

Evolução da Astronomia Moderna - 2

Revisão

Efeito Doppler

Dualidade Onda-Partícula

IAGUSP

Sandra dos Anjos

<http://astroweb.iag.usp.br/~aga210/>

Ondas Eletromagnéticas

...quando a fonte está em movimento as ondas eletromagnéticas se modificam

Christian Doppler, em 1842, e Hippolyte Fizeau, em 1848, explicam a **mudança de frequência** de uma onda quando a **fonte está em movimento** em relação ao observador.

Este fenômeno ocorre também com ondas mecânicas (som, p.ex.) e ondas eletromagnéticas (luz, p.ex.).



Christian Andreas Doppler
(1803 - 1853)



Hippolyte Fizeau
(1819 - 1896)

Efeito Doppler

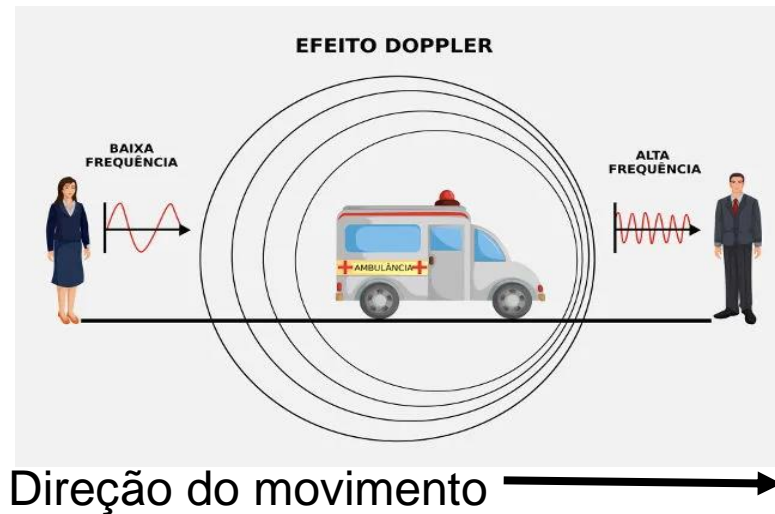
Mudança na frequência ou no comprimento de onda, devido ao **movimento relativo** entre a **fonte** (λ_{obs} - **medido**) e o “**observador**” (λ_0 - **em repouso**, linhas de biblioteca ou de laboratório). Fenômeno que ocorre com o som e a luz

Fonte se afasta

Frequência (ν) diminui, comprimento de onda aumenta e como consequência o som fica mais grave.

No caso da luz ela ficaria mais vermelha

Sirene de um carro de polícia



Fonte se aproxima

Frequência (ν) aumenta, o comprimento de onda diminui e como consequência o som fica mais agudo.

No caso da luz, ficaria mais azul

A equação que permite obter a velocidade radial (v_r) é dada por :

$$\frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}$$

Se v_r é **positivo**, a fonte está se afastando, pois o comprimento de onda observado é maior que o de repouso (ver próximo slide). Se **o sinal é negativo** a fonte está se aproximando e o comprimento de onda diminui.

Ver simulação em <http://astro.unl.edu/classaction/light.html>

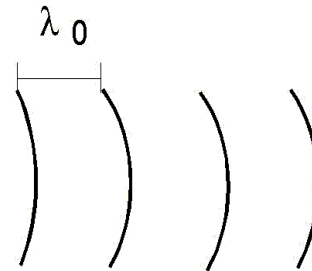
Efeito Doppler

...vai ocorrer uma mudança na frequência e no comprimento de onda quando a fonte está em movimento....

...Lembrando que: $c = \lambda v$

Fonte em repouso, emitindo luz a um comprimento de onda λ_0 .

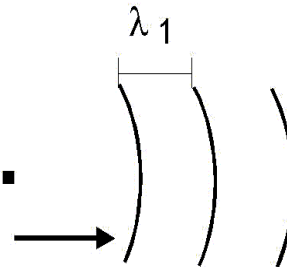
repouso ■



$$v_0 = \frac{c}{\lambda_0}$$

Fonte aproxima-se do observador => comprimento de onda observado será menor ($\lambda_1 < \lambda_0$).

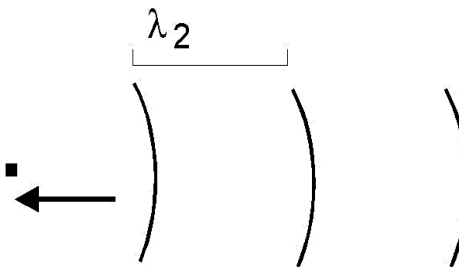
aproximação ■



$$v_1 = \frac{c}{\lambda_1}$$

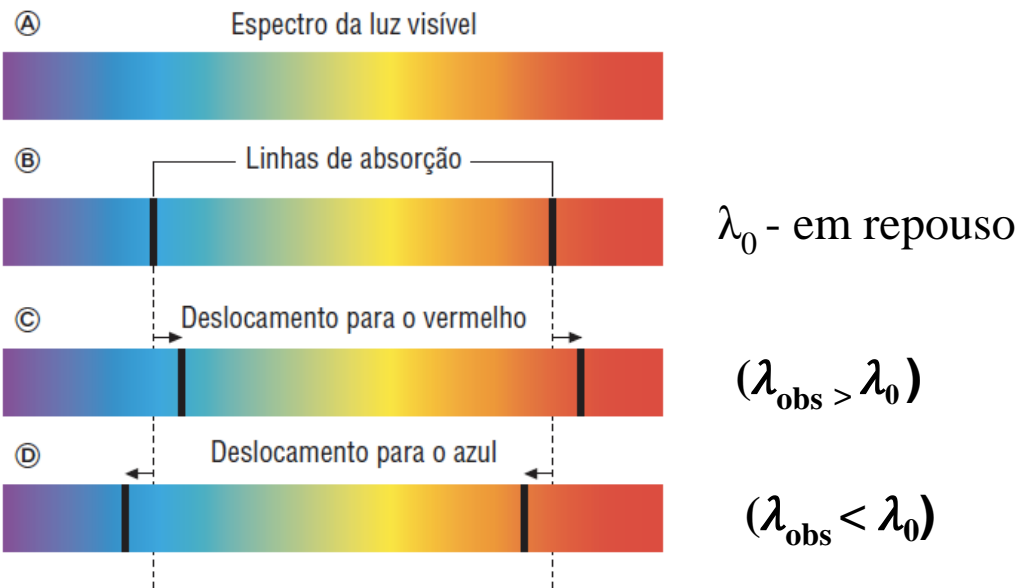
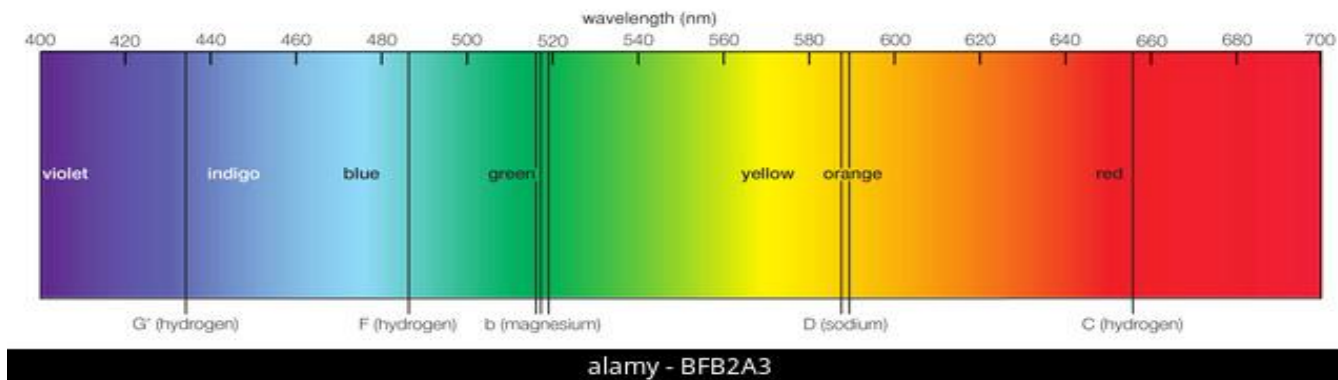
Fonte afasta-se: comprimento de onda observado será maior ($\lambda_2 > \lambda_0$).

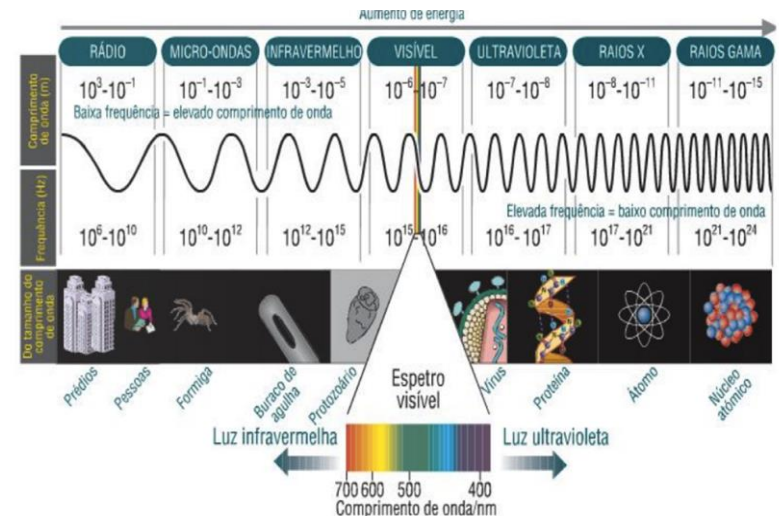
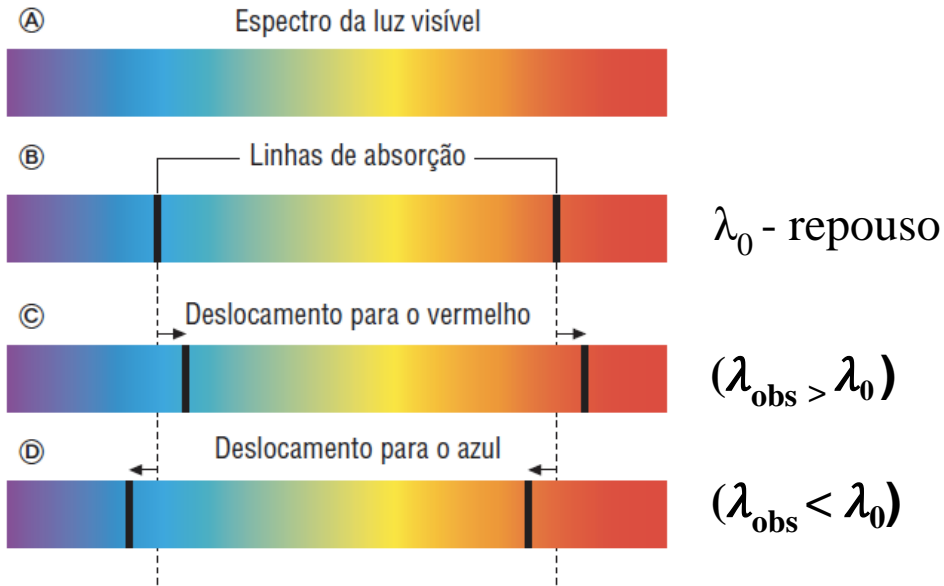
afastamento ■



$$v_2 = \frac{c}{\lambda_2}$$

...e como identificar este fenômeno na Astrofísica?





Quando a fonte de luz está parada as linhas escuras que se superpõem ao espectro contínuo se localizam em uma posição fixa e bem determinada, catalogadas e identificadas gerando o que chamamos de **biblioteca de espectros**. O **Comprimento de Onda** e, conseqüentemente, a **Frequência** das linhas escuras que aparecem são representadas **em repouso** - caso B

Se o padrão de linhas está deslocado para a região vermelha do espectro, a fonte está se **afastando**, por que o **comprimento de onda está aumentando** e a **frequência diminuindo em relação ao observador** - caso C - “red-shift”

Se o padrão de linhas está deslocado para a região azul do espectro, a fonte está se **aproximando**, por que o **comprimento de onda está diminuindo** e a **frequência aumentando** – caso D- “blue-shift”

Uma curiosidade: **ouvindo** o Efeito Doppler

A compositora norte-americana **Adrienne Albert**, nascida em 1941, escreveu uma peça intitulada "Efeito Doppler", e conta como lhe surgiu a ideia: "A ideia de escrever uma peça, baseada nas constatações de um matemático austríaco que observou o aumento e a diminuição da altura do som quando a fonte e o observador se aproximavam ou se afastavam, surgiu-me durante uma viagem a Itália, ao ouvir as miríades de sirenes passando pelo meio de um trânsito tão intenso.

Doppler Effect

for Flute, Bassoon and Harp

♩ = 120
Con moto, A Roman Holiday
melody

ADRIENNE ALBERT
Revised 07.06.2010

Bassoon

6

12

17

https://www.youtube.com/watch?v=xqP_wYjC

Y M

Mas a luz também tem propriedades de **partícula...**

Esta visão se desenvolve no início do século XX, dentro do
Cenário de Construção da Física Quântica...

Como chegou-se a esta conclusão?

...a partir de alguns **experimentos que mostram as propriedades da radiação
como partícula...vamos ver ->**

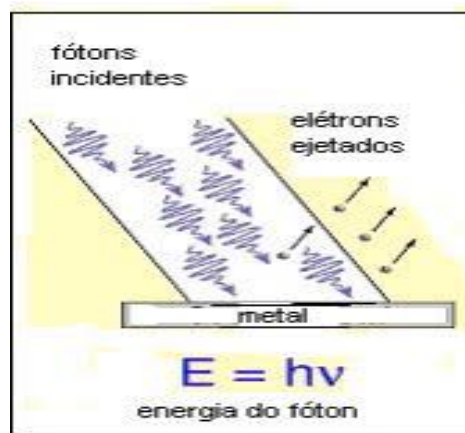
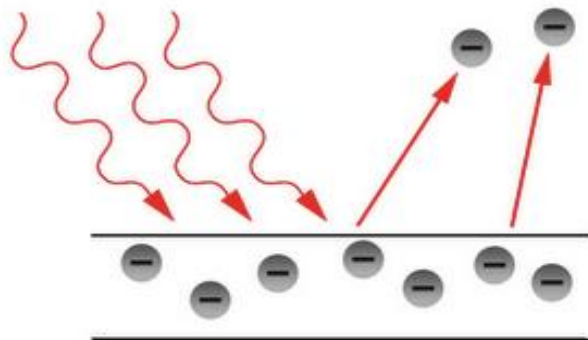
Outros experimentos mostram o **comportamento da radiação como partícula**

Efeito Fotoelétrico (1905) - Einstein publica artigo intitulado: “Sobre um ponto de vista heurístico da criação e da conversão da luz” e, em 1924 ganha Prêmio Nobel de Física por este trabalho.

Mostra neste **experimento** que uma placa metálica ao ser incidida com feixe de luz provoca a expulsão de elétrons....

Influenciado pelas idéias de Planck, interpreta que a energia que o fóton possui, ao ser transferida para a superfície, é convertida em energia cinética (eletron com velocidade) mais a função trabalho = energia utilizada para remover o elétron do átomo.

Fotons com energia (E) suficiente para arrancar os eletrons...



$$E_f = E_c + W$$

— Energia do fóton (J)
— Energia Cinética (J)
— Função Trabalho (J)

$$h \cdot \nu = \frac{mv^2}{2} + W$$

Depende só da frequência

Visão da Radiação como Partículas

Contém a hipótese do fóton: de que a luz se comporta como um gás de partículas livres chamadas Fótons, cada uma das quais carrega uma energia (E) igual a $E = h \cdot \nu$

“Do ponto de vista histórico é neste artigo que nasce a **Teoria Quântica Moderna**, com a idéia de Campo Quântico, onde cada fragmento de matéria e energia é constituído por partículas, descritas por campos quantizados “ (Philip Anderson – em O legado Científico de Einstein, no livro “Os 100 anos da Teoria da Relatividade”.

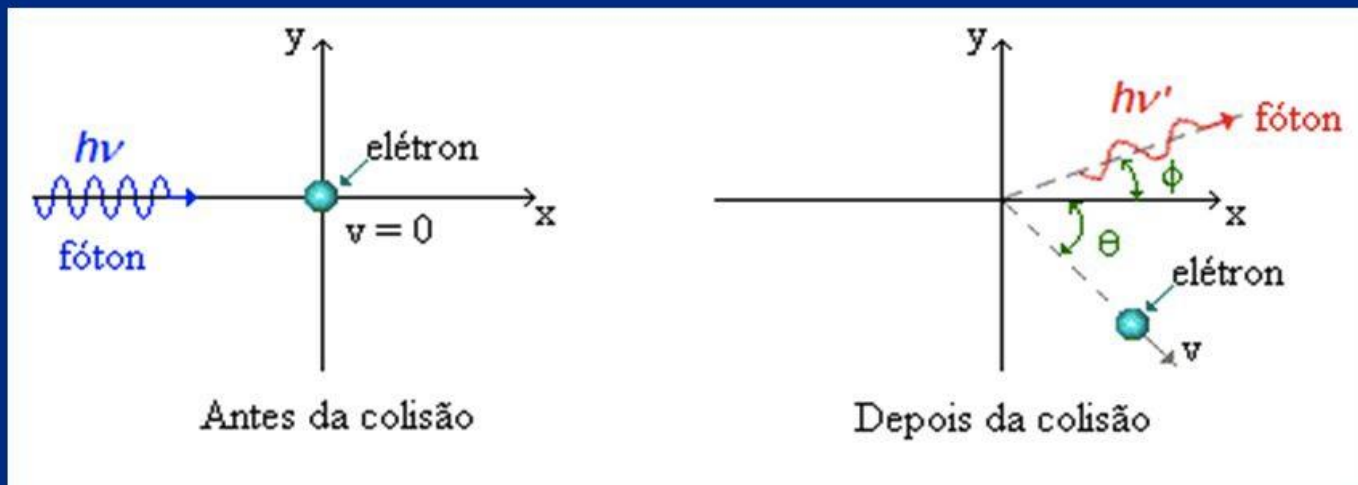
Aceita que a luz também satisfaz as equações de onda de Maxwell, de onde surge a idéia de Dualidade Onda-Partícula....

Dualidade Onda-Partícula

...outro experimento que mostra o comportamento da luz como partícula

Efeito Compton ou Espalhamento Compton

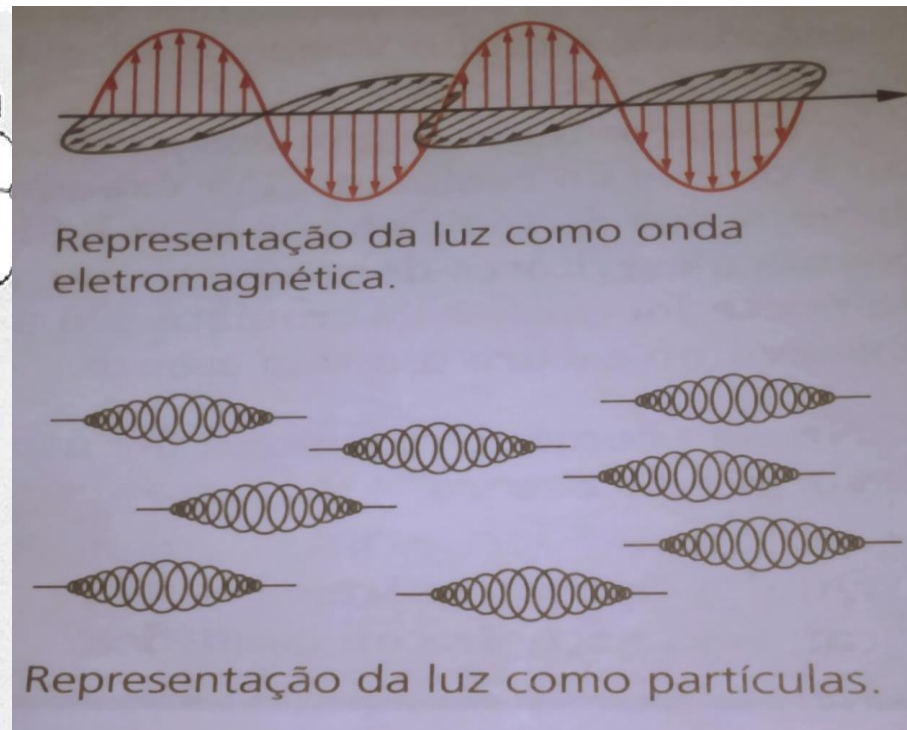
- O **espalhamento Compton** acontece quando um fóton incidente **choca-se inelasticamente** com um elétron do átomo sendo espalhado possuindo energia **menor que a original**. A energia perdida é transferida para o elétron que é ejetado com ganho de **energia cinética**.



Radiação Eletromagnética

Pode viajar através do vácuo e carregar energia em discretas quantidades (pacotes de energia) chamadas “quanta”

Propriedades partícula-onda são combinadas no conceito moderno de “fóton” = “pacotes de ondas eletromagnéticas que tem energia fixada e viajam como partículas”



Fótons e Ondas Eletromagnéticas

...em síntese

As propriedades de onda-partícula são combinadas no conceito moderno de **fóton**.

Fóton pode ser interpretado como sendo pacotes de ondas eletromagnéticas que tem uma **energia fixada** e viaja como uma partícula.

Os campos elétrico e magnético em um fóton oscilam em fase, e em planos ortogonais um em relação ao outro

Energia (**E**) do fóton é proporcional à frequência (**ν**) da radiação eletromagnética ($E \propto \nu$) e pode ser obtida pela expressão abaixo, onde **h** é a constante de Planck:

$$E = h\nu, \text{ mas sabemos que } \nu = c/\lambda, \text{ portanto, } E = h c/\lambda$$

Onde **h** = 6,62607 x 10⁻³⁴ **joule** / segundo,

ou = 6,62607 x 10⁻²⁷ **erg** / segundo, e que **c** = 2.9979 x 10⁸ m/s

Em Dezembro de 2015, no Ano Internacional da Luz, publica-se um artigo que [resume a história sobre o conceito do fóton](#) ao longo do século XX.

Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 37, n. 4, 4204 (2015)
www.sbfisica.org.br

No artigo intitulado “Uma nova luz sobre o conceito de fóton: para além de imagens esquizofrênicas” fica claro que não se sabe ainda qual a natureza dos fótons...

Revisitando o conceito de fóton no século XXI, Finkelstein ressaltou que os esforços não deveriam ser em busca da compreensão da natureza de um fóton, mas, sim, do que ele faz.

A sugestão é “definir o que os fótons são, se ainda desejar, pelo **o que eles fazem**”. Ou seja, o que deveria nos interessar é **o processo no qual o fóton faz parte**, e não o próprio objeto em si, uma vez que provavelmente nunca seremos capazes de visualizar um fóton.

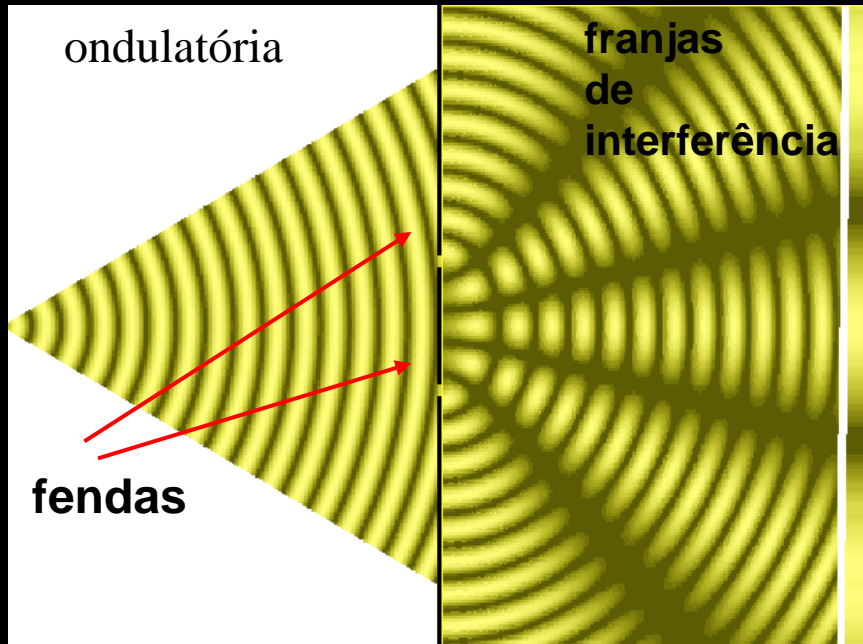
[Assim sendo, conclui-se que a luz se comporta como onda quando se propaga, e como partícula quando interage com a matéria...](#)

...200 anos para responder a estas perguntas...

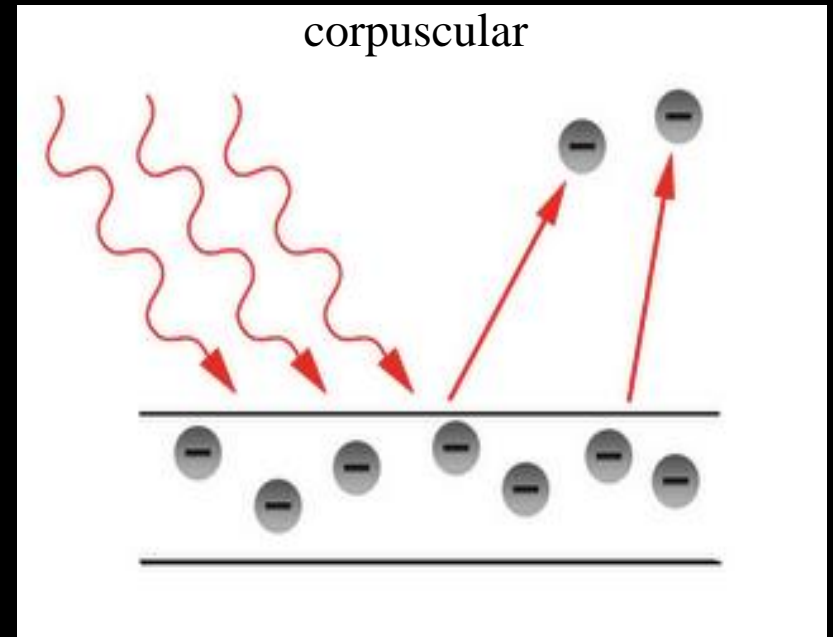
Os experimentos realizados mostram evidências de natureza corpuscular e ondulatória

Thomas Young - 1801

Einstein 1905

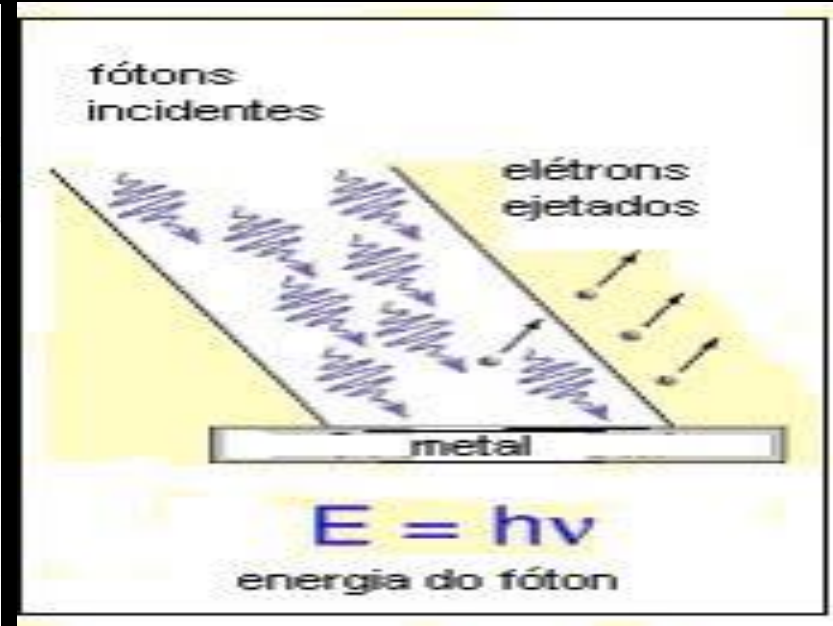


Difração e Interferência da luz



Efeito Fotoelétrico
verificado experimentalmente pelo físico americano Robert Millikan.

Se comporta como **onda** quando se propaga.....e como **partícula** quando interage com a matéria



Louis de Broglie (Prêmio Nobel - 1926) mostra que o elétron também possui a **dualidade onda-partícula**, **estendendo o caráter dual da luz para a matéria.**

Elétrons, e outras partículas, se comportam como ondas.

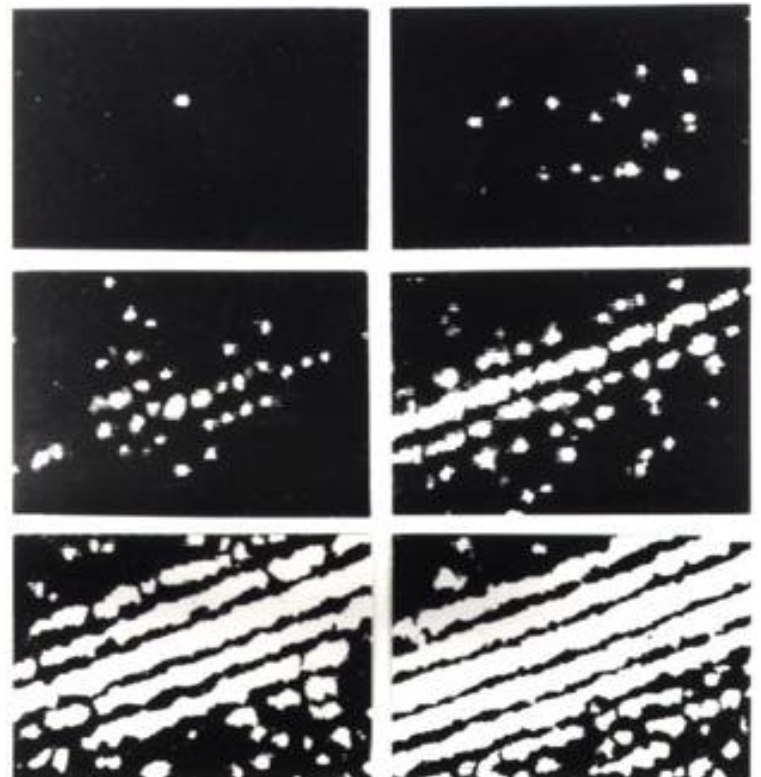
Dualidade Onda-Partícula : o caso do elétron...

...se a luz se comporta como partícula em certas situações, então o elétron também poderia se comportar como onda em certas situações..., como de fato se observa

- 1926, dualidade onda-partícula de Louis de Broglie (Prêmio Nobel).
- **Estende o caráter dual da luz para a matéria.**
- Elétrons, e outras partículas, se comportam como ondas.

Experiência de interferência com elétrons ao invés de luz, em 1976, feita pelo grupo de Bolonha, Itália.

Um feixe de elétrons se comporta como um feixe de ondas, causando um padrão de interferência.



Síntese

4 Propriedades Fundamentais das Ondas Eletromagnéticas

1. Velocidade de propagação, **C**, no vácuo é constante.
2. Direção de propagação é perpendicular a ambos os campos, o elétrico (E) e o magnético (B), ou seja, E e B são **perpendiculares um em relação ao outro**.
3. Direção da polarização é a mesma do campo elétrico (E).
4. Intensidade da onda depende da magnitude dos campos **B** e **E**.

Equações Básicas que relacionam as variáveis de uma onda eletromagnética

$$c = \lambda \cdot \nu$$

velocidade da luz

$$\lambda = c/\nu$$

comprimento de onda

$$\nu = c/\lambda$$

ν = frequency frequência

Equação da energia de um fóton (partícula)

$$E = h\nu, \text{ mas } \nu = c/\lambda, \text{ então}$$
$$E = h c/\lambda$$
$$h = 6,62607 \times 10^{-34} \text{ joule / segundo,}$$
$$= 6,62607 \times 10^{-27} \text{ erg / segundo, e}$$
$$c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Ainda restaria a explicação da natureza da formação do Arco-Iris... do que chamamos tecnicamente de Radiação Contínua

Restaria também encontrar uma expressão matemática que pudesse representar esta Radiação Contínua

...veremos na próxima aula...