



As equações de Maxwell e a Luz, História, Conceitos e Definições

Caracterização de Biomoléculas - BBM5007

Profa. Dra. Patricia Targon Campana

Grupo de Biomateriais e Espectroscopia



pcampana@usp.br



sciencenebula.tumblr.com



Sala 339C – Titanic



[/Campana.PT](https://www.facebook.com/Campana.PT)



ramal: 3091-8883



[@profaPCampana](https://twitter.com/profaPCampana)



O que é luz?



Sempre nos indagamos a respeito de sua natureza

Platão (427-347AC): todo objeto visível emite uma corrente constante de partículas luminosas captadas pelos olhos

Aristóteles (384-322AC): acreditava sair de nossos olhos uma onda vibratória que atingia os objetos e tornava-os visíveis.

Duas teorias para a natureza da luz:

Partículas **ou** Ondas

O pessoal da teoria de partículas dizia que a luz se comportava como gotas de água saindo de uma mangueira

O pessoal da teoria ondulatória imaginava que a luz se comportava igualmente a ondas formadas por uma pedra ao cair em um lago.



Heron de Alexandria (10AC-75): as leis básicas de Reflexão e Propagação Retilínea da Luz

Mas... notou-se que a luz parecia mudar de direção no novo meio líquido

1621: Wilbord Snell (1580-1626) descobriu experimentalmente a Lei da Refração:
ao penetrar num novo meio os raios mudam de direção continuando a se propagar em
linha reta após a mudança de meio

1678: Christiaan Huygens (1629-1695) o quanto a luz era desviada da sua trajetória inicial
dependia da velocidade que a luz atravessava no meio.

A luz como um movimento ondulatório → **o índice de refração** maior quanto menor fosse a
velocidade com a qual a luz penetrasse no meio

Como partícula: num meio mais denso, a velocidade seria maior, porque as partículas seriam atraídas pelas moléculas → idéia defendida por Isaac
Newton (1643-1727).



a teoria ondulatória deveria:

explicar como a luz propagava-se no vácuo (como é o caso da luz do Sol que chega na Terra)
...mas, de acordo com a teoria ondulatória que se tinha na época as ondas precisavam de um meio para se propagarem

Para resolver esse impasse: → Huygens: existência de um meio elástico e imponderável: éter

a teoria de partículas deveria:

lidar com o fato de que dois raios luminosos cruzam-se sem que um interfira no outro

Apesar de seus problemas: durante ~ todo o século XVIII a teoria corpuscular prevaleceu

principalmente em razão do maior prestígio de Newton no meio científico



Mas, outros experimentos reforçavam o caráter ondulatório da luz
Difração (estudado pelo cientista italiano Francesco Grimaldi)

Padrões de Interferência produzidos pela luz ao atravessar uma fenda (Franjas de Young, Thomas Young).

Leon Foucault: mostra que a velocidade da luz era menor na água que no ar, como previa Huygens

Passa a predominar a teoria ondulatória

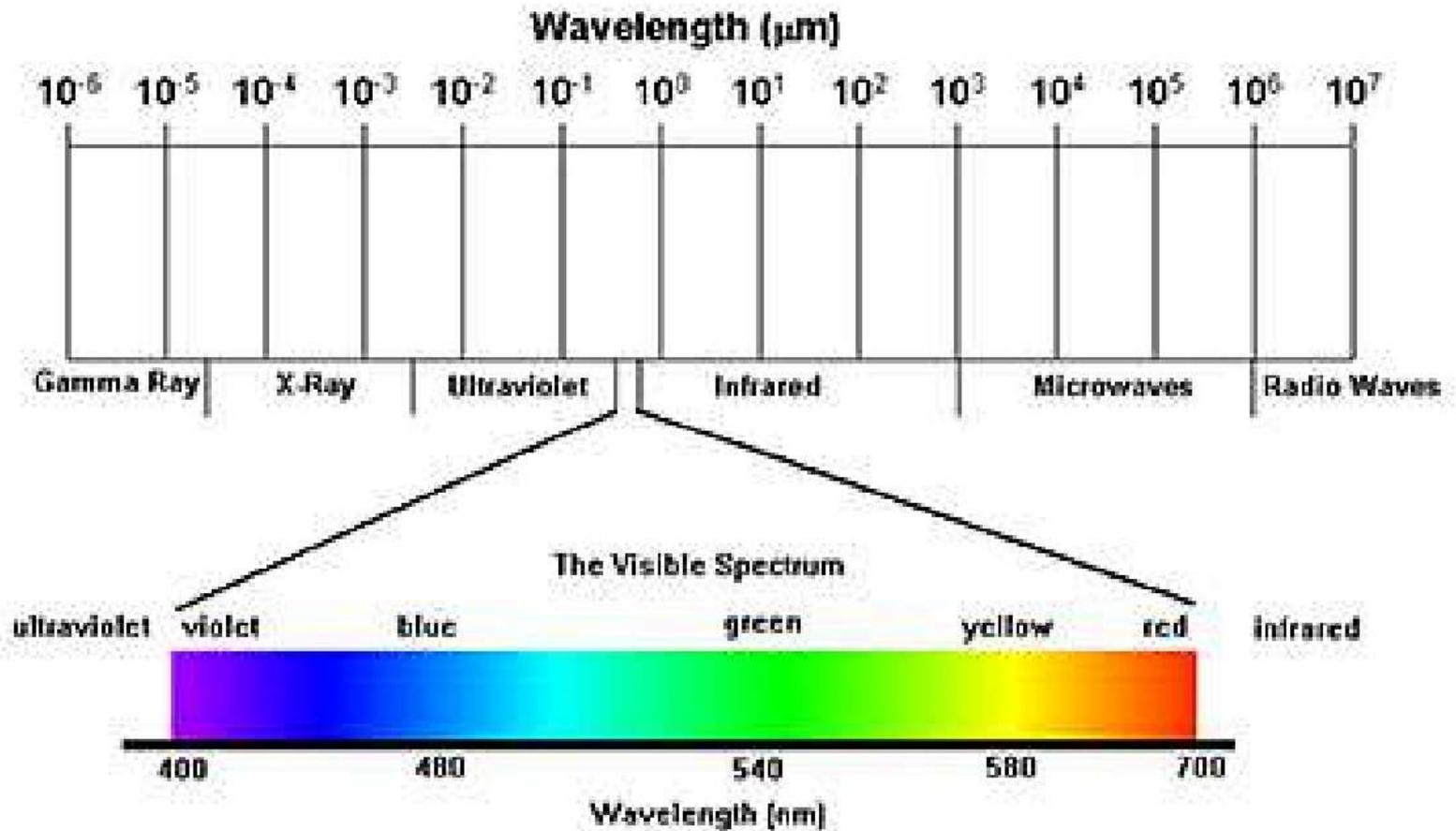


Aperfeiçoada até a

teoria ondulatória eletromagnética do físico escocês James Clerk Maxwell (1865) que propôs ser a luz constituída pelas denominadas ondas eletromagnéticas, e que **a luz visível era apenas uma pequena parte (que pode ser enxergada por nós) de um espectro muito maior**



A arco-íris de Maxwell





Escreveu.....

...baseado em:

1. Lei de Gauss para a eletricidade

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Da Lei de Coulomb:

numa superfície esférica fechada:

Deriva-se a Lei de Gauss: $\epsilon_0 \phi = q_{env}$

2. Lei de Gauss para o magnetismo

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Como não existem monopólos magnéticos, o fluxo de B para fora é sempre igual ao de B para dentro da superfície gaussiana

3. Lei de Faraday para a indução

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Lei de Faraday: a variação temporal de um campo magnético no espaço gera campo elétrico caso

$$\frac{\Delta \vec{B}}{\Delta t} \Rightarrow \vec{E}$$

4. Lei de Ampère-Maxwell

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

B induzidos e Lei de Ampère,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \cdot \frac{d\Phi_E}{dt}$$

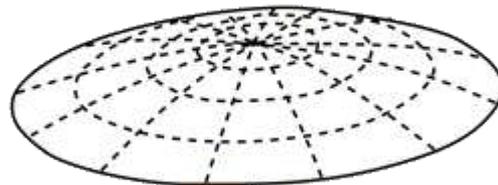
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i \cdot$$



As equações de Maxwell contém a função de onda para as ondas eletromagnéticas:

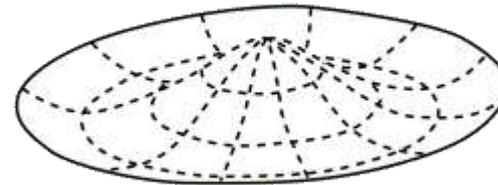
$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2}$$

Mode 01

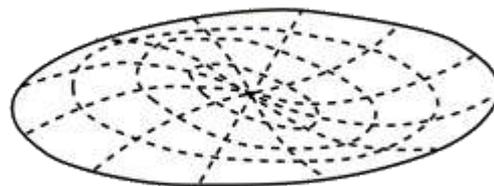


This is the lowest frequency mode f_1

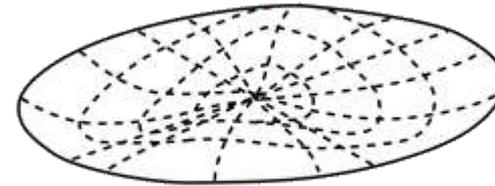
02

 $2.30 f_1$

Mode 11

 $1.59 f_1$

21

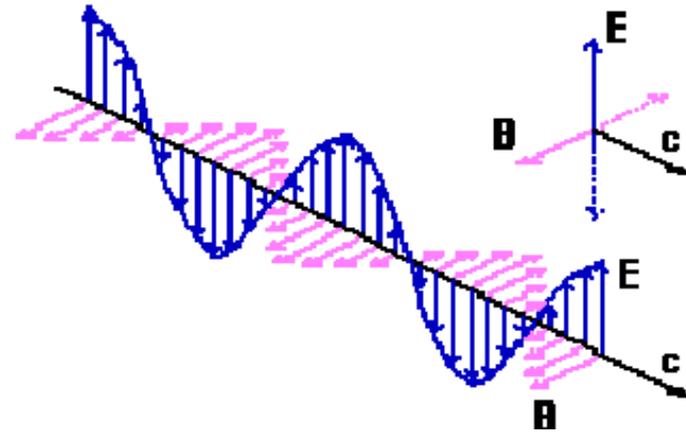
 $2.14 f_1$



Cujas soluções mais simples podem ser:

$$E = E_{\max} \cos (kx - \omega t), \text{ onde } k = 2\pi/\lambda \quad \text{e} \quad \omega = 2\pi f$$

$$B = B_{\max} \cos (kx - \omega t)$$



Carrega energia na forma:

$$\frac{1}{\mu_0} \cdot \mathbf{E} \times \mathbf{B} = \mathbf{S} \text{ (vetor de Poynting)}$$

$$\mu_0$$

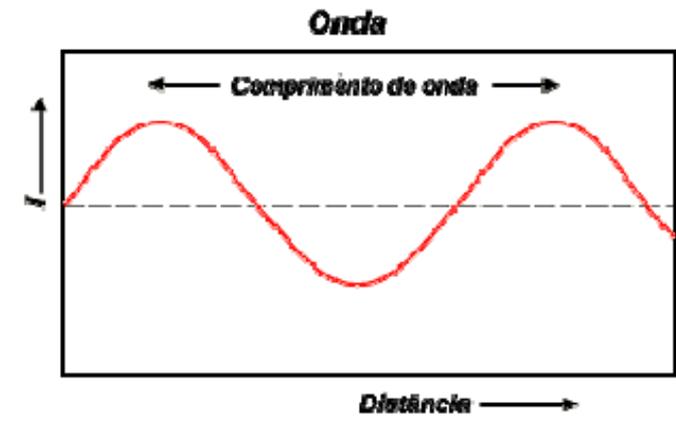


Obedece à Teoria Ondulatória

onda transversal

Comprimento }
 Freqüência } característicos

A luz como onda





A luz também pode ser medida pela sua frequência, que é chamada ν . A frequência, por definição refere-se ao inverso do tempo de repetição, ou seja do tempo gasto pela onda para repetir sua condição inicial. No caso da luz visível a frequência está relacionada com a “cor” desta, por exemplo no espectro visível, a luz vermelha tem uma frequência menor que luz azul.

$$\nu = c/\lambda$$

A velocidade \mathbf{v} da luz em um meio que não seja ar ou vácuo depende das características desse meio.

O índice de refração n é um parâmetro que caracteriza um meio óptico e é definido:

$$n = c/\mathbf{v}$$

Como $c > \mathbf{v}$ para qualquer meio óptico, então sempre teremos $n > 1$. Para ar ou vácuo, temos $n = 1$.



Os valores de n para outros meios estão relacionados na tabela a seguir:

Índice de Refração de Algumas Substâncias (Valores Correspondentes à Luz Amarela)

Substância	n
Ar (CNPT)	1,000
Água a 20°C	1,333
Acetona a 20°C	1,358
Etanol a 20°C	1,360
Diamante	2,4168
Cristal de quartzo	1,553
Quartzo fundido	1,458
<i>Flint glass</i>	1,650
Cloreto de sódio	1,544
Lente do olho	1,424
Humor vítreo	1,336

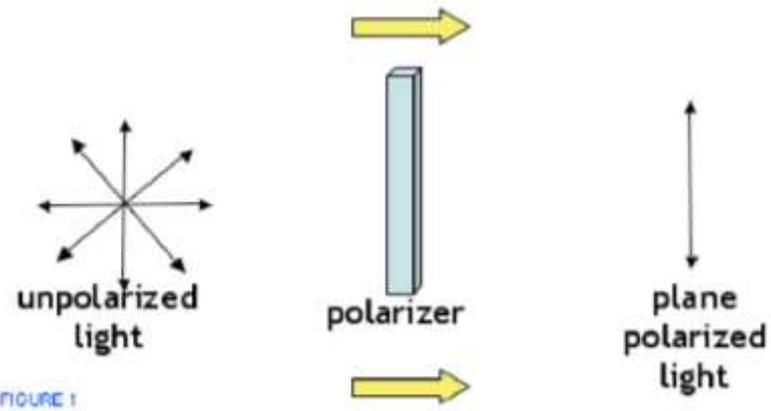


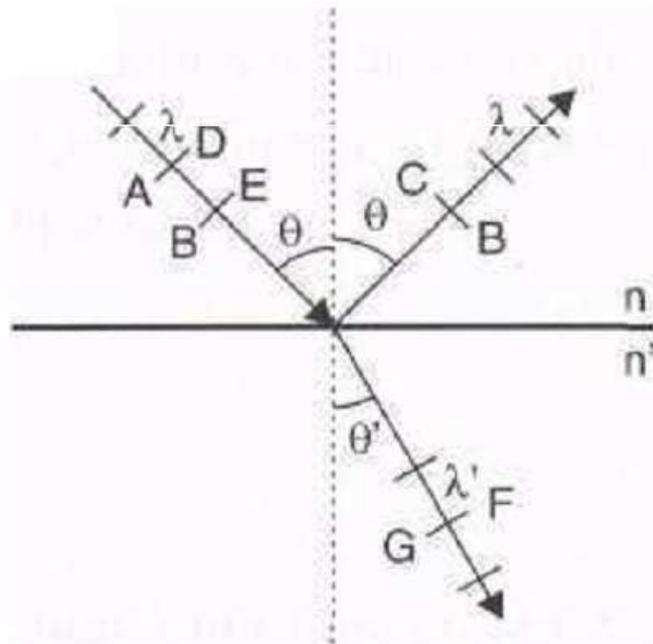
FIGURE 1



Polarisation of light



Toda vez que a luz incide sobre a superfície que separa dois meios ópticos, que são **transparentes à luz**, essa será **refletida e refratada**. O comprimento da onda refletida (λ_{reflet}) será o mesmo que o da onda incidente (λ_{incid}); já o comprimento da onda refratada (λ_{refrat}) será diferente.



$$n \cdot \sin \theta = n' \cdot \sin \theta'$$



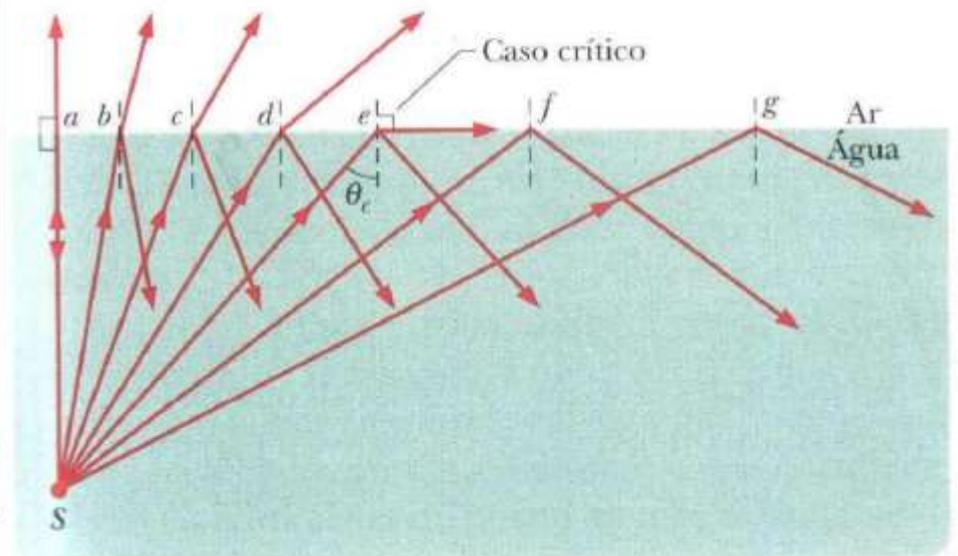
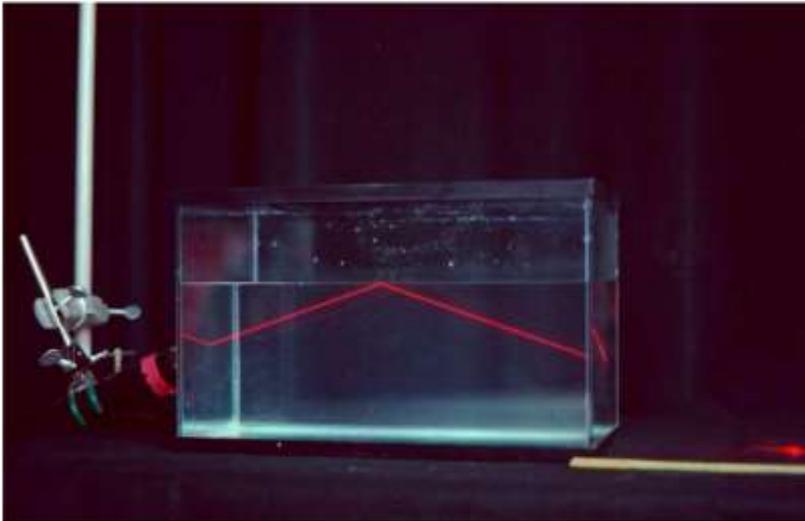
Dispersão cromática

Se n depende de λ \longrightarrow O ângulo de refração será diferente para diferentes raios luminosos





Reflexão interna total





O comportamento das coisas em relação à luz

Produtores ou fontes

(transformam outras fontes de energia em energia luminosa)

Lâmpada incandescente

Chama de vela

Sol

Lanterna

Lâmpada de néon

Botão do interruptor ou tomada de material fosforescente

Lâmpada fluorescente

Fogo

Estrela

Fonte laser

Lâmpada ultravioleta

Flash



Refletores

(devolvem luz)

Luz	Tela de cinema
Objetos (roupas, paredes, etc.) brancos ou coloridos	Espelho
	Superfície interna da fibra ótica

Refratores

(deixam passar a luz)

Lente	Lupa
Atmosfera	Fibra ótica
Líquido transparente	Filtro de luz
Vidro transparente	Óculos

Absorvedores

(transformam energia luminosa em outras fontes de energia)

Filtros de luz	Atmosfera
Célula fotoelétrica	Filme fotográfico
Plantas	Objetos (roupas, paredes, etc) escuros



A teoria ondulatória seria universalmente aceita se ao final do séc. XIX novas experiências não tivessem mostrado algumas de suas falhas...

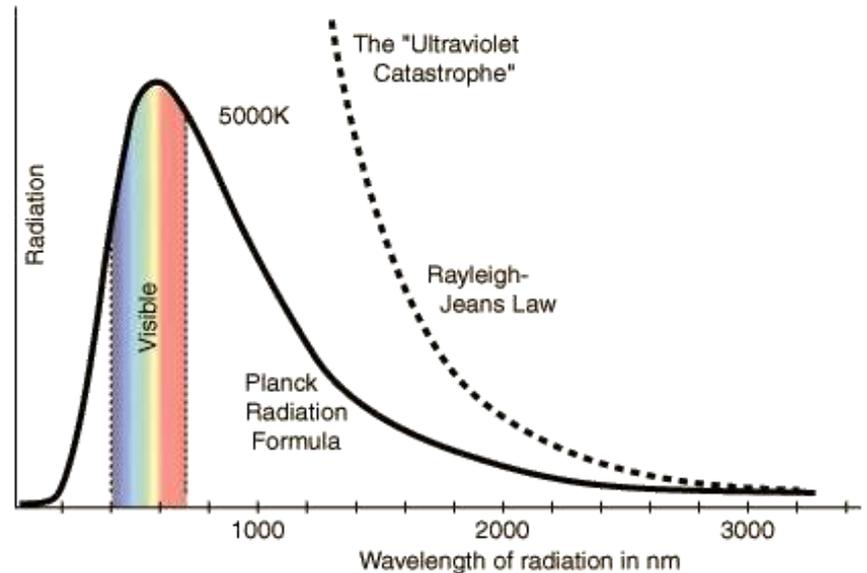
- Radiação de corpo negro:

Classicamente: partículas carregadas são aceleradas próximas à superfície do corpo que emite ondas de calor

$$\frac{P}{A} = e\sigma T^4$$

$$\lambda_{\text{peak}} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$$

Problemas...





Em 1900, Planck propõe “pequenos osciladores” na superfície do corpo negro, relacionados às cargas de suas moléculas.

$$E = n h f$$

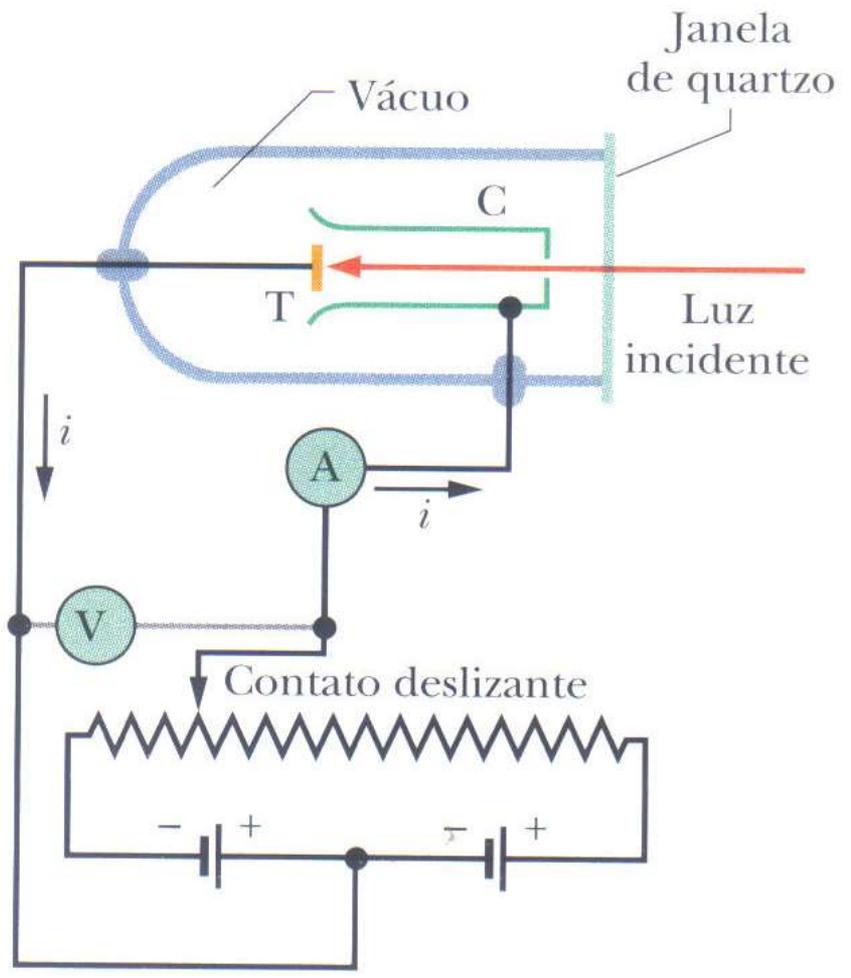
A energia destes “pequenos osciladores” é quantizada (admite somente certos valores discretos) e eles emitem e absorvem energia nestes valores discretos.

Tão inovadora era a ideia da quantização que até o Planck duvidava!!



- Efeito fotoelétrico:

Emissão de elétrons de superfícies metálicas por incidência luminosa.



$$K_{\max} = e V_{\text{corte}}$$



Classicamente

1. Dependência da energia cinética dos elétrons com a intensidade luminosa: absorção contínua de energia pelos elétrons
2. Tempo entre a incidência da luz e ejeção de elétrons: se a luz for fraca, o material precisa absorver a energia por um tempo até que esta seja suficientemente acumulada para que haja a ejeção
3. Dependência da ejeção de elétrons com a frequência da luz: os elétrons deveriam ser ejetados a qualquer frequência, bastava que a intensidade fosse suficientemente alta para acumular energia
4. Dependência da energia cinética dos elétrons ejetados com a frequência da luz: não havia nenhuma...

Problemas:

1. Elétrons emitidos imediatamente
2. Aumentar a intensidade luminosa não aumentava a energia cinética dos elétrons emitidos
3. Luz vermelha não causava ejeção nunca
4. Luz violeta fraca causava ejeção de poucos elétrons com energia cinética maior do que os com luz mais intensas mas de comprimentos de onda maiores (frequências menores)



Em 1905: Albert Einstein explica o fenômeno

Ele propôs que a teoria ondulatória era incompleta, e que a luz poderia ter características de partículas também. Demonstrou, matematicamente que um elétron liberado deveria receber uma certa quantidade de energia, que segundo ele seria proveniente de uma partícula radiante (“partícula de luz”), chamando essa energia de fóton ou quantum de energia. Então, quanto maior a frequência da onda (luz) maior seria a energia que ele poderia liberar.

a luz tem dupla natureza, corpuscular e ondulatória (**dualidade onda-partícula**)

se explicam todos os fenômenos ópticos, uns com a teoria ondulatória, outros com a corpuscular



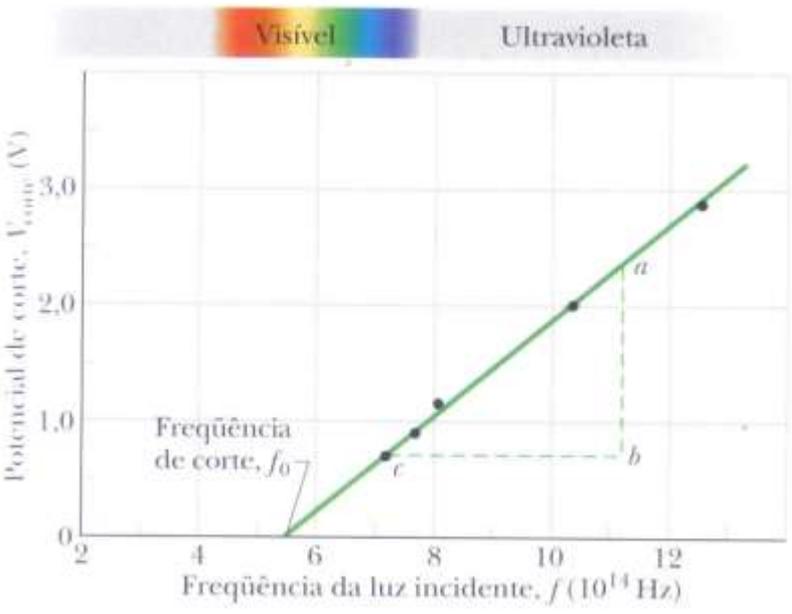
Se o comprimento de onda da luz for λ , seu quantum de energia ΔE será definido como:

$$\Delta E = hc/\lambda \quad \text{Equação de Planck-Einstein}$$

h é a constante de Planck de valor $6,626 \times 10^{-34}$ J.s

c é a velocidade da luz no ar ou no vácuo de valor constante 3×10^8 m/s.

$$hf = K_{\text{máx}} + \Phi \quad (\text{equação do efeito fotoelétrico})$$



CONSERVAÇÃO DE ENERGIA



Referências

Em adição à bibliografia recomendada no curso:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/music/cirmem.html#c2>

[MBD Alchemie](#) (canal do YouTube)