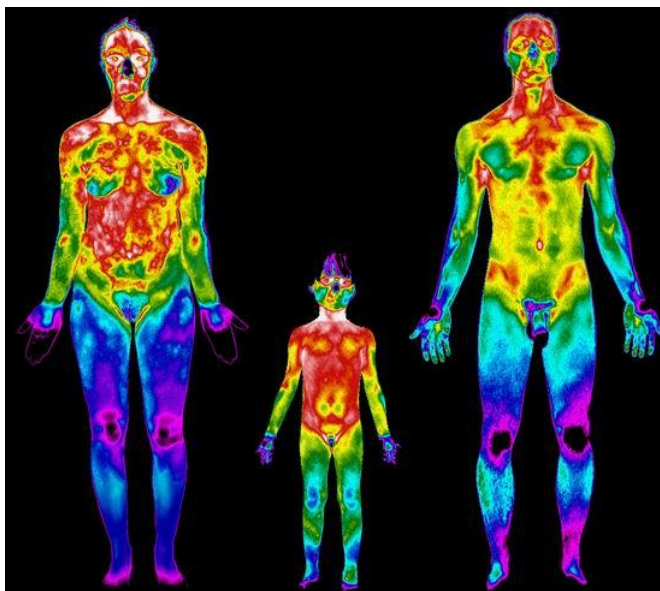


Figura 15 – Imagem de uma família no infravermelho. Disponível em: [www.termografia-em-estado-de-arte.blogspot.com.br/calor-emitido-por-seres-vivos](http://www.termografia-em-estado-de-arte.blogspot.com.br/calor-emitido-por-seres-vivos).

<sup>7</sup> Texto extraído e parcialmente adaptado dos livros: *Física 3*, de Gualter José Biscuola, Newton Villas-Bôas e Ricardo Helou Doca (2013). *Física Moderna – Origens clássicas e fundamentos quânticos*, de Francisco Caruso e Vitor Oguri (2006).

Um objeto *idealizado* absorveria toda a radiação térmica que sobre ele incide, por outro lado, também emitiria 100% dessa radiação. Esse modelo foi proposto em 1859 pelo físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887). Como não ocorre reflexão das ondas eletromagnéticas o objeto não apresentaria cor, sendo chamado de *corpo negro*. A intensidade de energia radiante emitida pelos corpos negros foi um dos problemas que importunou os físicos da época. A maneira como a energia da radiação térmica se distribui entre as diversas frequências já fora medido com precisão; os resultados podem ser vistos no gráfico seguinte.

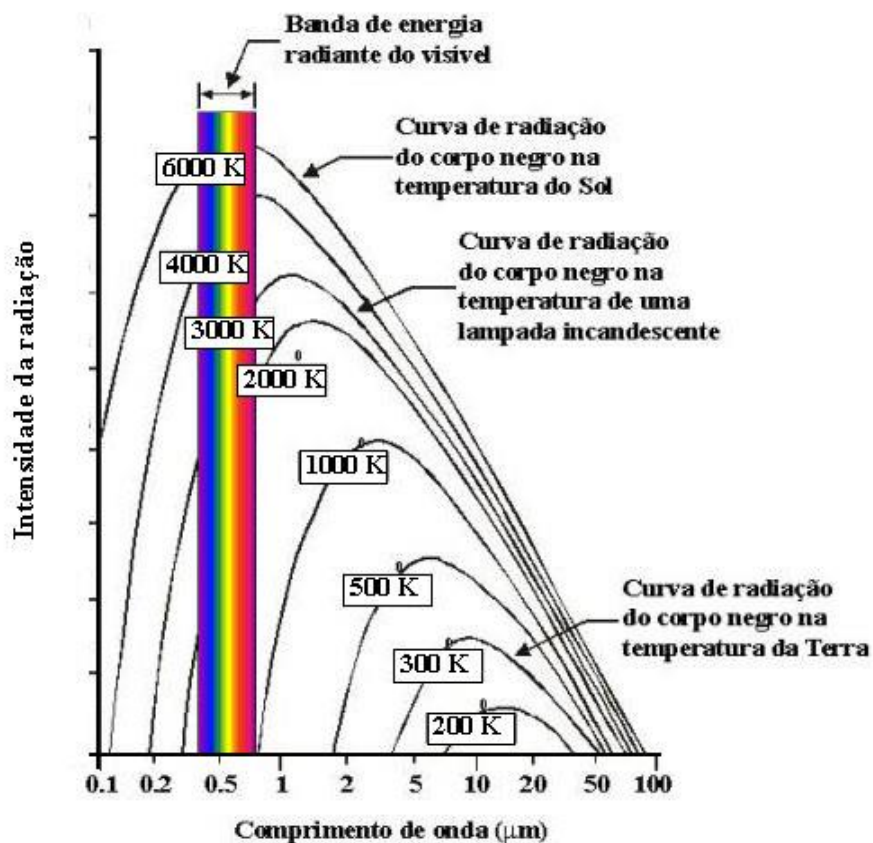


Figura 16 – Radiação do corpo negro para diferentes temperaturas.  
Disponível em: <[http://crv.educacao.mg.gov.br/sistema\\_crv](http://crv.educacao.mg.gov.br/sistema_crv)>.

Embora a teoria eletromagnética de Maxwell tenha se mostrado correta para a propagação das ondas eletromagnéticas, isso não aconteceu na *interação* das ondas eletromagnéticas com a matéria. O espectro de emissão do corpo negro, exaustivamente analisado, foi o primeiro exemplo da incompatibilidade entre resultados experimentais e as previsões decorrentes da teoria. Além de Kirchhoff, seria conveniente apontar a participação de outros físicos que tornaram possíveis as conclusões de Planck, dentre eles: os austríacos Josef

Stefan (1835-1893) e Ludwig Boltzmann (1844-1906), os alemães Wilhelm Wien (1864-1928) e Louis Carl Pasteur (1865-1940), os ingleses John Strutt Rayleigh (1842-1919) e James Jeans (1877-1946), e outros que fortuitamente negligencio. No gráfico abaixo vemos que a curva obtida a partir de resultados experimentais é tangenciada por duas curvas previstas pela teoria clássica.

Na tentativa árdua de resolver esse problema, Planck se baseia na ideia clássica de que a matéria seria constituída de osciladores harmônicos elementares, como se fossem cargas elétricas oscilantes em torno de um ponto. Como sabemos, cargas elétricas oscilantes são responsáveis por gerar radiação eletromagnética. Se os átomos estão em constante vibração é de se esperar que os corpos emitam radiação. Partindo desse princípio, Planck mostrou que a única maneira dos conceitos se conectarem com a parte experimental é se a energia desses osciladores possuem um valor do qual a parcela mínima seria:

$$E = h.f \quad (1)$$

Onde  $f$  é a frequência da radiação térmica,  $h$  é a famosa constante de Planck, e  $E$  representa a porção mínima de energia. Com esse movimento Planck foi obrigado a assumir que a energia é quantizada, ou seja, possui valores discretos, e não contínuos. Nesse momento é importante destacar que a proposta de Planck não é posterior aos resultados obtidos pelo físico John Rayleigh. Planck apresentou seu trabalho à Sociedade de Física de Berlim em 19 de outubro de 1900. Somente em 1905 James Jeans iria corrigir a expressão de Rayleigh e obter a famosa *lei de Rayleigh-Jeans*<sup>8</sup>.

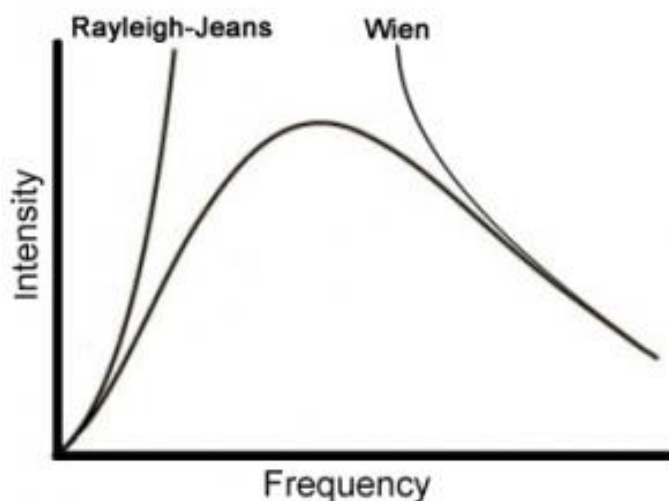


Figura 17 – Incompatibilidade entre teórica clássica e resultados experimentais.  
Disponível em: <[www.cuentos-cuanticos.com/2012/05/04/cuerpo-negro/](http://www.cuentos-cuanticos.com/2012/05/04/cuerpo-negro/)>.

<sup>8</sup> Essas informações foram retiradas do artigo: *Sobre a Lei de Rayleigh-Jeans*, de José Maria Filardo Bassalo (1996).

## Aprofundamento

### 4.2 – A proposta de Planck e o conceito de quantização<sup>9</sup>

Talvez o leitor desatento não tenha noção da trágica consequência da teoria de Planck para a comunidade científica. Para melhor ilustrar esse “absurdo”, vamos imaginar uma situação clássica e óbvia para nossa experiência cotidiana. Na figura abaixo vemos um corpo qualquer sobre uma superfície horizontal preso por uma mola fixa na parede. Esse objeto tem liberdade de transitar por toda a direção  $x$ , sendo possível medir sua energia total, seja qual for a distensão ou contração da mola. Esse sistema oscilatório certamente não se comporta de uma maneira estranha à nossa intuição clássica e costumeira.

Ao aplicarmos os princípios de Planck ao exemplo o sistema se torna fora do comum. Não seria possível medir qualquer valor de energia para esse sistema. Isso equivale a dizer que *apenas alguns valores de energia são permitidos*. Como vimos anteriormente, Planck imaginava

que a superfície dos corpos era formada por pequenas partículas dotadas de carga elétrica, entrelaçados e vibrando numa certa frequência.

Planck assumiu que esses valores são derivados de uma porção mínima de energia que foi chamada de *quantum* ( $E = h.f$ ). Um *quantum* é a quantidade mínima de energia emitida ou absorvida por um oscilador com frequência  $f$ , isto significa que a energia total é um múltiplo inteiro de  $h.f$ . A palavra quantum, no plural *quanta*, provém do latim e é definida como *quantidade determinada*. Essa radiação emitida é de natureza monocromática, já que está relacionada apenas a um valor de frequência.

No contexto da Física, ou da matemática, as palavras *discreto* ou *quantizado* são usadas em oposição a *contínuo*. Por exemplo, a matéria é quantizada; a massa de uma pepita de ouro é igual à soma da massa de todos os átomos de ouro, em outras palavras, são múltiplos

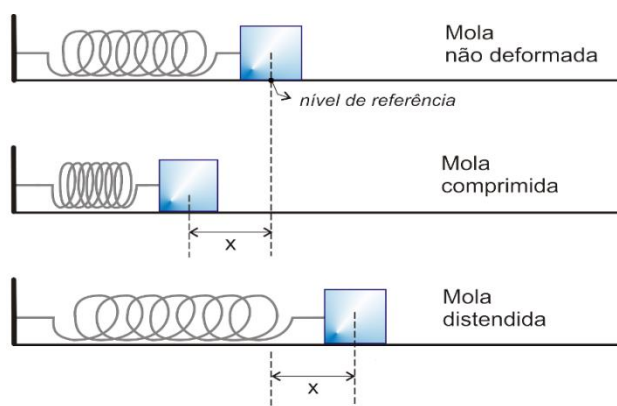


Figura 18 – Oscilador massa-mola clássico.

Disponível em:

[osfundamentosdafisica.blogspot.com.br/blog-mec](http://osfundamentosdafisica.blogspot.com.br/blog-mec).

<sup>9</sup> Texto extraído e parcialmente adaptado dos livros *Física 3*, de Gualter José Biscuola, Newton Villas-Bôas e Ricardo Helou Doca (2013). *Física Conceitual*, de Paul G. Hewitt (2011).



inteiros da massa de um único átomo. A moeda de qualquer país também é quantizada. Existe uma menor parte das quais as partes maiores são múltiplos inteiros. Sabemos que R\$ 1,00 equivale a 100 moedas de 1,0 centavo, ou seja, não existe quantidade menor que 1,0 centavo, todos derivam dele. Já no caso da medição da rapidez de um automóvel, temos o exemplo de uma grandeza contínua, e não discreta, pois a velocidade pode assumir qualquer valor, de zero até um valor máximo. Outro exemplo de continuidade está no espectro da luz solar, uma união ininterrupta de cores que vai do vermelho ao violeta.

A forma como Planck imaginou o movimento dos átomos na superfície dos corpos negros é semelhante a um conjunto de osciladores entrelaçados que se movimentam com certa frequência e emitem radiação em valores pré-determinados por múltiplos de uma constante. De fato, a aceitação e compreensão dessa teoria não são ações triviais, isso é análogo a dizer que a chama de uma fogueira pode ter apenas temperaturas de 450 °C e 451 °C, mas nunca 450,5 °C. Por mais estranha que pareça, foi através da *quantização da energia* que Planck, mesmo relutante, forneceu as bases para a Mecânica Quântica. A constante de Planck, de valor muito pequeno  $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J.s}$  tem uma importância na Física Moderna semelhante à velocidade da luz,  $c$ , outra constante fundamental para a ciência, em especial para a Relatividade.

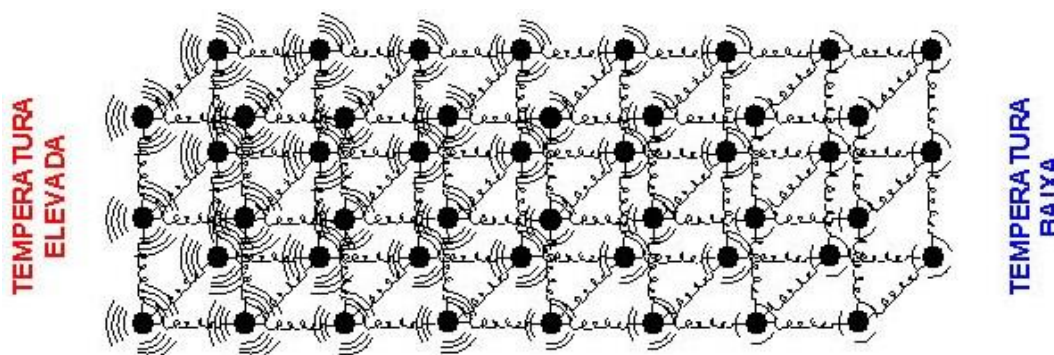


Figura 19 – Representação do movimento dos átomos na superfície dos corpos.  
Disponível em: <[www.curtindoaciencia.blogspot.com.br/fisica-do-cotidiano-porque-os-vidros.html](http://www.curtindoaciencia.blogspot.com.br/fisica-do-cotidiano-porque-os-vidros.html)>.

Somente dessa forma Planck conseguiu adequar os experimentos à teoria. Segundo ele, foi um ato de total desespero para encontrar a resolução para o problema da emissão de radiação dos corpos negros. Nas palavras do próprio Planck: “[...] era uma hipótese puramente formal, e não lhe dei muita atenção, adotando-a porque era preciso, a qualquer preço, encontrar uma explicação teórica.” (Newton, Gualter, Helou, p. 293). Somente alguns anos depois a “porção” fundamental da energia foi chamada de *fóton*, uma quantidade mínima de radiação eletromagnética.

---

## Questões para interpretar e criticar<sup>10</sup>

---

- 1) Qual a contribuição da teoria eletromagnética de Maxwell para o estudo da Mecânica Quântica?
- 2) Entrando num quarto que esteja bem escuro, certamente não seria possível ver os objetos que ali estão. Mas, se todos os corpos emitem radiação térmica, como não conseguimos enxergá-los?
- 3) O que significa dizer que a energia é quantizada? Como isso se relaciona com o termo *quantum*?
- 4) Qual a energia total contida em um feixe monocromático formado por  $n$  fótons de frequência  $f$ ?
- 5) Qual tipo de radiação possui os menores *quanta* de energia, a luz vermelha ou a luz azul? As ondas de rádio ou as de raios X?

---

<sup>10</sup> As questões 4 e 5 foram retiradas e parcialmente adaptadas do livro *Física Conceitual*, de Paul G. Hewitt (2011).

## PARTE 2 – Interação entre radiação e matéria

### 5 - O efeito fotoelétrico<sup>11</sup>

Outro exemplo de incompatibilidade dos resultados empíricos com a teoria clássica é o *efeito fotoelétrico*, observado em 1872 pelo russo Alexander Stoletov (1839-1896). 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 quando uma das placas era atingida pela luz de uma lâmpada de mercúrio. Essa corrente cessava quando as placas deixavam de ser iluminadas.

O efeito fotoelétrico foi notado mais tarde, em 1888, pelo físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), que também foi o responsável por detectar a existência das radiações eletromagnéticas propostas por Maxwell em 1860 (seção 1.1). Ambos chegaram a uma conclusão geral: quando a luz atinge uma placa metálica, cargas elétricas podem absorver energia suficiente para escaparem dela.

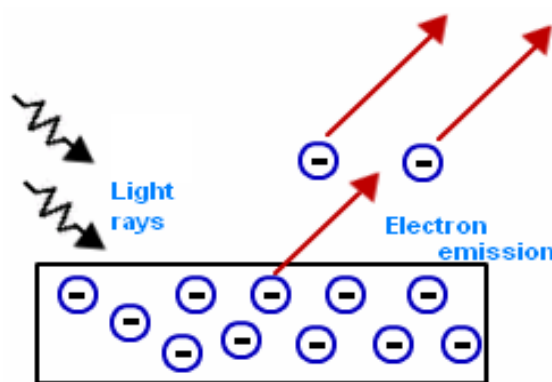


Figura 20 – Efeito fotoelétrico. Disponível em: <<http://physics.tutorvista.com/modern-phsl>>.

#### 5.1 – Os problemas clássicos do efeito fotoelétrico<sup>12</sup>

De acordo com a Física Clássica a ocorrência do efeito fotoelétrico é possível, já que a luz é composta por radiações eletromagnéticas que interagem com os elétrons livres do material, ejetando os mais fracamente ligados às moléculas. Em 1903 um colega de Hertz, Phillip von Lenard (1862-1947), contribuiu para estabelecer algumas conclusões a respeito do

<sup>11</sup> Texto extraído e parcialmente adaptado do livro *Física 3*, de Gualter José Biscuola, Newton Villas-Bôas e Ricardo Helou Doca (2013).

<sup>12</sup> Texto extraído e parcialmente adaptado do livro *Física 3*, de Gualter José Biscuola, Newton Villas-Bôas e Ricardo Helou Doca (2013) e também de *Física em contextos: pessoal, social e histórico*, de Maurício Pietrocola... [et al.] (2010).



efeito fotoelétrico que não acordavam com a teoria clássica das ondas eletromagnéticas de Maxwell:

I) A quantidade de luz que atinge a placa não é pré-requisito para fazer o processo acontecer mais rápido, mas sim a coloração da luz emitida pela fonte. Em outras palavras, a intensidade da fonte luminosa não está relacionada com a energia dos elétrons, e sim a frequência da luz incidente. A intensidade luminosa afeta somente na quantidade de elétrons ejetados da placa (fotoelétrons) e não na velocidade deles.

Problema I: classicamente isso é uma anomalia, já que quanto mais intensa for a onda eletromagnética mais energia ela terá, sendo assim, os fotoelétrons teriam mais energia cinética.

II) O efeito fotoelétrico só ocorre se a frequência da radiação incidente estiver acima de certo valor mínimo, que depende do material utilizado.

Problema II: a emissão de elétrons deveria depender apenas da intensidade de luz que incide na placa, e não da frequência.

III) Independente da intensidade luminosa, o tempo de espera para que os elétrons sejam ejetados é o mesmo, quase instantâneo, no momento em que luz incide na placa os fotoelétrons se desprendem.

Problema III: quanto menos intensa for a luz, mais tempo os elétrons levariam para acumular toda energia necessária e escapar do metal.

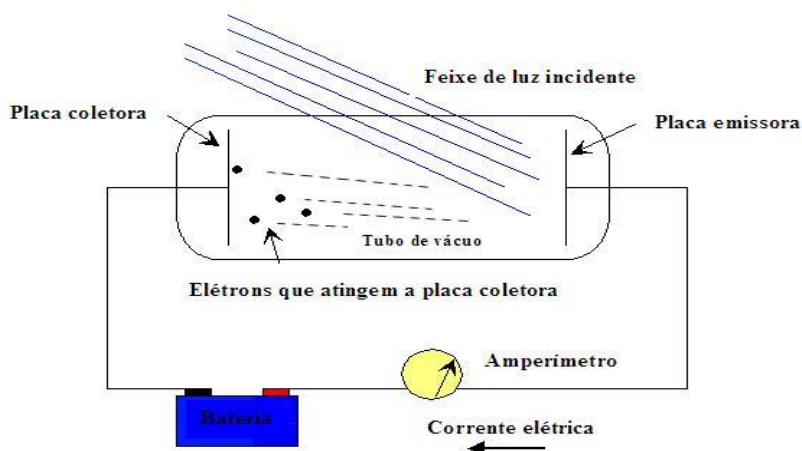


Figura 21 – Arranjo experimental para o efeito fotoelétrico. Disponível em: [http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/m\\_s01.html](http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/m_s01.html).

Os experimentos realizados por Lenard, em 1902, foram investigações decisivas para uma explicação coerente aos problemas apresentados pelo efeito fotoelétrico, que seria feita cerca de três anos depois com o famoso artigo de Albert Einstein.

## 5.2 – Um pouco sobre os semicondutores<sup>13</sup>

Semicondutores são materiais capazes de se comportar como isolantes ou condutores de acordo com a temperatura a que são submetidos. Ao contrário de condutores convencionais, são bons condutores para altas temperaturas, e isolantes para baixas temperaturas. Além do germânio, silício e outros elementos, são semicondutores alguns compostos binários como GaAs (arsenieto de gálio).

Existe um modelo em nível atômico que explica como ocorre a condução elétrica nos materiais. Em qualquer tipo de material, os elétrons que participam da condução elétrica são os que se localizam nas camadas mais distantes do núcleo atômico. De acordo com a *Teoria de Bandas*, os elétrons em um átomo estão disponíveis em níveis permitidos chamados de *bandas de valência* e *bandas de condução*. Na banda de valência estão os elétrons no estado fundamental, isto é, mais fortemente ligados ao núcleo. Para que participem do transporte de energia, os elétrons devem “saltar” para a banda de condução, porém, existe uma lacuna (*gap*) que deve ser vencida pelo elétron.

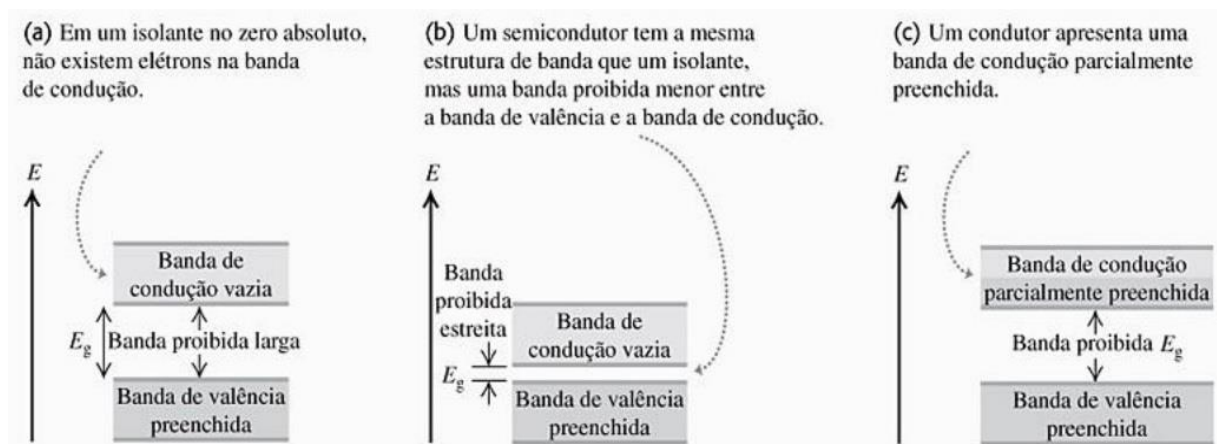


Figura 22 – Bandas de energia. Disponível em: *Física IV – Óptica e Física Moderna*, de Young & Freedman (2009), p. 306. 12ª edição, SP.

<sup>13</sup> Para produção deste tópico foram consultadas as obras: *Física IV – Óptica e Física Moderna*, de Young & Freedman (2009); *Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica*, de Cássio A. Nascimento (2004).

A natureza das bandas de energia determina se um material é isolante, um semicondutor ou um condutor. O que importa, em particular, é a extensão da banda proibida, ou *gap*. A figura acima ilustra a situação das bandas de valência e condução nos três tipos de materiais, assim como a largura da banda proibida. Notamos que, no zero absoluto, os semicondutores são semelhantes aos isolantes, diferenciando pela largura do *gap*.

Em muitos casos, os semicondutores precisam passar por um procedimento chamado de *dopagem*, onde impurezas são adicionadas à estrutura do material. Nos materiais semicondutores do *tipo n*, os portadores de carga negativa são responsáveis pelo transporte de energia, já nos semicondutores do *tipo p*, são os portadores de carga positiva. Os portadores de carga positiva são também chamados de *buracos*; imagine como se fosse a lacuna deixada por um elétron que dali foi removido. Um *diodo semicondutor* é formado pela união de um semicondutor do tipo n e um do tipo p (**junção p-n**). Isso faz com que os elétrons se movam da região *n* para a região *p*, e as lacunas da região *p* para a região *n*. Com as recombinações *elétron-buraco* forma-se uma região de cargas positivas na região *n* e cargas negativas na região *p*. Essa região de cargas – chamada de *região de depleção* – é também uma barreira que impede a continuação do fluxo de portadores de cargas (elétrons e buracos).

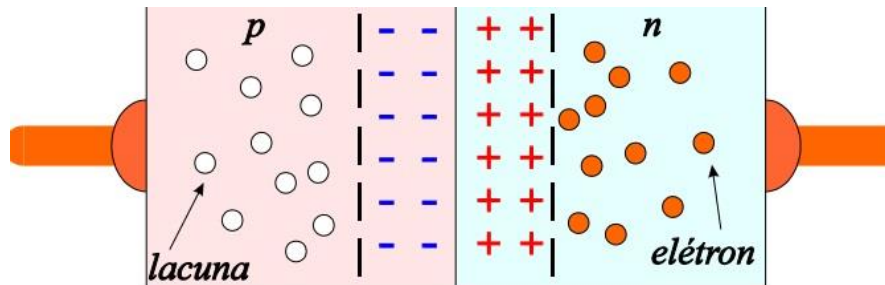


Figura 23 – Diodo semicondutor. Disponível em: *Semicondutores*, de Marcelo Wendling (2009), p. 15, versão 01, SP.

### 5.3 – O efeito fotovoltaico e as células solares

O grande interesse da ciência na explicação de fenômenos desconhecidos é poder utilizá-los em algum tipo de tecnologia. O efeito fotovoltaico foi observado por Edmond Bequerel no ano de 1839, ao notar que duas placas metálicas imersas numa solução produziam uma diferença de potencial quando expostas à luz do Sol. O desenvolvimento das células fotovoltaicas se deu vários anos após a interpretação de Einstein para o efeito fotoelétrico, em particular os semicondutores e a teoria de bandas. Apesar de a explicação do efeito fotoelétrico ter suscitado grandes polêmicas teóricas, o fenômeno foi rapidamente absorvido pela indústria eletrônica para o desenvolvimento de uma série de componentes sensíveis à luz, chamados elementos fotossensíveis. As *células fotoelétricas* ou *fotocélulas* são as principais responsáveis pelo processo de conversão de energia solar em elétrica.



Figura 24 – Relé fotoelétrico e sensor de presença. Disponível em: <http://www.eletroglp.com.br>.



Figura 25 - Célula solar pequena (0,45 W). Disponível em: <https://multilogica-shop.com>.

A captação da energia solar como forma de armazenar energia elétrica é um procedimento muito utilizado dos últimos anos até agora. A luz solar incide nas chamadas placas fotovoltaicas, que são feitas de materiais *semicondutores* fotossensíveis.

As células fotovoltaicas são fabricadas com semicondutores dopados; o silício dopado com boro e fósforo é um tipo comum de célula fotovoltaica, por possuir maior facilidade de absorver a luz. Quando a luz do sol incide sobre o diodo, alguns elétrons adquirem energia e atingem a banda de condução, deixando uma lacuna na banda de valência. Essa produção incessante de pares *elétron/buraco* é separada pelo campo elétrico estabelecido no interior do material. A separação das cargas no interior das células fotovoltaicas é essencial para o estabelecimento de uma diferença de potencial, esta, captada por circuitos externos compostos de capacitores que armazenam a energia transformada.

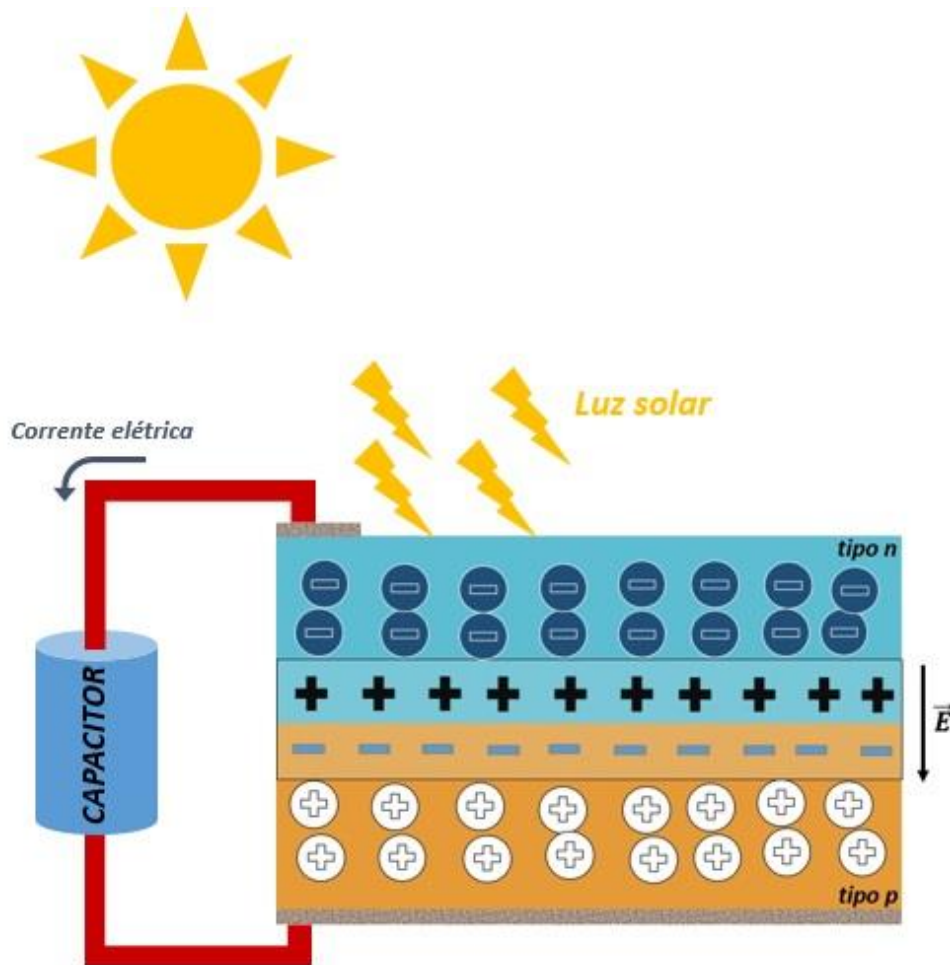


Figura 26 – Esquema de célula fotovoltaica.  
Fonte: *Arquivo pessoal*.

Não devemos confundir esse processo com o efeito fotoelétrico, que ocorre com a retirada de elétrons de um metal através da incidência luminosa. O *efeito fotovoltaico* é o estabelecimento de uma diferença de potencial (tensão, voltagem) no interior de materiais semicondutores devido a energia fornecida pelo Sol. Esse é um dos métodos utilizados para converter energia luminosa em energia elétrica, podendo ser projetado para aplicações que vão da ordem de grandeza de miliwatts a megawatts de potência. Uma grande vantagem é que eles podem ser instalados em áreas remotas de difícil acesso para alimentar pequenas redes elétricas.



Figura 27 – Residência rural no RS. Disponível em:  
<<http://www.americadosol.org/eletrificacao-rural-solar>>.

Ainda com o uso de células fotovoltaicas, podemos citar os veículos de exploração do planeta Marte, que são equipados com painéis solares que geram energia suficiente para manter em funcionamento seus sensores e para se comunicarem com a Terra, recebendo instruções e enviando resultados de suas investigações por meio de ondas eletromagnéticas.





Figura 28 – Sonda espacial Philae. Disponível em: <[www.esa.int](http://www.esa.int)>.

Um exemplo de aplicação para o efeito fotoelétrico está na máquina copiadora. A luz emitida pelo dispositivo (no modo preto/branco) reflete no documento que será copiado e atinge um sensor fotoelétrico. Se a luz incidir em uma parte branca, o percentual de luz refletida será alto e uma corrente fotoelétrica relativamente alta será registrada por um amperímetro. Isso desencadeará um comando no circuito de impressão do tipo “jogue tinta, superfície branca”. Quando a luz atinge uma parte preta do documento, a reflexão é mínima e a corrente fotoelétrica é baixa. O comando ao circuito neste caso é do tipo “não jogue tinta, superfície preta”.

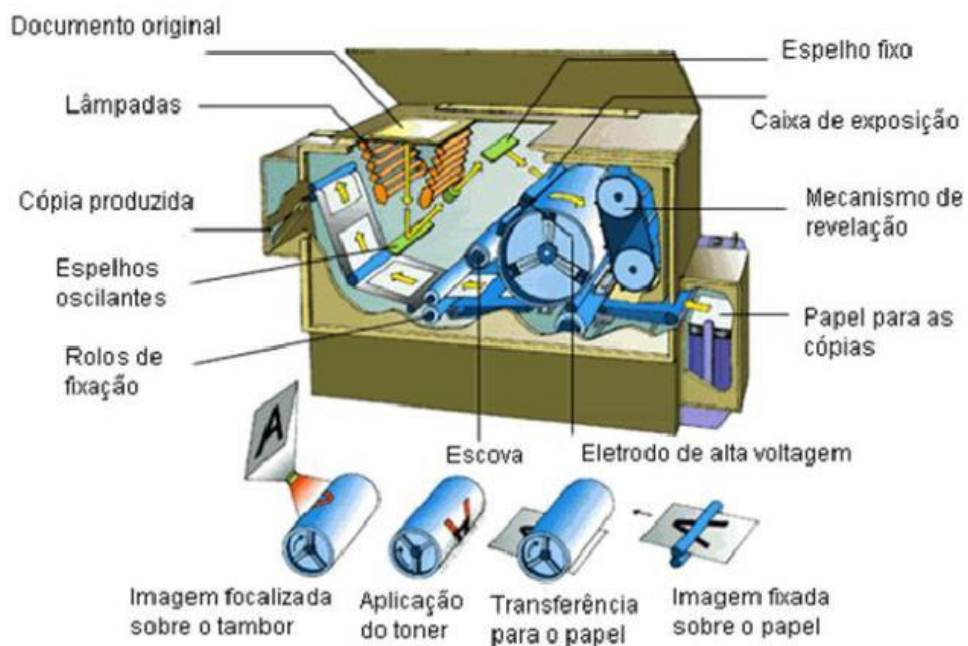


Figura 29 – Máquina copiadora. Disponível em: <<https://marcioleitaexpress.wordpress.com>>.

## Aprofundamento

### 5.4 – A interpretação de Einstein para o efeito fotoelétrico<sup>14</sup>

No ano de 1905 o conhecido físico alemão Albert Einstein (1879-1955) publicou um artigo que continha quatro trabalhos importantes ao desenvolvimento da física, entre eles temos o efeito fotoelétrico e a física relativística. Em “*Sobre um ponto de vista heurístico relativo à produção e transformação da luz*” Einstein explicou o efeito fotoelétrico ao estender a teoria de Planck às radiações eletromagnéticas. É importante deixar claro nesse momento que Planck havia considerado que a emissão da radiação em quantidades permitidas (*quantum de luz*) se dava pela vibração dos átomos, ou seja, ele considerou que a energia *na matéria* está quantizada, mas ainda assim acreditava que a radiação era contínua e composta por ondas. Einstein, por outro lado, atribuiu propriedades semelhantes à *luz*, isto é, ele enxergava a radiação eletromagnética como um conjunto de pequenos pacotes de energia de valor mínimo  $E = h.f$ .

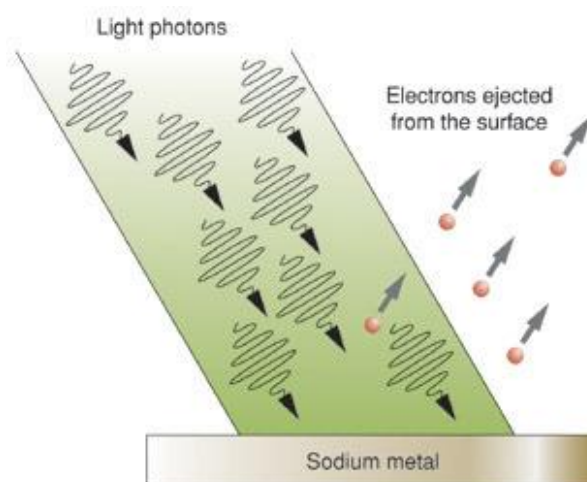


Figura 30 – Fótons de luz. Disponível em: <https://bibliblogue.wordpress.com/tag/efeito-fotoeletrico/>.

Em outro artigo no ano de 1909, Einstein atribuiu um caráter corpuscular para luz, ou seja, a luz é nada menos do que um monte de partículas (mais tarde denominada *fótons*) com valores mínimos de energia. Para simplificar: a radiação eletromagnética, anteriormente tratada

<sup>14</sup> O tópico foi extraído e adaptado das obras: *Física Conceitual*, de Paul G. Hewitt (2011) e também *Física 3*, de Gualter José Biscuola, Newton Villas-Bôas e Ricardo Helou Doca (2013).



como *onda*, agora é composta de partículas materiais! Com essa hipótese ele conseguiu explicar, com simplicidade, os problemas retratados na seção anterior.

De acordo com Einstein, ao penetrar na superfície do metal, cada fóton interage com um elétron, transmitindo-lhe, de forma *instantânea*, toda a sua energia. Um ponto relevante é que essa interação ocorre sempre aos pares - um fóton interage com um elétron. E, além disso, o elétron não pode pegar metade dessa energia, isto é, a energia transferida do fóton ao elétron é “tudo ou nada”. Entretanto, para um elétron abandonar a superfície do metal, é necessário que ele adquira certa quantidade de energia chamada *função trabalho* ( $W$ ). O elétron precisa dessa energia para romper a energia de ligação com os átomos do metal. Essa energia mínima para retirar elétrons é o limite que deve ser superado para que o efeito fotoelétrico ocorra, e quanto mais interno o elétron, maior o valor da função trabalho. Podemos dizer também que o elétron abandona o metal se:

$$\begin{aligned} E &\geq W \\ \text{ou,} \\ h \cdot f &\geq W \end{aligned} \quad (2)$$

Partindo desse ponto de vista, parece razoável que a energia máxima ( $E_{MÁX}$ ) adquirida por um elétron ao escapar da placa metálica seja igual à energia ( $E$ ) cedida por um fóton menos o trabalho realizado para retirar o elétron do metal.

$$E_{MÁX} = E - W = h \cdot f - W \quad (3)$$

Ao serem retirados da placa, os elétrons possuem energia de movimento, ou *energia cinética* ( $E_C$ ), pois estão com velocidade *diferente de zero*. À vista disso, podemos dizer que a energia máxima do elétron equivale à sua energia cinética máxima ( $E_{Cmáx}$ ) adquirida quando retirado do metal.

$$E_{Cmáx} = h \cdot f - W \quad (4)$$

Na relação estabelecida acima fica claro que a função trabalho está relacionada com uma frequência mínima, ou *frequência de corte* ( $f_0$ ) para a ocorrência do efeito fotoelétrico. Se a

energia do fóton for suficiente apenas para arrancar o elétron da placa (vamos admitir que sua energia cinética seja zero) a função trabalho é facilmente formulada.

$$W = h.f_0 \quad (5)$$

A frequência de corte representa uma característica de cada um dos tipos de metais utilizados para o experimento. Fica claro que para acontecer o efeito fotoelétrico não importa a intensidade da luz, mas sim sua frequência, assim sendo:  $f \geq f_0$ . Fazendo uma transposição muito útil, vamos traçar o gráfico da energia adquirida pelos fótons em função da frequência da radiação emitida pela fonte de luz.

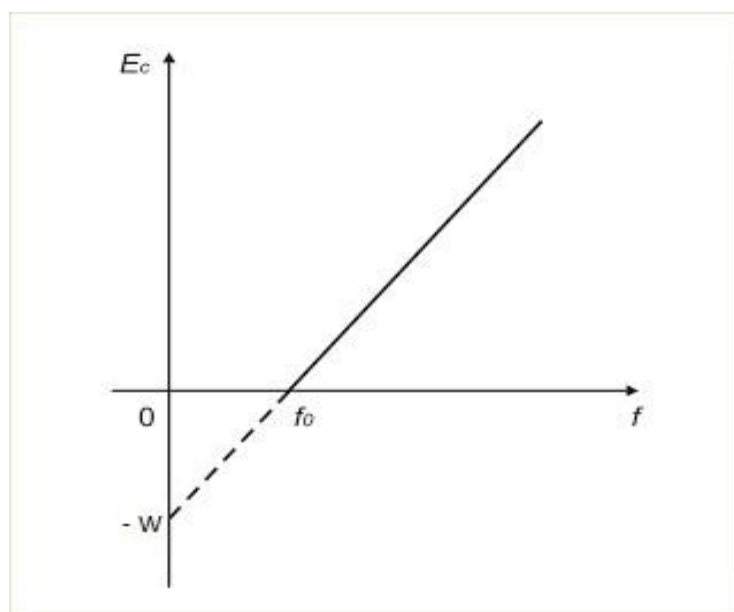


Figura 31 – Gráfico para o efeito fotoelétrico. Disponível em: [www.osfundamentosdafisica.blogspot.com](http://www.osfundamentosdafisica.blogspot.com).

O gráfico acima foi confirmado experimentalmente cerca de 10 anos depois, por Robert Andrews Millikan (1868-1953), um físico estadunidense que, apesar de não acreditar na ideia de fóton de luz, estabeleceu de maneira definitiva a expressão proposta por Einstein e a utilizou para determinar de forma precisa o valor da constante de Planck. Cada aspecto da interpretação de Einstein foi confirmado, incluindo a proporcionalidade direta entre a energia do fóton e a frequência. Foi por isso, e não por sua teoria da relatividade, que Einstein ganhou o prêmio Nobel.

O fato impressionante é que só em 1923, e após descobertas de outras evidências de comportamento quântico, os físicos em geral passaram a aceitar a realidade do fóton. O efeito

fotoelétrico prova conclusivamente que a luz possui propriedades *corpusculares*, isto é, não podemos conceber o fenômeno em termos de ondas.

## 6 – Luz: onda ou matéria?<sup>15</sup>

O debate mais conhecido a respeito da natureza da luz são as calorosas discussões entre o holandês Christiaan Huygens (1629-1695) e o inglês Isaac Newton (1642-1727). Newton afirmava que a luz era um feixe de partículas que tinha origem na fonte de luz, por outro lado, Huygens acreditava que a luz era uma perturbação que ocorria em uma suposta matéria sutil, que ele, assim como vários filósofos gregos, chamava de éter. Mas nem sempre olhares distintos sobre uma mesma teoria é uma atitude maléfica, segundo OGURI e CARUSO (2006): “A discordância pode, algumas vezes, ser indicativa de novos fenômenos e apontar para a necessidade de novas experiências.” (p.350).

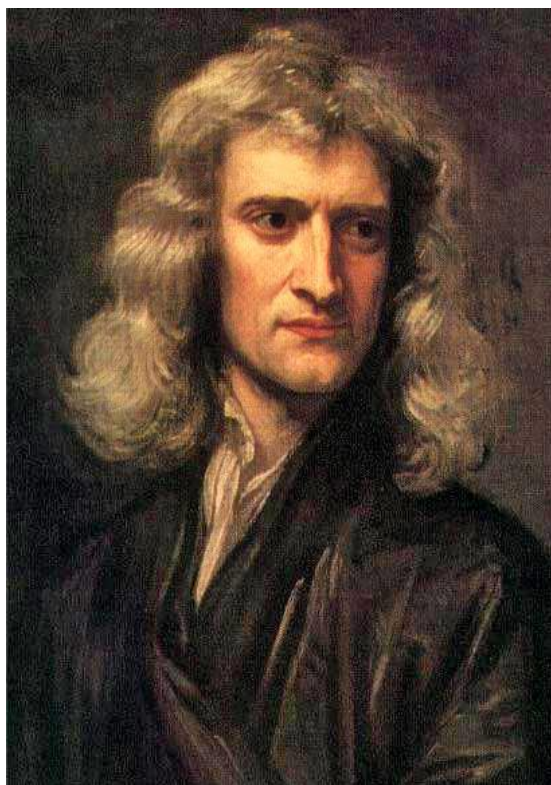


Figura 32 – Isaac Newton (esq.) e Christiaan Huygens (dir.).  
Disponível em: <[www.en.wikipedia.org](http://www.en.wikipedia.org)>.

<sup>15</sup> O tópico foi extraído e adaptado de *Física em contextos: pessoal, social e histórico*, de Maurício Pietrocola... [et al.] (2010) e também *Física Moderna – Origens clássicas e fundamentos quânticos*, de Francisco Caruso e Vitor Oguri (2006).

Os dois modelos para luz apresentados tomavam por base situações físicas do cotidiano, mas, mesmo assim, ambos os modelos continham problemas. Vamos pensar no trajeto da luz entre o Sol e a Terra. Segundo o modelo ondulatório de Huygens, não seria possível a luz chegar até nós se o espaço entre os astros fosse vazio, pois não haveria suporte material para ser propagado. Assim, seguiam um resultado já conhecido na época, que o som não se propaga no vácuo.

Como a luz realmente se propaga do Sol à Terra, as explicações de Newton levam vantagem, pois, como partículas, não havia problema para a luz se propagar. Pensando em outra situação, podemos fazer com que o modelo corpuscular fique em desvantagem. Sabemos que no cruzamento de dois feixes de luz, cada um segue seu caminho sem desvio ou perturbação. Se a luz fosse constituída de partículas, deveriam se chocar na região de cruzamento entre os feixes, o que não ocorre.

O prestígio científico gozado por Isaac Newton fez com que a teoria ondulatória para a luz tivesse poucos adeptos. Somente mais tarde, após as experiências de Young e Fresnel sobre a interferência e difração da luz, somado às medições da velocidade de propagação da luz feitas por Foucault, dentre outras, a situação foi revertida.

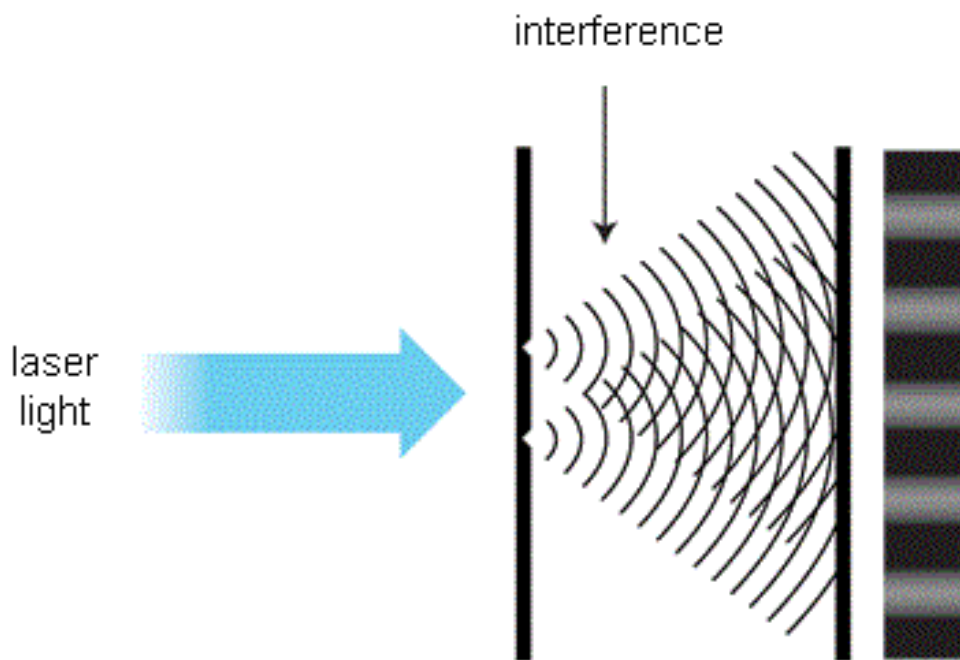


Figura 33 – Esquema do experimento de Young e Fresnel. Disponível em: <[www.bbc.co.uk](http://www.bbc.co.uk)>.

## 6.1 – A dualidade da luz

O fato de a luz estranhamente se apresentar como onda ou partícula condiz a uma rara característica chamada *dualidade*. Como visto nos capítulos de Ondulatória, o experimento de Young mostra que a luz se propaga como se fosse composta por ondas, já que, ao atravessar duas fendas muito pequenas, uma figura com padrões de interferência se forma, fenômeno característico de ondas. Em contrapartida, no efeito fotoelétrico interpretado por Einstein, o elétron é capaz de abandonar a placa metálica quando recebe a energia de um fóton, um pequeno “pacote de luz”. Essa visão trata a luz como sendo composta de inúmeras partículas de energia luminosa, ou fótons.

Talvez nesse momento uma questão intuitiva se manifeste: Como devo tratar a luz, como onda ou partícula? Essa é uma pergunta que até hoje não possui resposta concreta. Uma visão muito aceita é que qualquer tipo de argumentação a respeito da natureza da luz deve ser feita com base em algum momento de interação entre luz e meio. Por exemplo, a valer o efeito fotoelétrico, a luz possui comportamento de partículas, já na experiência da fenda dupla, como ondas. Sendo assim, fica claro que dependendo do experimento considerado a luz pode se comportar como onda ou partícula material, isto é, possui um caráter dual.



Figura 34 – Tirinha dualidade da luz. Disponível em: <<http://www.cbpf.br>>.

---

## Questões para interpretar e criticar

---

- 1) Escreva um parágrafo afim de estabelecer a diferença entre o efeito fotoelétrico e o efeito fotovoltaico.
- 2) O que são materiais semicondutores? Qual a sua importância na construção de células fotoelétricas?
- 3) A ocorrência do efeito fotoelétrico contraria os princípios da Física Clássica? Justifique o seu ponto de vista.
- 4) Como Albert Einstein contribuiu para que o efeito fotoelétrico fosse corretamente interpretado?
- 5) De acordo com as propostas de Einstein para o efeito fotoelétrico, o que significa dizer que todos os metais possuem uma *função trabalho*?
- 6) Neste capítulo percebe-se que a luz foi o foco principal de todas as discussões. Diante disso, o que você pode afirmar a respeito da natureza de um raio de luz: ele é feito de ondas ou partículas? Como você poderia interpretar esse fato?
- 7) As usinas hidrelétricas são responsáveis por grande parte da geração de energia elétrica do Brasil. Os impactos ambientais por trás dessas instalações são grandes, forçando a própria sociedade a utilizar meios menos agressivos ao meio ambiente. Você acha que existem impactos ambientais decorrentes do uso da energia elétrica gerada através da luz solar?



## PARTE 3 - A física quântica na modelagem atômica e produção de luz

### 7 – O átomo de Bohr: um modelo baseado na teoria quântica<sup>16</sup>

A solução para a instabilidade do átomo no modelo de Rutherford e Thomson (veja tópicos 3.1 e 3.2) foi apresentada em 1913, pelo físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962). Em seu artigo intitulado “Sobre a constituição de átomos e moléculas”, Bohr utilizou a estrutura do modelo planetário de Rutherford e incluiu algumas ideias propostas por Max Planck sobre a quantização da energia. Bohr tomou como base o estudo do espectro de emissão do átomo de hidrogênio, que de acordo com a Física Clássica, deveria ser contínuo, e não discreto (quantizado).

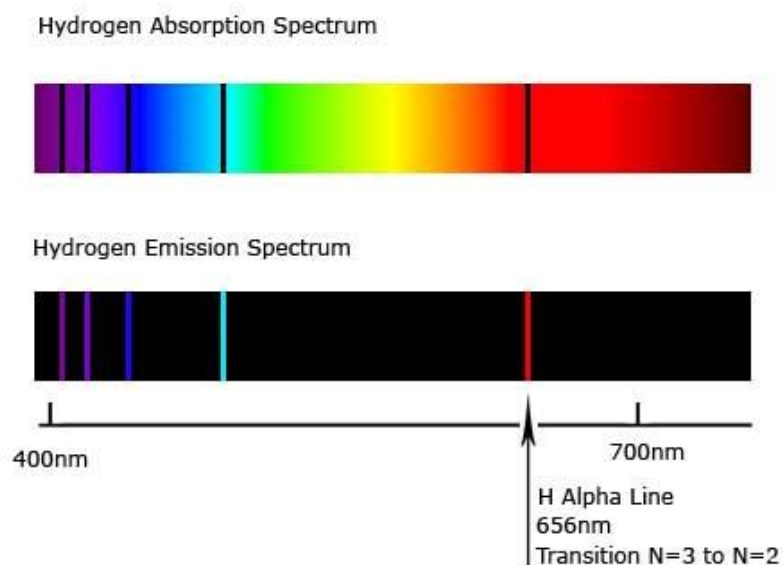


Figura 35 – Espectro de emissão e absorção do Hidrogênio.  
Disponível em: <[www.ramliyana-fisika.blogspot.com](http://www.ramliyana-fisika.blogspot.com)>.

Vamos enumerar as consequências mais importantes do modelo atômico de Bohr:

- Um elétron descreve uma órbita ao redor do núcleo pela ação da força elétrica, obedecendo às leis da mecânica clássica.

<sup>16</sup> O tópico foi parcialmente adaptado de: *Física Moderna – Origens clássicas e fundamentos quânticos*, de Francisco Caruso e Vitor Oguri (2006), e também do artigo da revista *Física na Escola: Os Fundamentos da Luz LASER*, de Vanderlei S. Bagnato. Instituto de Física de São Carlos (2001).

- As órbitas possuem valores de energia definidos e múltiplos inteiros da constante de Planck ( $h$ ). Ou seja, o elétron pode ocupar apenas algumas órbitas.
- O elétron só emite ou absorve energia radiante (fóton) quando transita entre as órbitas, ou *níveis de energia*. Os elétrons não emitem energia quando estão girando em torno do núcleo.
- A frequência dessa energia pode ser calculada através da diferença da energia entre os níveis, ou órbitas. ( $\Delta E = h \cdot f$ ).

As órbitas foram chamadas por Bohr de *estados estacionários* e, portanto, diz-se que o elétron está em um estado estacionário ou nível de energia, cujas órbitas são caracterizadas por um número quântico  $n$ , natural, que pode assumir valores inteiros (1, 2, 3,...). Quando um elétron salta de uma órbita externa para outra interna, ele emite um fóton de energia, e no processo inverso, ele absorve um fóton de energia. Essa transição entre órbitas é conhecida como *transição eletrônica*.

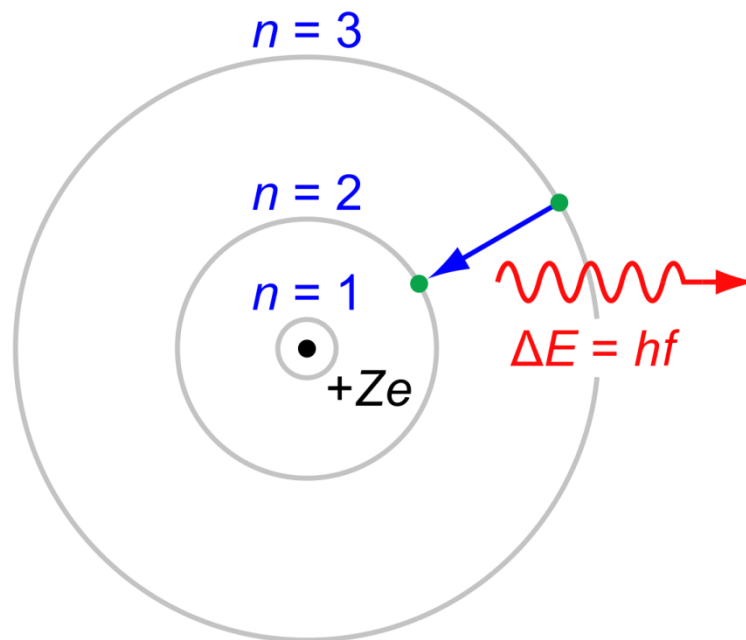


Figura 36 – Transição eletrônica. Disponível em: <[www.en.wikipedia.org](http://www.en.wikipedia.org)>.

Imagine um emissor de elétrons, semelhante a um tubo de Crookes, composto de algum gás rarefeito a baixa pressão. No meio do caminho entre o cátodo e o ânodo, os elétrons emitidos encontram os átomos do gás contido na ampola e chocam-se com eles. Como são os elétrons que rodeiam o núcleo, são eles na verdade que se chocam com os elétrons liberados



pelo catodo. Durante as colisões o elétron livre transmite energia ao elétron do átomo, que adquirindo maior energia, passa para um estado excitado, isto é, uma órbita mais externa. Nessa nova situação ele estará instável, pois a tendência é o elétron orbitar uma região mais próxima ao núcleo, ou seja, um estado fundamental.

Como a nova órbita não é a melhor para ele, depois de certo tempo nessa situação, o elétron retorna ao estado fundamental. O processo de retorno a um nível inferior de energia é acompanhado pela *emissão espontânea* de um fóton que pode ou não sensibilizar nossos órgãos visuais, depende do comprimento de onda da luz emitida. Várias órbitas são possíveis para as quais o elétron pode ir. Quanto mais externa, maior energia possuirá o fóton emitido pelo elétron ao retornar ao estado fundamental. Assim, teremos pulsos diferentes quando o elétron voltar, e isto produz radiação com diferentes comprimentos de onda, como é observado no espectro do hidrogênio.

Quando o próprio Bohr e outros cientistas tentaram aplicar esse modelo a diferentes átomos, verificaram que ele não apresentava resultados tão precisos quanto os obtidos com o átomo de hidrogênio. Mesmo assim esse modelo foi importante por introduzir a ideia de quantização de energia no átomo, mostrando que a produção das linhas espectrais é um fenômeno quântico.

O modelo proposto por Bohr é mais um exemplo da incompatibilidade entre os resultados experimentais e a teoria clássica. Somente acoplando o *quantum* de Planck à teoria, Bohr conseguiu resultados capazes de explicar o espectro discreto emitido por alguns gases. Esse foi um momento histórico que certamente colaborou para o processo da Revolução Científica, já que a proposta de Bohr nos revela que, mais uma vez, os paradigmas praticados pela ciência estavam incorretos e precisavam ser reformulados.

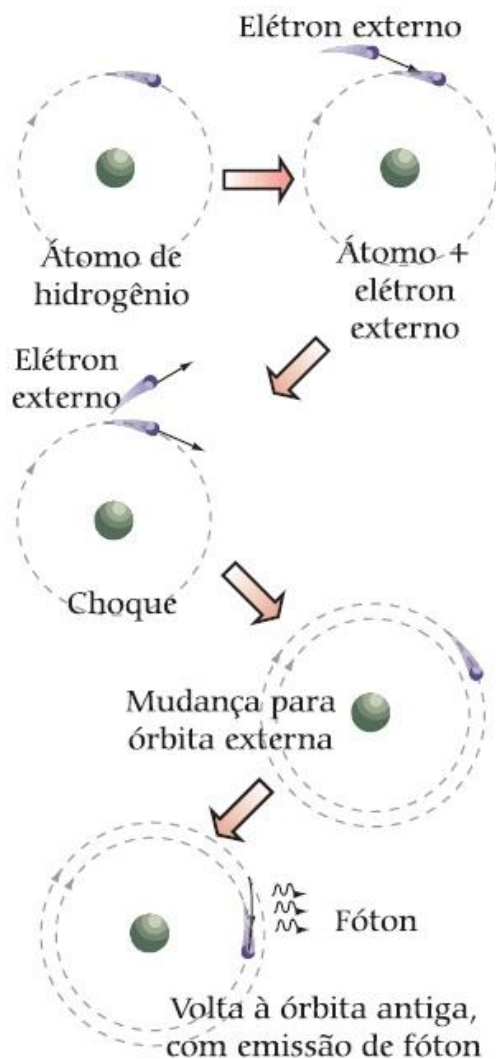
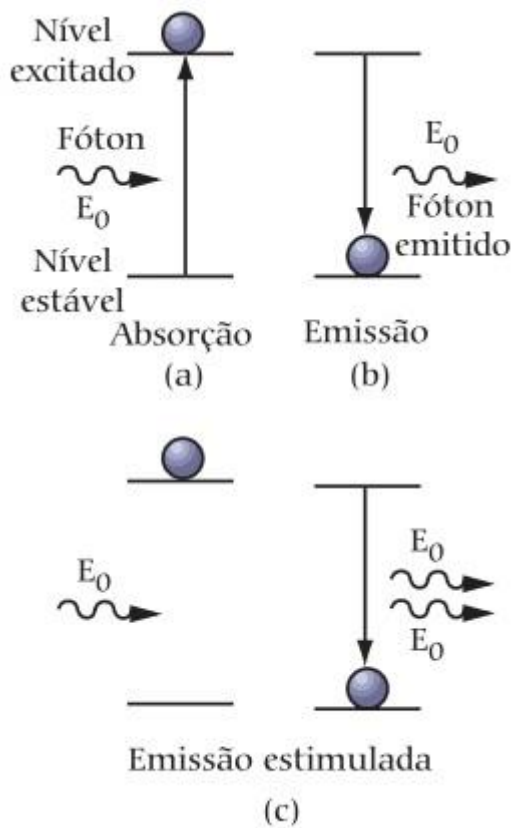


Figura 37 – Emissão de fóton. Disponível em: *Os fundamentos do LASER (Bagnato, 2001), p. 6.*

## Aprofundamento

### 8 – A emissão estimulada<sup>17</sup>

Até agora vimos que a emissão espontânea ocorre quando um elétron se encontra num estado excitado e retorna ao estado fundamental. Existe também um processo conhecido como *emissão estimulada*: vamos supor um elétron que esteja num estado excitado; esse elétron apresenta uma forte tendência em retornar para o estado de menor energia, porém, sozinho, esse processo é relativamente demorado para acontecer, podendo, no entanto, ser acelerado por um



agente externo. Esse agente responsável por fazer o elétron retornar é justamente outro fóton. Assim, um fóton externo *estimula* o decaimento do elétron excitado, e este, emite um fóton que emerge do sistema juntamente com o fóton que o estimulou. Os dois fótons são idênticos e indistinguíveis.

Esses dois fótons que emergiram da emissão estimulada vão perturbar outros átomos com elétrons em seus estados excitados, havendo emissão de mais fótons que se juntam aos iniciais. Veremos a seguir importantes aplicações desse processo que revolucionou os meios tecnológicos, a produção de dispositivos capazes de emitir luz.

Figura 38 – Emissão estimulada.  
Disponível em: *Os fundamentos do LASER (Bagnato, 2001), p. 7.*

<sup>17</sup> Os tópicos 8 e 9.1 foram extraídos e parcialmente adaptados do artigo: *Os Fundamentos da Luz LASER*, de Vanderlei S. Bagnato. Instituto de Física de São Carlos (2001).

## 9 – A produção luminosa e suas aplicações<sup>18</sup>

Uma característica similar dos diversos aparelhos eletrônicos que estamos rodeados é a utilização da luz nos processos funcionais. A luz é o principal responsável pela nossa interação sensorial com o objeto através da visão<sup>19</sup>. No ano de 2013 a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (*UNESCO*) estabeleceu um calendário de atividades para o intitulado Ano Internacional da Luz 2015. De acordo com informações no portal online: “O Ano Internacional da Luz é um projeto de divulgação científica multidisciplinar e educativo que envolve mais de 100 parceiros de 85 países.” (Extraído de: <<http://ail2015.org/index.php/ail2015>>).



Figura 39 – AIL 2015. Disponível em: <<http://ail2015.org>>.

A tecnologia baseada na luz faz parte do motor econômico da sociedade atual. Suas aplicações em saúde, comunicação, economia, ambiente possibilitam conexões com todas as áreas do conhecimento. Vimos nos tópicos anteriores que a luz tem um papel importante nas discussões sobre FMC. Por vários séculos a comunidade científica tentou se aproximar de um modelo que explicasse a natureza da luz de forma satisfatória. Os debates entre Newton e Huygens, além da contribuição de Einstein para o efeito fotoelétrico, foram ações definitivas para estabelecer que a luz se comporta de maneira dual, isto é, onda ou partícula.

<sup>18</sup> Para produção deste tópico foi utilizado como fonte o site do Ano Internacional da Luz, disponível em: <<http://ail2015.org>>.

<sup>19</sup> De fato, uma pessoa com deficiência visual (total ou parcial) terá uma interação diferente com o aparelho, já que os sentidos mais aguçados necessários para o manuseio são tato e audição.

Nos tópicos a seguir vamos compreender duas formas de produção luminosa que fazem parte do nosso cotidiano. A primeira delas é a luz LASER, que utiliza de um meio ativo (sólido ou líquido) confinado por superfícies refletoras. E por fim, os dispositivos emissores de luz baseados nos materiais semicondutores, como por exemplo, LED's e OLED's.

## 9.1 – Fontes de LASER

Uma simples caneta *laser* que nos dias de hoje é facilmente encontrada, está entre uma das inovações tecnológicas (já ultrapassada) mais importantes da segunda metade do século XX. A sigla LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) significa, em português, luz amplificada pela emissão estimulada de radiação. Esse nome foi dado porque a radiação emitida no processo é resultado de várias emissões estimuladas.

Um laser consiste principalmente de três partes. A *primeira* é o chamado meio ativo, que pode ser líquido ou sólido. Essa é a parte do laser que contém os átomos portadores de elétrons responsáveis pela emissão de radiação. O primeiro laser tinha como meio ativo uma barra de rubi, e foi desenvolvido no ano de 1960. Um sistema constitui um bom meio ativo quando os elétrons conseguem permanecer um tempo maior em seu estado excitado ( $10^{-4}$  s), o que normalmente não ultrapassa a marca dos  $10^{-10}$  s.

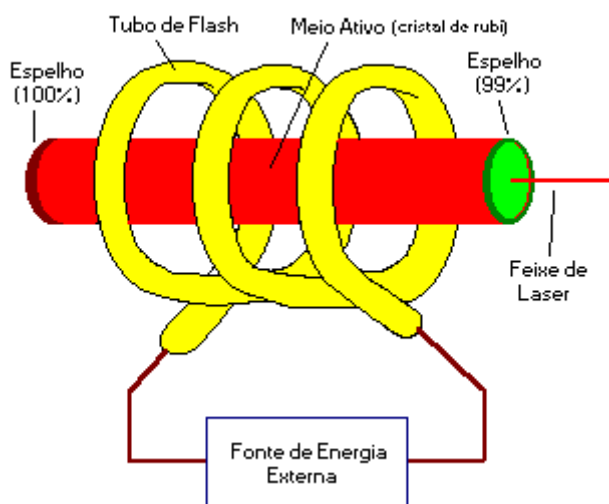


Figura 40 – LASER de rubi.  
Disponível em: <<http://www.seara.ufc.br/especiais/fisica/lasers>>

Se todos os átomos do meio apresentarem elétrons no estado de baixa energia, a ação do laser não será possível, já que não teremos elétrons excitados para iniciar o processo de emissão estimulada, ou mesmo espontânea. E aqui entra a *segunda* parte do laser, uma fonte externa de energia: ela terá a obrigação de atuar no meio ativo para produzir estados excitados. Nesse passo ocorre o que chamamos de *inversão de população*, sendo um estágio fundamental para a produção do laser. Após a inversão de população ter ocorrido, o decaimento espontâneo de um dos átomos para o estado fundamental começa a provocar a emissão estimulada dos demais átomos que, conseqüentemente, produzem luz.

A *terceira* e última parte é a cavidade óptica, ou *ressonador*. Sua função é fazer com que os fótons que emergem do sistema voltem para ele, produzindo mais e mais emissão estimulada. Isso é feito por meio de espelhos colocados nas extremidades dessa cavidade facilitando a reflexão dos fótons. Um desses espelhos possui poder de reflexão em torno de 98%, permitindo que uma pequena quantidade de radiação a atravesse. Assim, essa radiação escapa da cavidade óptica no formato de um raio laser.

Observe o esquema ao lado, em (a), temos um meio ativo com seus átomos no estado fundamental. Uma fonte externa deixa a maioria dos átomos em seus estados excitados, criando o que se chama de uma inversão de população (b). A emissão espontânea de um fóton por um desses átomos, adiciona mais luz à porção já existente (c). Esses fótons se refletem nos espelhos da cavidade, voltando para a amostra e provocando mais emissão estimulada, até que todos tenham decaído (esquemas (d), (e) e (f)). Essa é a máxima quantidade de luz que pode ser extraída desse meio. Uma porção dessa luz emerge do sistema, constituindo o feixe da luz laser (g).

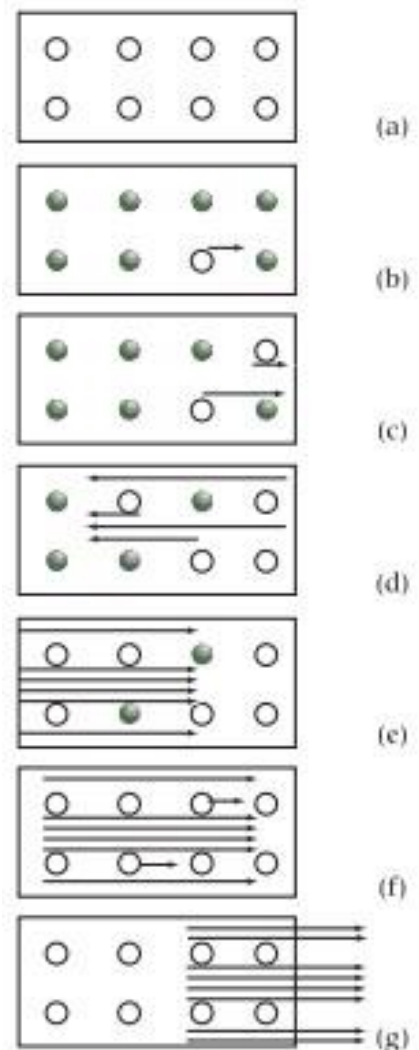


Figura 41 – Esquema para representar as etapas produção da luz LASER. Disponível em: *Os fundamentos do LASER (Bagnato, 2001), p. 8.*

As características da luz laser são as seguintes:

- O feixe de luz laser é monocromático, ou seja, possui determinada energia (frequência).
- A intensidade do feixe é extremamente grande, ao contrário de fontes de luz convencionais. Os lasers pulsados são mais potentes, pois a energia acumulada ao longo do tempo é emitida toda em um curto intervalo.
- O laser constitui de ondas caminhando na mesma direção (unidirecional) e é bastante estreito, havendo o mínimo de dispersão.
- O feixe é coerente, ou seja, todas as ondas estão em fase e ordenadas periodicamente.

Aparelhos que possuem laser estão espalhados por toda parte: leitores de código de barras em bancos e supermercados, cirurgias para correção de problemas visuais, aprisionamento de átomos, remoção de tatuagens, ajuste da precisão de telescópios, reproduções de mídias (CD, DVD, Blu-ray), transporte de dados por fibra óptica, dentre outros. Por exemplo, uma pessoa *míope*, isto é, que tem dificuldades em focalizar pontos distantes, deve passar por um procedimento cirúrgico onde o médico delinea a córnea do paciente utilizando um aparelho a LASER.

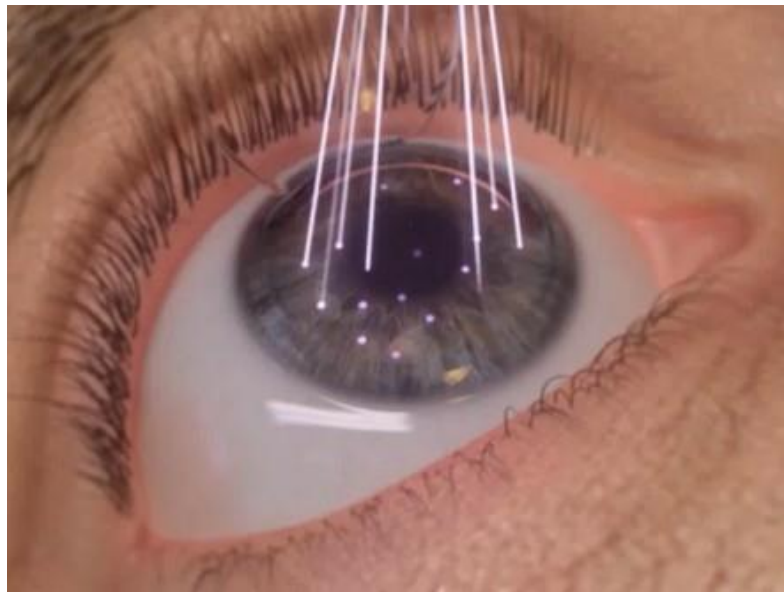


Figura 42 – Cirurgia corretiva a LASER.  
Disponível em: <<http://www.laserocular.com.br/>>.

## 9.2 – LED e OLED: aplicações e potencialidades<sup>20</sup>

A sigla LED vem da abreviação de *light emitter diode*, que significa diodo emissor de luz. Como o próprio nome sugere, LED's são componentes eletrônicos dotados de chips semicondutores que transformam energia elétrica em energia luminosa. Certos diodos são submetidos a uma tensão (voltagem) e passam a emitir luz num comprimento de onda específico.

Como visto no tópico 5.2, os semicondutores são materiais que possuem *condutibilidade* (facilidade de conduzir energia) entre a dos isolantes e a dos condutores. Vimos também que pela união de dois semicondutores – um com excesso de portadores negativos (*tipo n*), e outro com excesso de portadores positivos (*tipo p*) – estabelece-se dentro de material uma barreira de potencial. Essa barreira evita que os portadores de cargas sejam transferidos do lado *n* para o lado *p*, e vice-versa.

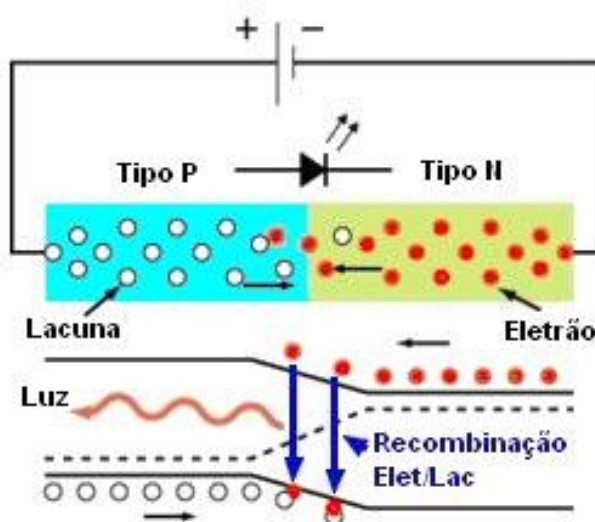


Figura 43 – Emissão de luz por material semicondutor. Disponível em: <http://www.electronica-pt.com/imagens/funcionamento-led.jpg>.

O dispositivo LED é uma junção semicondutora do *tipo p-n* capaz de emitir luz quando o lado *p* é conectado com o polo positivo de uma bateria, e o lado *n* conectado ao polo negativo. Quando isso acontece, os elétrons adquirem energia para vencer a barreira de potencial e

<sup>20</sup> Para a produção do tópico foram consultadas as seguintes fontes: *Física IV – Óptica e Física Moderna*, de Young & Freedman (2009); *Diodos emissores de luz (Leds)*, de Benevides, Bortolosso e Oliveira (2010); Coluna Ciência Hoje: *Luzes do novo século*. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/especiais/premio-nobel-2014/luzes-do-novo-seculo>.



recombinam-se aos buracos que estão no lado *p* da junção. Nas inúmeras recombinações, a luz é então emitida pelos elétrons que “caem” da banda de condução para a banda de valência. Na transição para uma camada inferior, o elétron emite energia na forma de luz (fótons). A cor da luminosidade produzida depende da largura do *band-gap* (banda proibida) de cada um dos arranjos semicondutores.

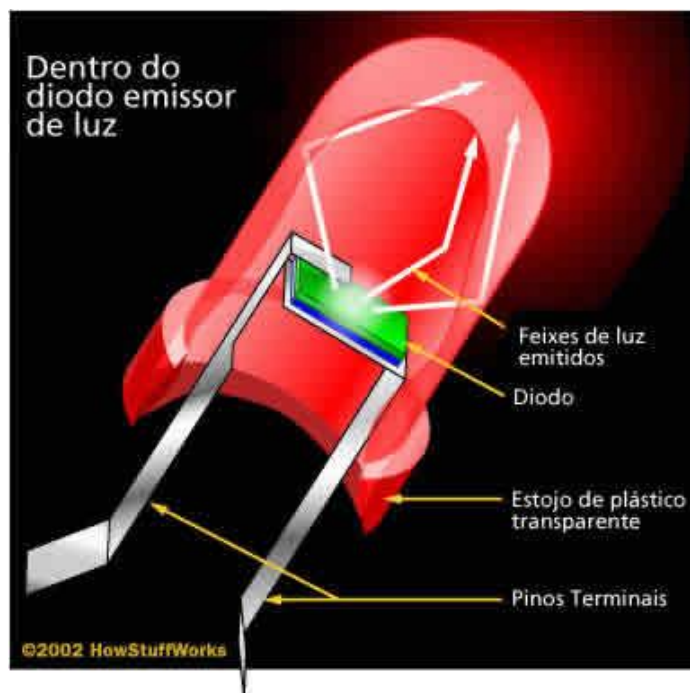


Figura 44 – Interior de uma lâmpada LED. Disponível em: <<http://fiscite.blogspot.com.br/2012/09/tv-led-e-semicondutores.html>>.

É preciso cautela para não confundir esse processo com o *efeito fotovoltaico* – discutido no tópico 5.1 – onde a incidência de ondas eletromagnéticas permite o estabelecimento de uma diferença de potencial; no LED acontece o contrário, necessita-se da diferença de potencial para produção de ondas eletromagnéticas, no caso, luz<sup>21</sup>.

Os LED's revolucionaram a produção de dispositivos emissores de luz, assim, são utilizados em televisores, telefones, interruptores, painéis informativos e também na parte de sinalização de trânsito. O que mais chama a atenção nos últimos anos é o espaço que as lâmpadas de LED para uso residencial/comercial vêm adquirindo; destacando-se pela economia e durabilidade quando comparadas com lâmpadas incandescentes e fluorescentes.

<sup>21</sup> Nesse momento, a discussão sobre a natureza da luz enquanto onda ou partícula é irrelevante; a proposta é apenas ilustrar a diferença do comportamento do diodo semicondutor nos LED's e nas placas fotovoltaicas.



O prêmio Nobel em Física do ano de 2014 foi para um grupo de japoneses que desenvolveram um material capaz de emitir luz no comprimento de onda da cor azul. Diodos emissores de luz verde, vermelha e amarela são conhecidos desde a década de 60. Somente no ano de 2014 foi possível a combinação de materiais semicondutores adequados que possibilitam a emissão da luz azul. Dessa forma, o trio de cores R-G-B (vermelho-verde-azul), agora pode ser produzido via estado sólido, assim com a luz branca, que é a união de cores do trio.

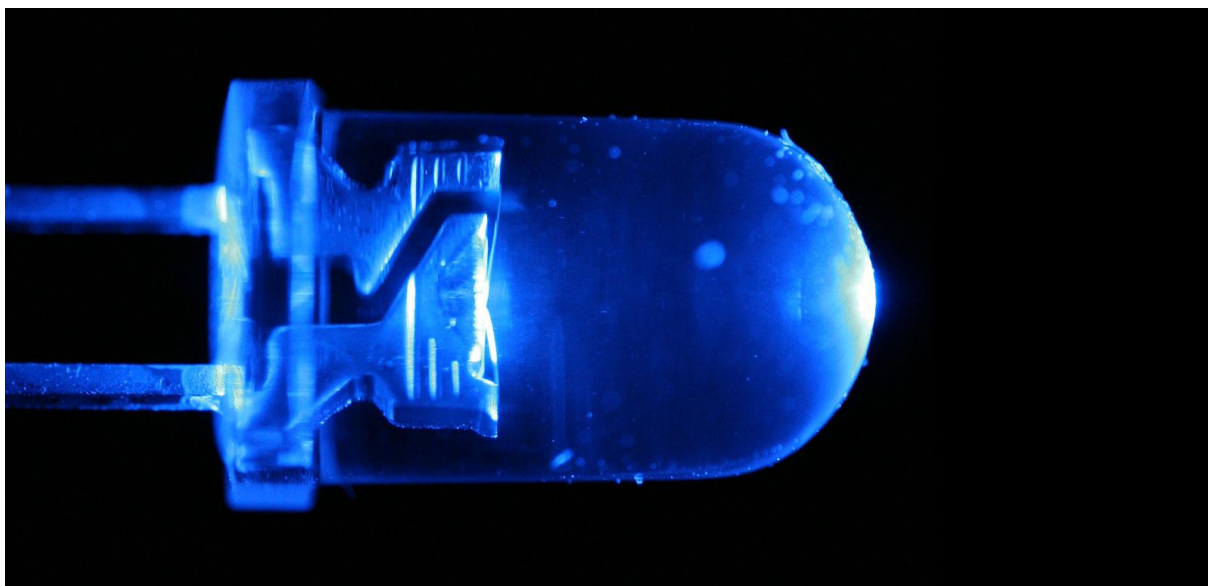


Figura 45 – LED azul. Disponível em: <<http://elsalmon.org/el-presente-es-azul-como-el-led-azul/>>.

Outra forma promissora de emissão luminosa se dá através do uso de semicondutores orgânicos, ou *diodo orgânico emissor de luz* (OLED). As moléculas de carbono que compõem os diodos emitem luz quando percorridas por uma corrente elétrica. Ao contrário dos LED's, as películas de semicondutores orgânicos podem ser aplicadas diretamente à tela, por um método de impressão. Quando submetidos a uma diferença de potencial, inicia-se o fluxo de portadores através do material. Semelhante aos LED's, os elétrons recombina-se com lacunas e emitem luz. Uma grande vantagem do uso de OLED's é que o próprio material é responsável pela emissão de luz, ou seja, não há necessidade de uma matriz de LED's traseira para iluminar a tela.



Figura 46 – Tela OLED Flexível. Disponível em: <<http://info.abril.com.br/samsung-oled-flexivel/>>.

Mesmo sendo um tipo de tecnologia com melhor custo benefício, as TV's com tela de OLED possuem preços muito altos quando se comparadas com telas de LCD, LED e plasma. Outro ponto negativo é a durabilidade; os semicondutores orgânicos possuem uma vida útil quase duas vezes menor que os semicondutores das telas de LED.

As telas de OLED certamente farão parte das novas gerações de display para smartphones e também para televisores. Além da melhor qualidade no brilho, contraste e ângulo de visão, as telas de diodos orgânicos são resistentes e maleáveis, resistindo a esforços como dobraduras, quedas, pancadas, etc.



Figura 46 – TV OLED 55 polegadas com tela curvilínea.  
Disponível em: <<http://qualtvcomprar.com.br/lg-oled-de-55-polegadas-menos-de-1-mm-e-so-2-kg/>>.

---

## Questões para interpretar e criticar

---

- 1) Na teoria atômica de Bohr, os elétrons descrevem órbitas em regiões preestabelecidas. Como se denominam essas regiões? E o que faz o elétron quando “transita” entre elas?
- 2) Baseado nos níveis de energia ocupados por elétrons, o que acontece quando fótons incidem sobre um átomo?
- 3) Explique de forma sucinta como se dá a produção de luz através da emissão estimulada. Utilize o LASER como exemplo.
- 4) Dentre todas as características da luz LASER, como você explicaria sua capacidade de percorrer grandes distâncias?
- 5) Qual a diferença no modo de propagação da luz emitida via LASER e através de um LED?
- 6) Cite algumas vantagens e desvantagens em substituir as lâmpadas incandescentes e fluorescentes da sua casa por lâmpadas de LED.

## Referências Bibliográficas

ANO INTERNACIONAL DA LUZ. **Sobre o ano internacional da luz**. Disponível em: <<http://ail2015.org/index.php/ail2015/>>. Acesso em: 24-08-2015.

BENEVIDES, A.B.Y., BORTOLOSO, C., OLIVEIRA, M.B. **Diodos emissores de luz (LEDs)**. 2010. 20f. Apostila da disciplina Circuitos Eletrônicos Integrados. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.

BAGNATO, V.S. Os Fundamentos da Luz LASER. **Física na Escola**, v. 2, n.2, p. 4-9. São Carlos - SP, 2001.

BASSALO, J. M. F. Sobre a Lei de Rayleigh-Jeans. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 18, n. 1, p. 30-32. Belém - PA, 1996.

BISCUOLA, G.J., VILLAS BÔAS, N., DOCA, R.H. **Física 3**. 2ª edição. Editora Saraiva. São Paulo, 2013.

CARUSO, F. OGURI, V. **Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos**. 2ª edição. Editora Campus. Rio de Janeiro. 2006.

GARCIA, M. **Luzes do novo século**. Ciência hoje. 2014. Disponível em: <<http://cienciahoje.uol.com.br/especiais/premio-nobel-2014/luzes-do-novo-seculo>>. Acesso em: 25-08-2015.

HEWITT, P.G. **Física Conceitual**. 11ª edição. Bookman editora. Porto Alegre. 2011.

LASER OCULAR ABC. Centro Oftalmológico. **Miopia, astigmatismo e hipermetropia**. Disponível em: <<http://www.laserocular.com.br/home.php>>. Acesso em: 24-08-2015.

NASCIMENTO, C.A. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. 2004. 21f. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Fontes alternativas de energia). Departamento de Engenharia. Universidade Federal de Lavras, MG.

PIETROCOLA, M., POGIBIN, A., OLIVEIRA, R.C., ROMERO, T.R. **Física em contextos: pessoal, social e histórico**. Volume 03. 2ª edição. FTD editora. São Paulo, 2013.

SANTOS, C. A. **A cereja no bolo da microeletrônica**. Ciência Hoje. 2013. Disponível em: <<http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/do-laboratorio-para-a-fabrica/a-cereja-no-bolo-da-microeletronica>>. Acesso em: 24-06-2015.

\_\_\_\_\_. Será quântico o computador comprado pelo Google? Ciência Hoje. 2013. Disponível em: <<http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/do-laboratorio-para-a-fabrica/sera-quantico-o-computador-comprado-pelo-google>>. Acesso em: 25-06-2015.

WENDLING, M. Semicondutores. Universidade Estadual Paulista. Colégio Técnico Industrial Prof. Carlos Augusto Patrício Amorim, campus Guaratinguetá. Versão 01, 2009.

YOUNG, H.D. FREEDMAN, R.A. **Física 4: Ótica e Física Moderna**. 12<sup>a</sup> edição. Pearson Education do Brasil. São Paulo. 2009.