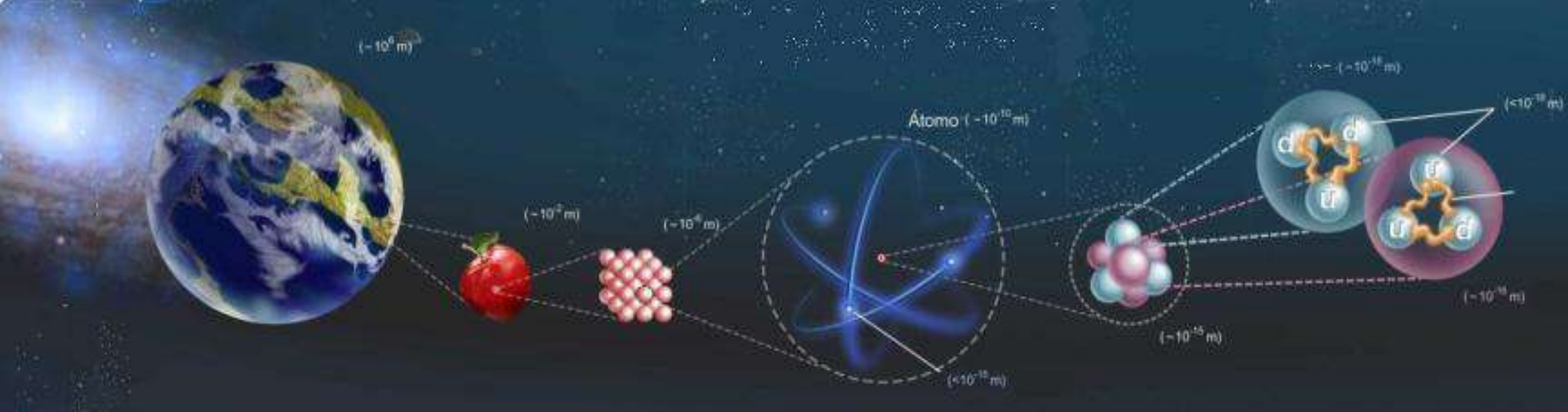




Um passeio pelos conceitos de Mecânica Quântica

Alexandre Reily Rocha

alexandre.reily@unesp.br

[@iftunesp](#)

[@alexandrereily](#)

O que estou fazendo aqui?



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

- 1. Eu quero aprender um pouco sobre o que é Mecânica/Física Quântica**
- 2. Eu quero aprender um pouco sobre o que NÃO é Mecânica/Quântica**

Como vamos fazer?



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

1. **Vamos fazer uma viagem histórica (mas não cronológica) por vários períodos importantes da ciência.**
2. **Vamos visitar alguns experimentos importantes que mudaram a nossa visão do mundo.**
3. **Vamos aprender que “não intuitivo” é diferente de mágico, e que é importante mudar conceitos frente às evidências.**
4. **O mundo quântico é muito diferente do que estamos acostumados, mas segue regras (matemáticas) muito rígidas**
5. **A gente VAI FAZER CONTAS!!!!**

Algumas regras básicas



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

- 1. Perguntem**
- 2. Perguntem**
- 3. Perguntem**



Prontos?

O otimismo no século XIX



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

“...we’ve basically got it all worked out, except for small stuff, big stuff, hot stuff, cold stuff, fast stuff, heavy stuff, dark stuff, turbulence, and the concept of time.”

— Zach Weinersmith

“... a gente praticamente tem tudo dominado, menos as coisas pequenas, as coisas grandes, as coisas quentes, as coisas frias, as coisas rápidas, as coisas pesadas, as coisas escuras, turbulência e o conceito de tempo.”

— Zach Weinersmith

“Uns probleminhas”



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

- Encontrar/Explicar o Éter
- Encontrar o planeta Vulcano
- Explicar um ‘corpo negro’
- Descobrir o que há ‘dentro’ da matéria
- Explicar o efeito fotoelétrico

Que haja luz

A natureza da luz



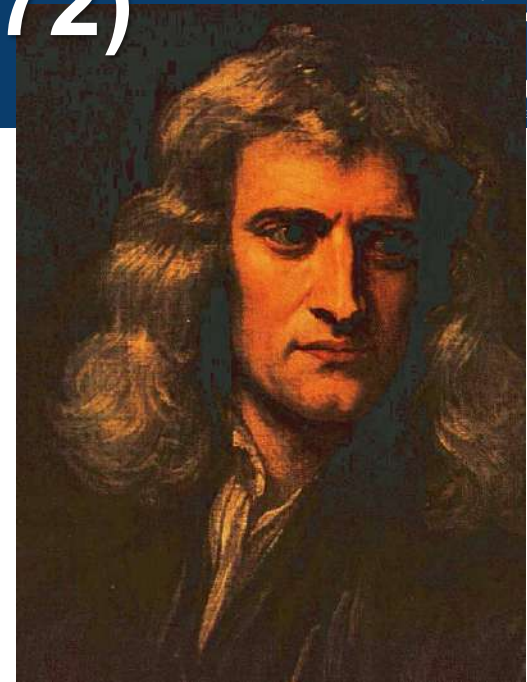
IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

- Até o começo do século XIX, a maioria dos cientistas acreditada que era um **fluxo de partículas emitido** por uma fonte luminosa;
- Com base neste modelo, as partículas de luz estimulavam a visão ao **penetrar no olho**;
- O principal idealizador deste **modelo corpuscular** da luz foi **Isaac Newton**, sendo que o modelo apresentava uma explicação simples para algumas observações experimentais já conhecidas na época sobre a natureza da luz, isto é, as leis da reflexão e da refração.

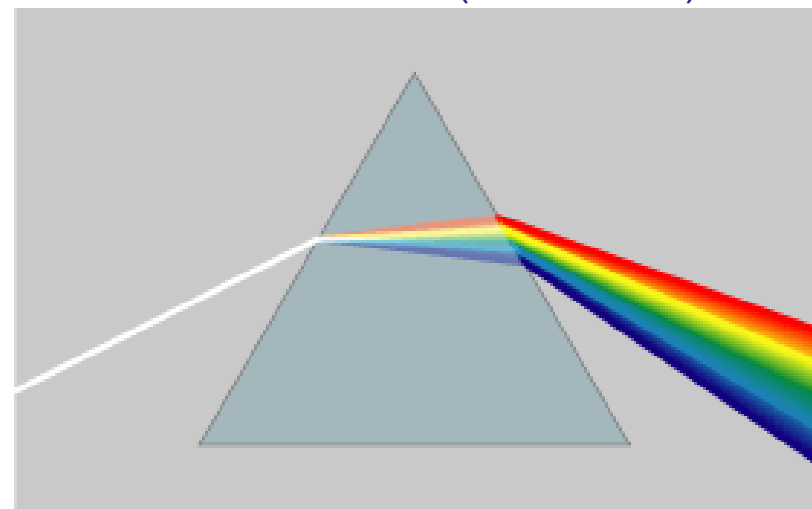
O modelo Corpuscular (1672)

A maioria dos cientistas da época aceitaram o modelo corpuscular da luz

- “luz é constituída de um feixe de partículas”
- Usando as leis da mecânica – refração e reflexão;
- Descreve a decomposição da luz ao atravessar um prisma (dispersão);



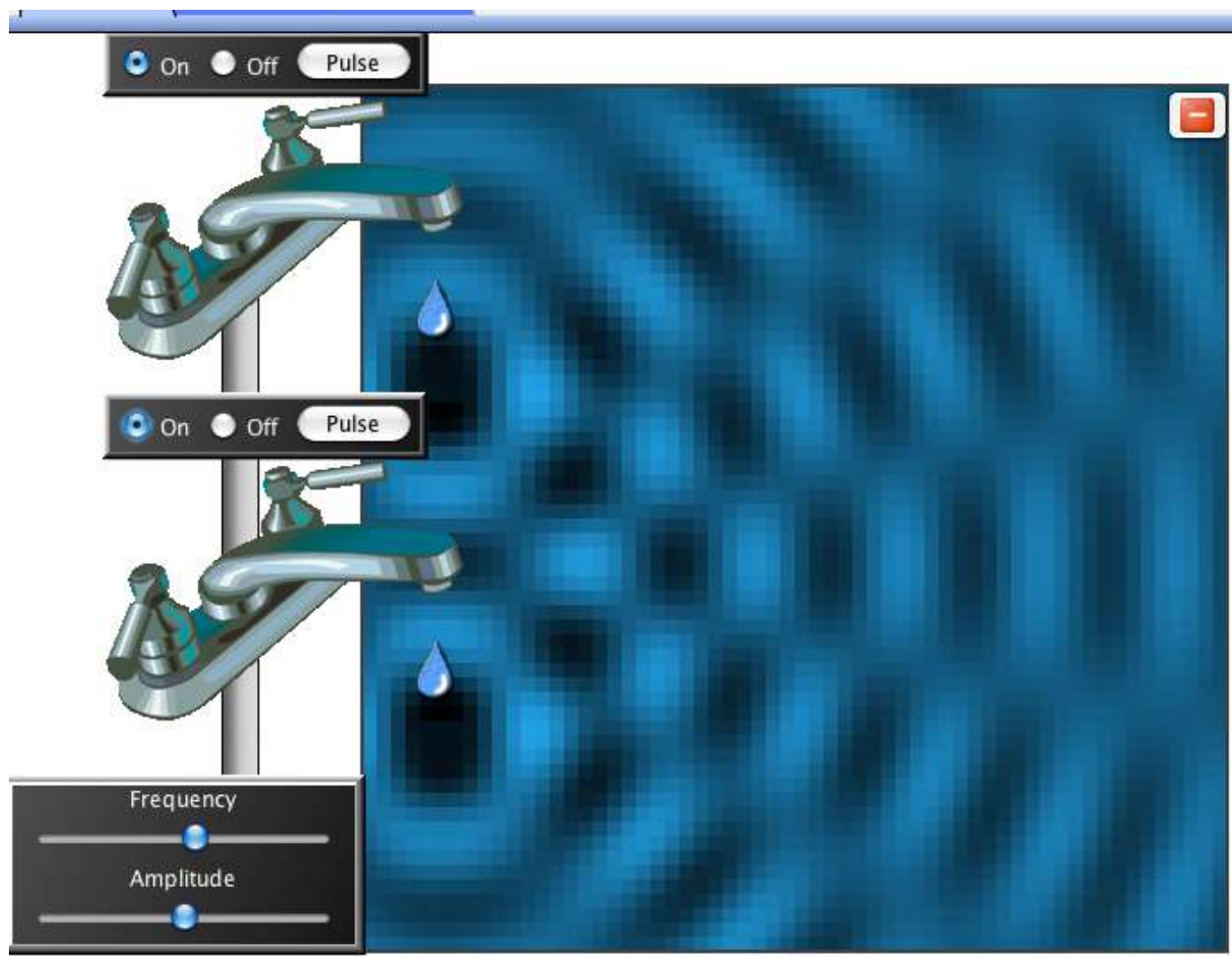
Newton (1642- 1727)



Mas...



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

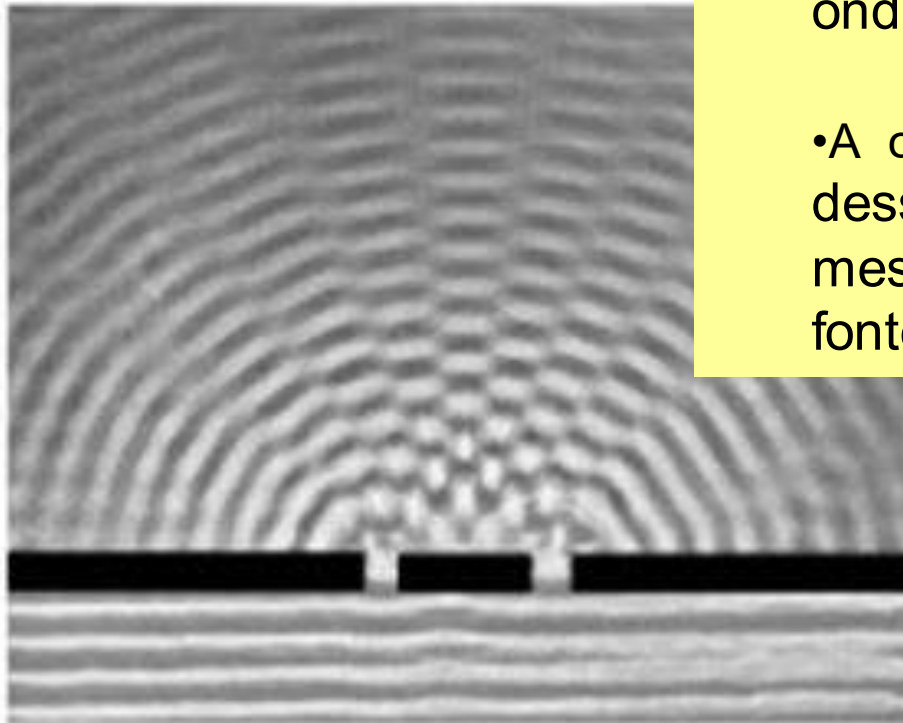


Difração e interferência



Thomas Young
(1773-1829)

Difração

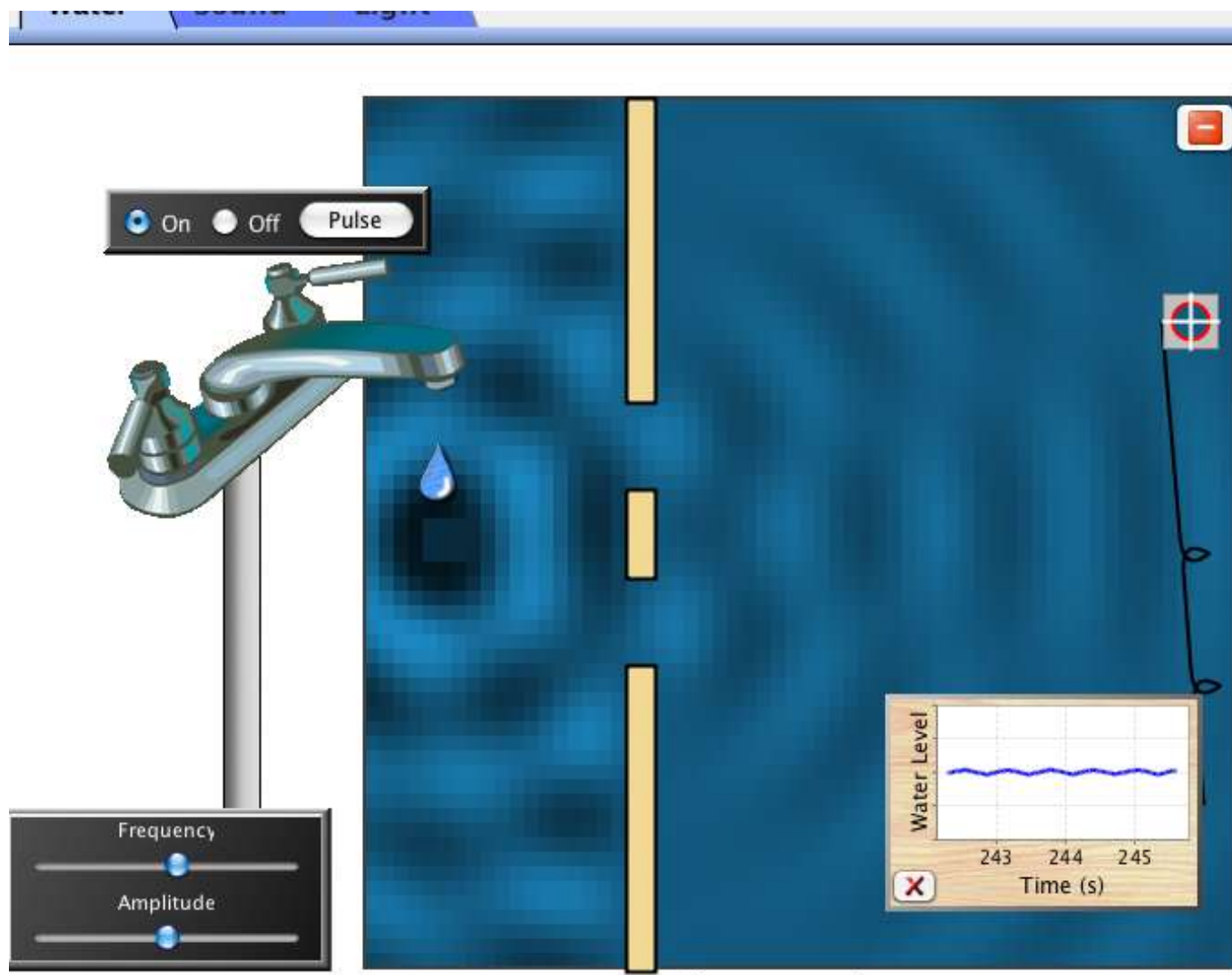


Thomas
(1773-1829)

- Desvio sofrido por uma onda ao se deparar com um obstáculo de dimensões similares ao comprimento de onda.
- A onda se espalha em torno desse objeto como se o mesmo fosse uma nova fonte de emissão da onda



A difração



O modelo Ondulatório



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

Em 1678, o físico holandês Christiaan Huygens mostrou o modelo ondulatório

- Deduz corretamente as leis de refração e reflexão;
- Explica outros fenômenos óticos; difração e interferência que não podiam ser explicados pelo modelo corpuscular.



Christian Huygens
(1629-1695)

A natureza da Luz



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

- Esse modelo ondulatório da luz não foi aceito de imediato, pois, dentre outras argumentações, temos que as ondas conhecidas na época (som, ondas na superfície da água, etc.) eram ondas mecânicas e necessitavam de um meio para se propagar.
- Entretanto, a luz viaja do Sol até a Terra no vácuo.



A natureza da luz:

A partir de então, vários outros cientistas (Augustin Fresnel, Jean Foucault, dentre outros) desenvolveram experimentos e modelos que fortaleceram o modelo ondulatório da luz.

A natureza da Luz



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

- Em 1865, Maxwell fez **previsões matemáticas** de que a luz seria uma **onda eletromagnética de alta frequência**;
- Estas previsões foram **confirmadas experimentalmente** por Hertz em 1887;



A radiação eletromagnética

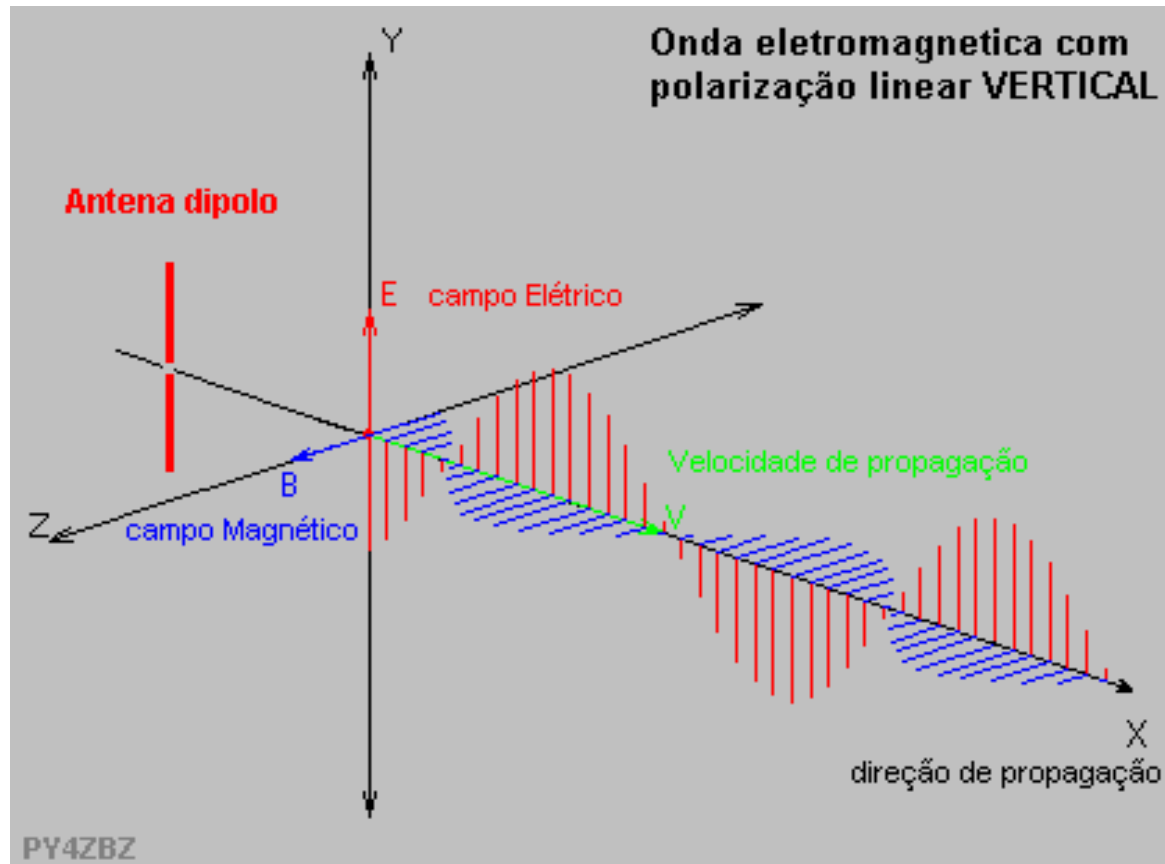
- O estudo de átomos e molécula muitas vezes é feito através da análise da radiação emitida ou absorvida pelos átomos (espectroscopia);
- A radiação eletromagnética é o produto de campos elétricos e magnéticos oscilantes;

Propagação de ondas EM



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

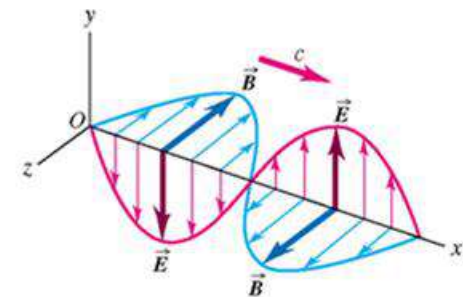
As ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo com uma velocidade c



$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \lambda f$$

μ_0 - permeabilidade no vácuo

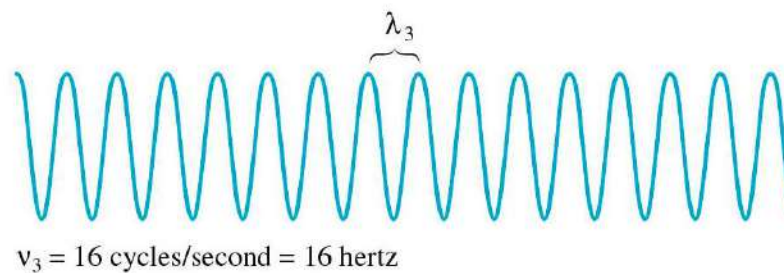
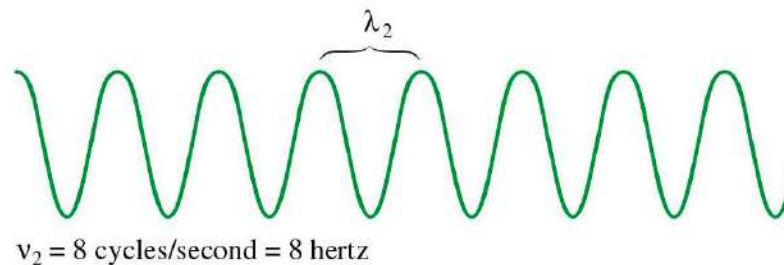
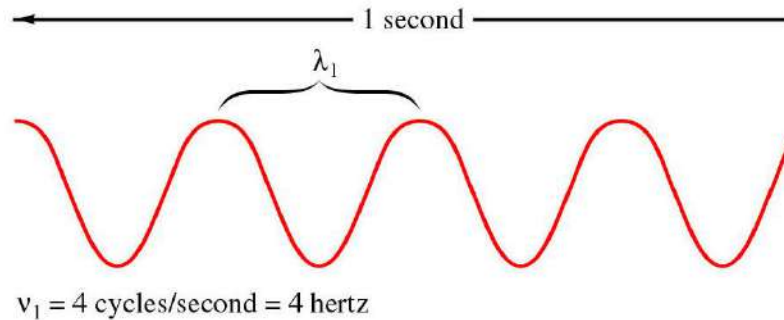
ϵ_0 - permissividade no vácuo



Radiação Eletromagnética



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



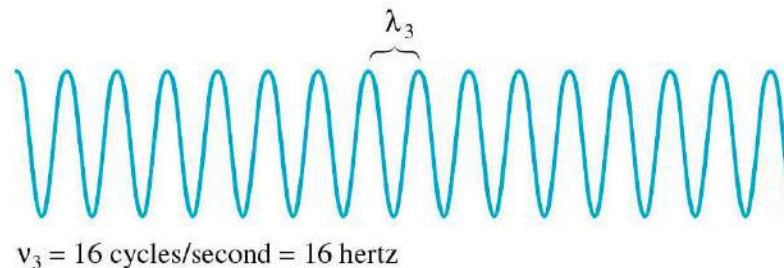
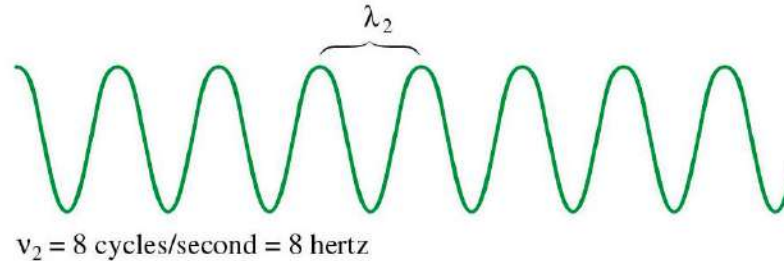
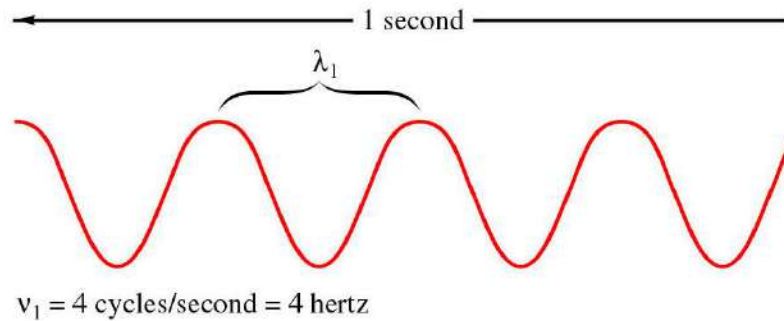
$$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$$

Comprimento de onda: a distância entre dois picos consecutivos na onda.

Radiação Eletromagnética



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



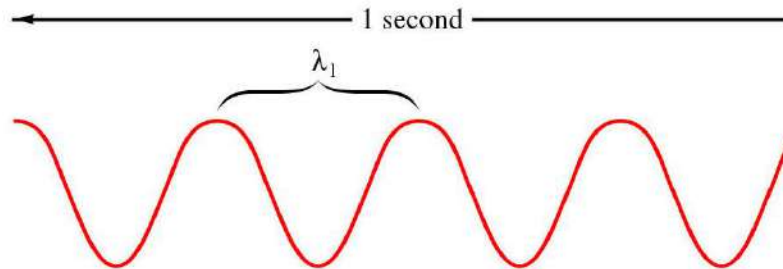
$$v_1 < v_2 < v_3$$

Frequencia: é o número de ondas que passam por um certo ponto do espaço em um segundo.

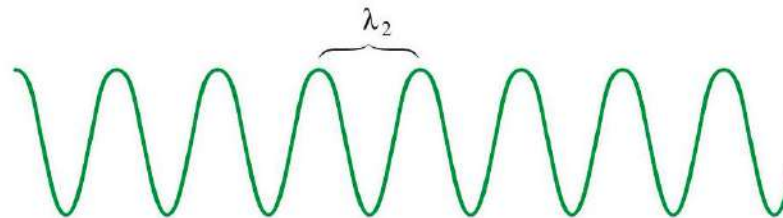
Radiação Eletromagnética



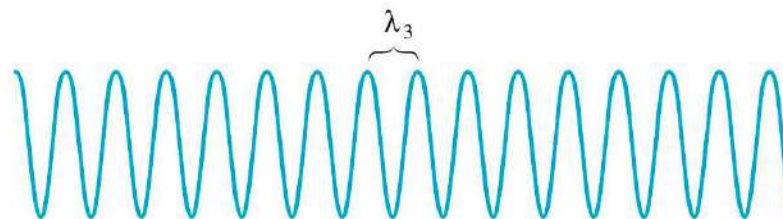
IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



$\nu_1 = 4 \text{ cycles/second} = 4 \text{ hertz}$



$\nu_2 = 8 \text{ cycles/second} = 8 \text{ hertz}$



$\nu_3 = 16 \text{ cycles/second} = 16 \text{ hertz}$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \lambda f$$

μ_0 - permeabilidade no vácuo

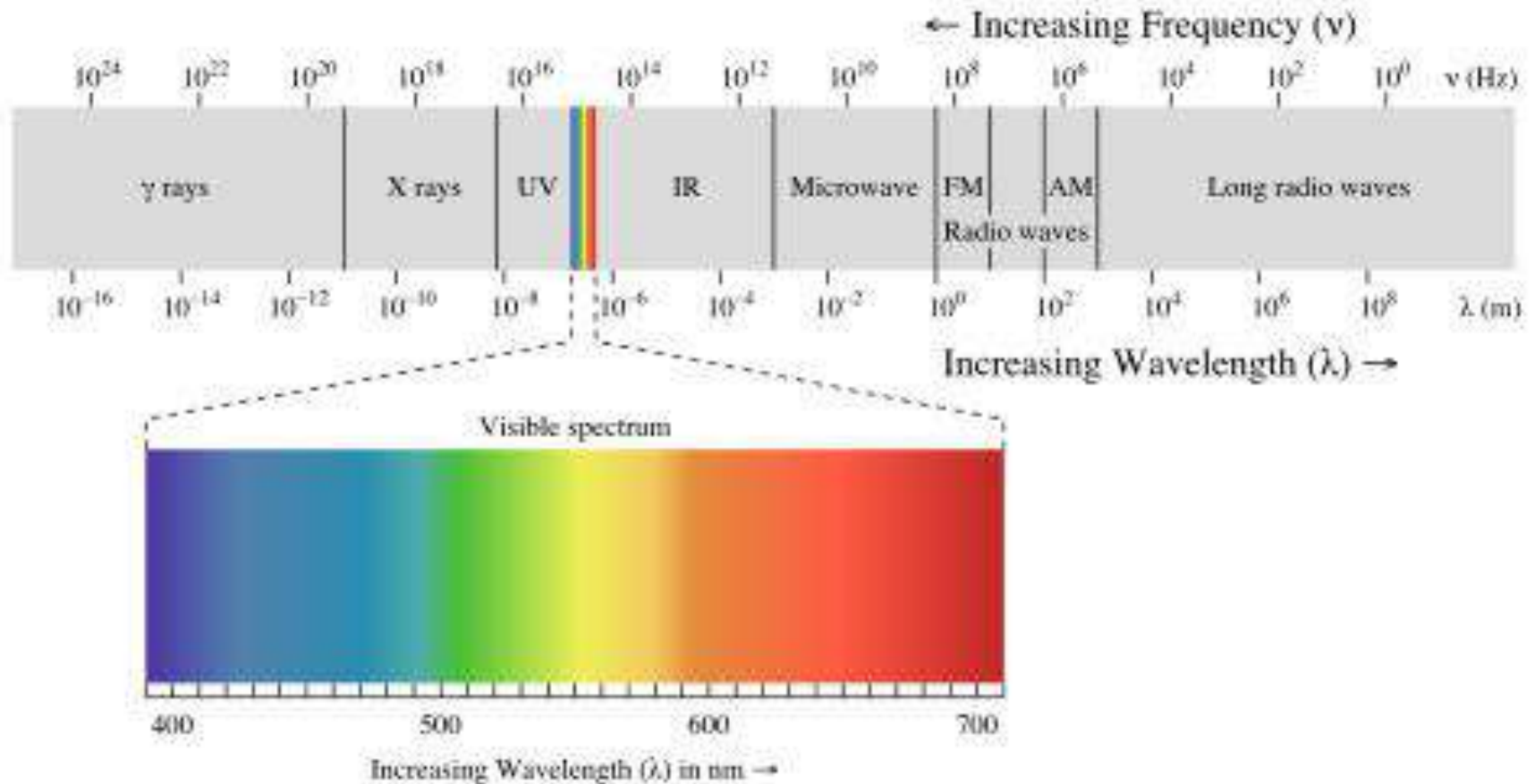
ϵ_0 - permissividade no vácuo

O Produto entre ν e λ
é uma constante.

Espectro Eletromagnético



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



Costuma-se classificar a radiação eletromagnética pelo seu comprimento de onda. A luz visível ocupa somente uma porção do espectro eletromagnético.

Estamos prontos para o sec. XX



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

**Corpos com temperatura diferente
de zero emitem radiação**

Aqui também?



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



Sim!



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



Algumas características do espectro EM



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

- Materiais que são opacos para um certo comprimento de onda podem não ser para outro (saco plástico).
- Materiais que são transparentes no espectro visível podem ser opacos em outra região do espectro (óculos)
- Seres humanos emitem radiação na região do infra-vermelho.

O nosso primeiro experimento



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

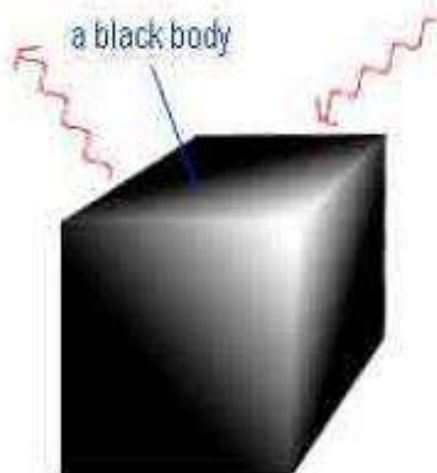
Radiação de um corpo negro

O que é um corpo negro?



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

O que é um corpo negro?



Created by team C00757 f, ThinkQuest 1 2000

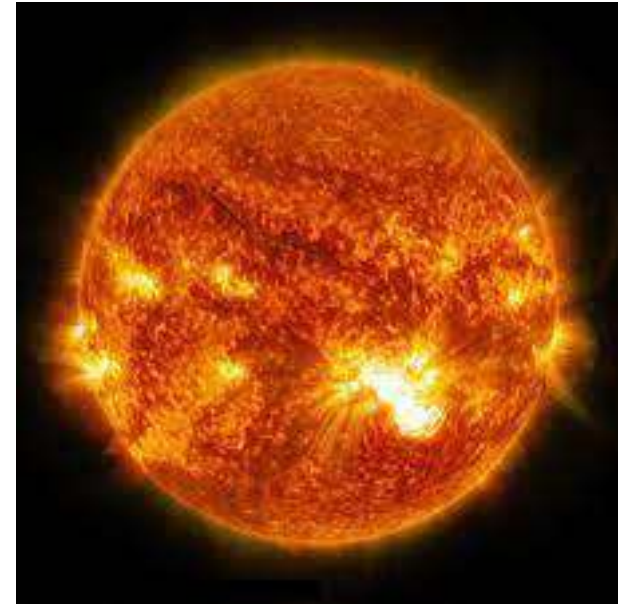


Corpo que absorve toda radiação que incide sobre ele.

O que é um corpo negro?



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

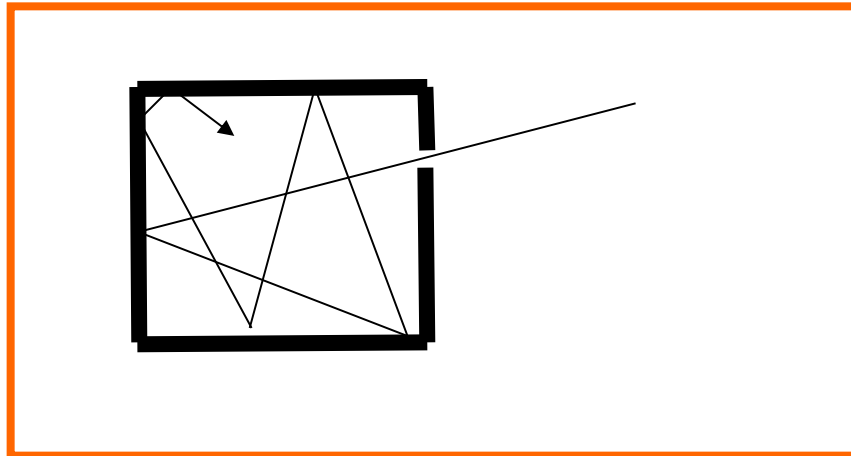


O corpo negro?

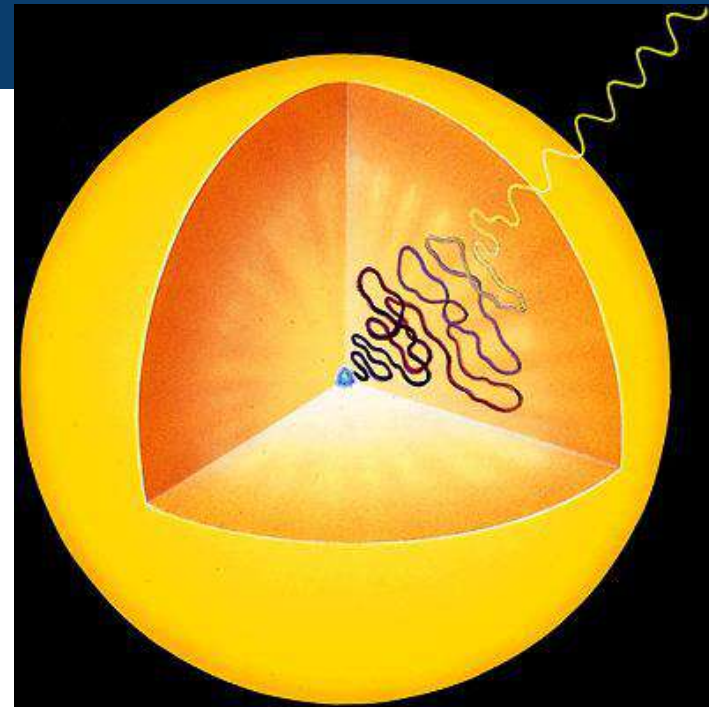


IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

- O que realmente ocorre quando um objeto é aquecido a temperaturas cada vez mais altas é que, em princípio, a maior parte da energia é irradiada como infravermelho, em comprimentos de onda demasiadamente longos para que possamos enxergar. Após um determinado aquecimento o corpo começa a brilhar em vermelho visível incandescente e se o aquecimento continuar, teremos laranja, e azul esbranquiçado. Quanto mais quente o corpo, menor é o comprimento de onda que a maior parte de sua energia é irradiada.
- Ainda que um pouquinho da energia seja irradiada em comprimentos de onda maiores e menores, o pico de emissão de um corpo negro é centrado em uma faixa estreita de comprimento de onda, que depende apenas da temperatura.



Representação de um corpo negro usualmente usado em laboratório, que consiste de uma caixa de paredes adiabáticas numa das quais há um orifício estreito.



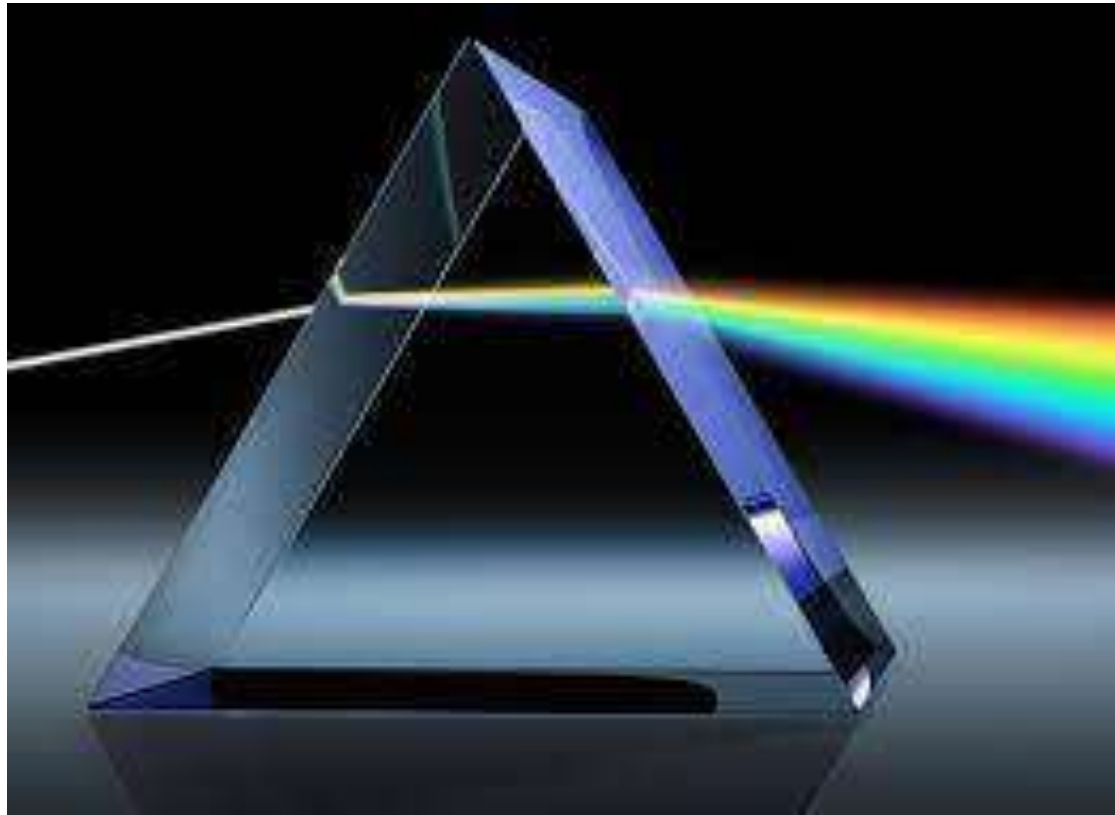
Aprisionamento de fótons numa atmosfera estelar.
© 1996 W. H. Freeman and Co., Discovering the Universe, 4th. Ed.

Corpos negros interessam à Astronomia porque as estrelas podem ser aproximadas como corpos negros. Uma pequena parte da radiação emitida pela estrela escapa ao espaço circunstelar, de forma que o astro fica próximo ao equilíbrio termodinâmico.

A luz do sol por um prisma



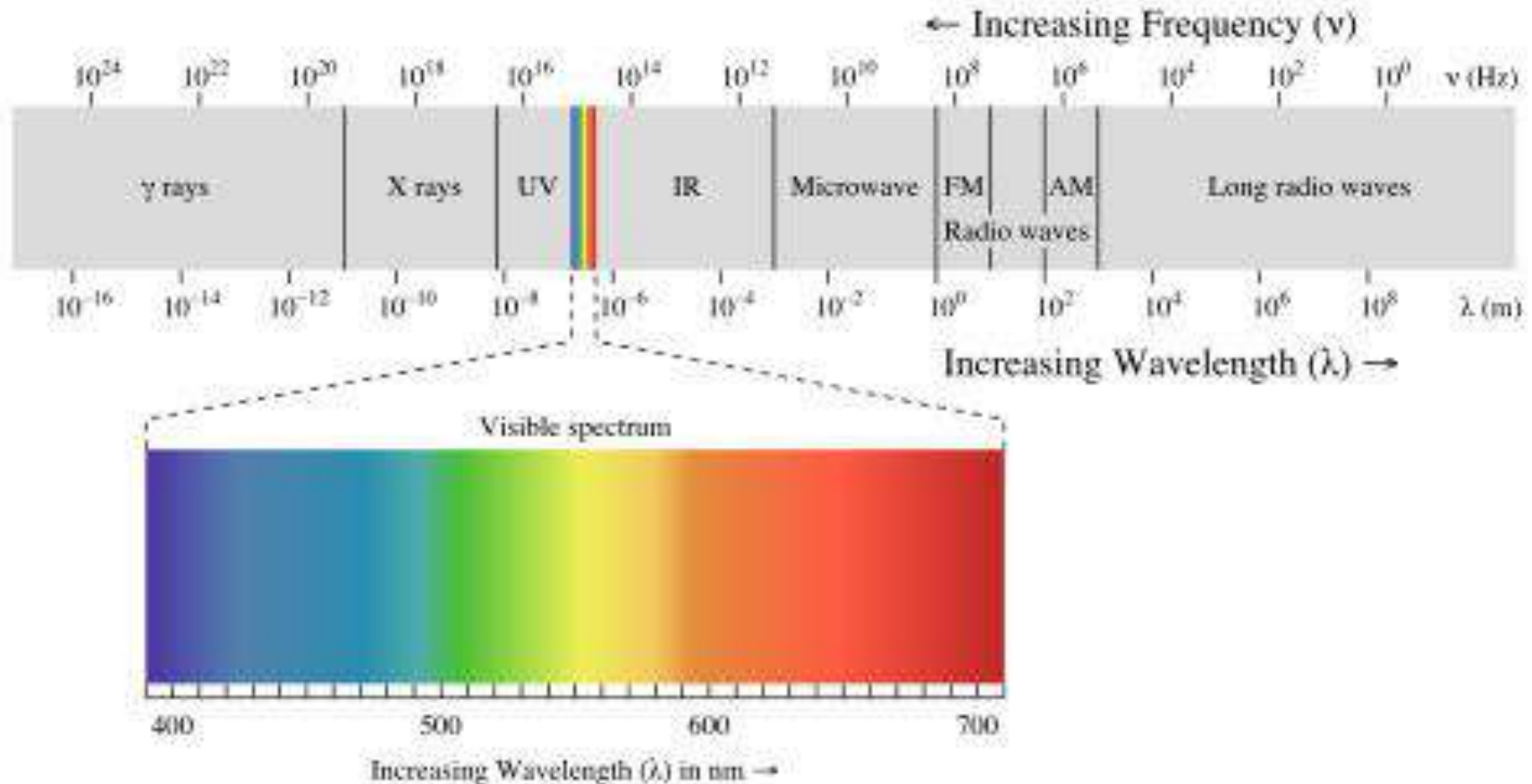
IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



A luz do sol por um prisma



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



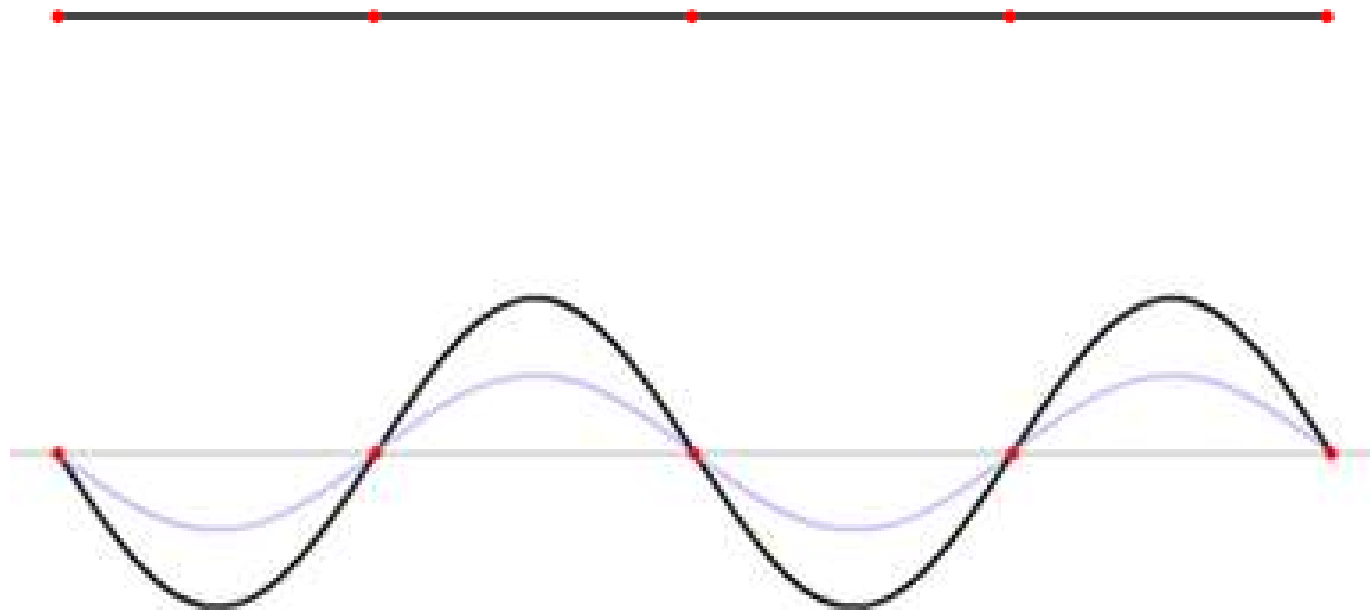


Propriedades de ondas

- Superposição de ondas
- Interferência
- Ondas estacionárias



Ondas estacionárias

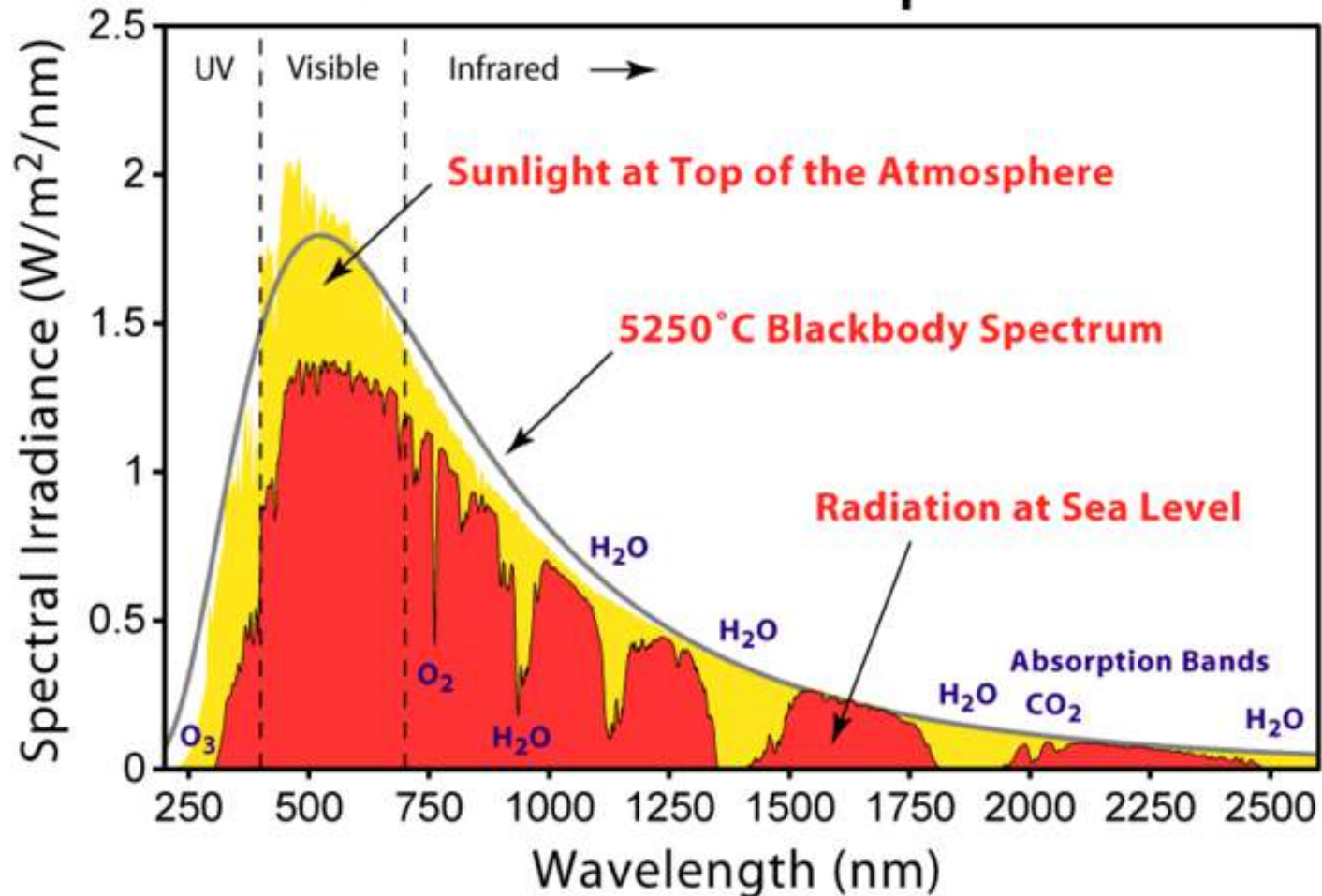


O espectro solar



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

Solar Radiation Spectrum

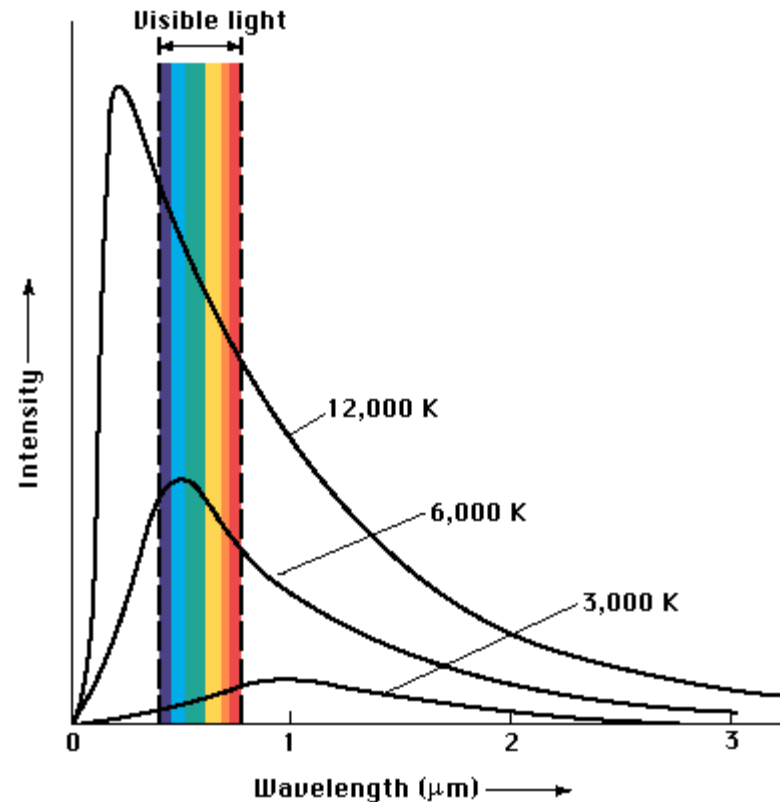


A radiação de corpo negro



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

- Muitos pesquisadores dedicaram-se a medir e descrever a distribuição de energia emitida por corpos negros em diferentes temperaturas.
- Primeiras medidas precisas: Lummer e Pringshein em 1899.
- Embora as principais propriedades destas curvas fossem conhecidas, a física clássica não oferece meios de descrever a distribuição por inteiro.



Algumas coisas interessantes

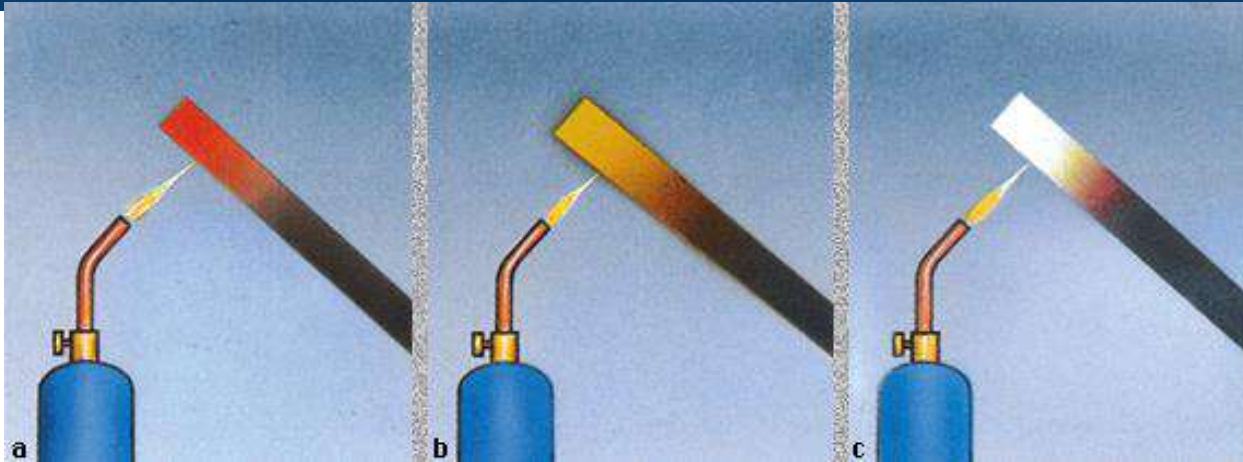


IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

Lei dos deslocamentos de Wien

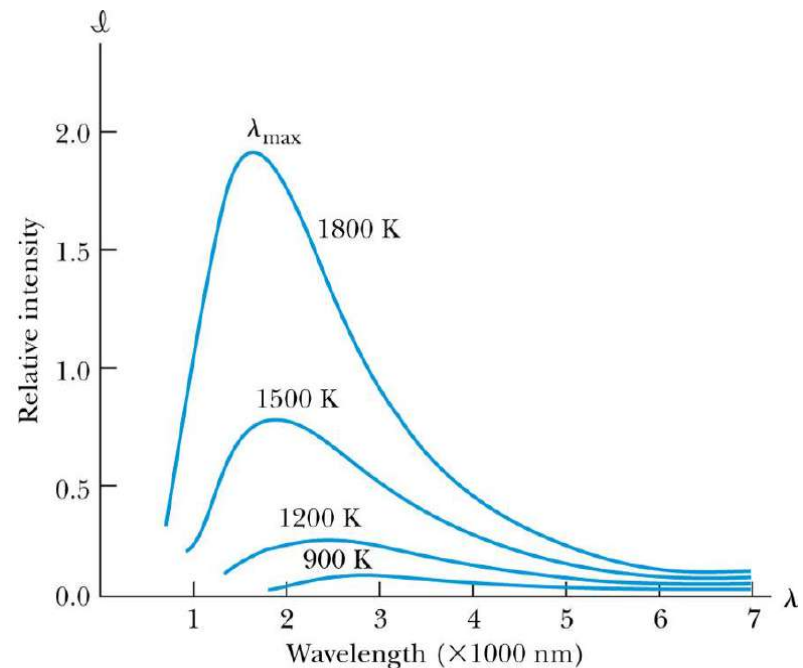


IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



Wien (1864-1928) descobriu que a intensidade máxima da radiação de corpo negro desloca-se para comprimentos de onda menores (e frequências maiores) à medida que o corpo é aquecido. Essa lei pode ser expressada matematicamente como:

$$\lambda_{max}T = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m.K}$$



A Lei de Stefan-Boltzmann



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

Lei de Stefan-Boltzmann

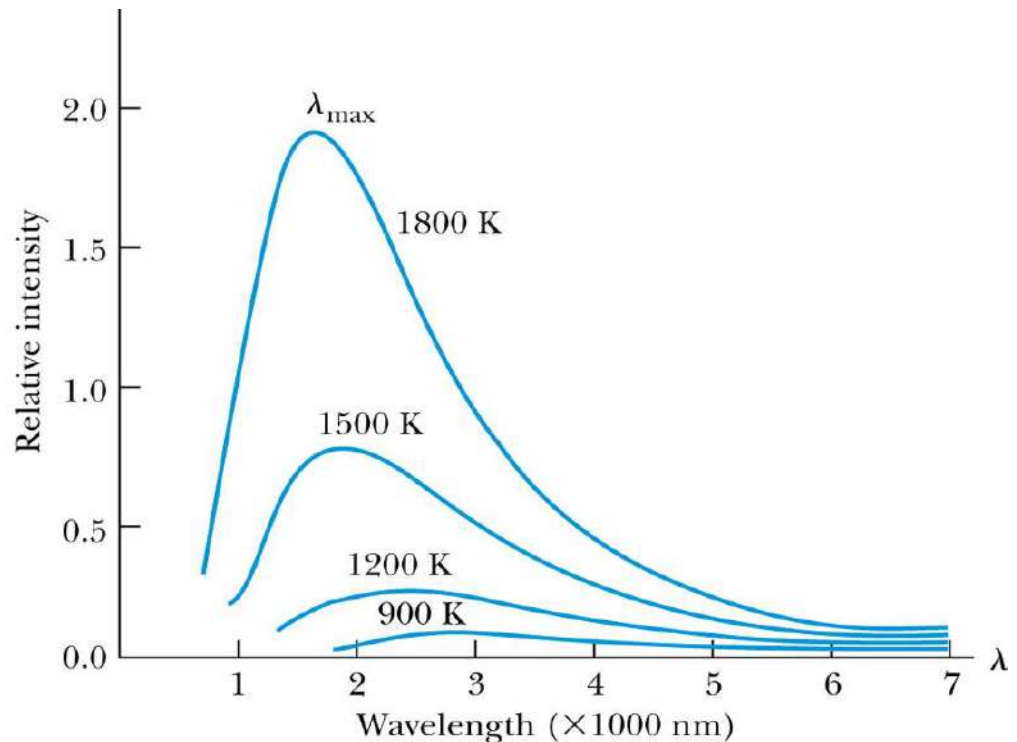
A potência total da radiação emitida (a área da curva) aumenta com a temperatura

Emitância espectral

$I = \text{Potência} / \text{Área} \text{ (W/m}^2\text{)}$



$\epsilon = 1$, corpo negro



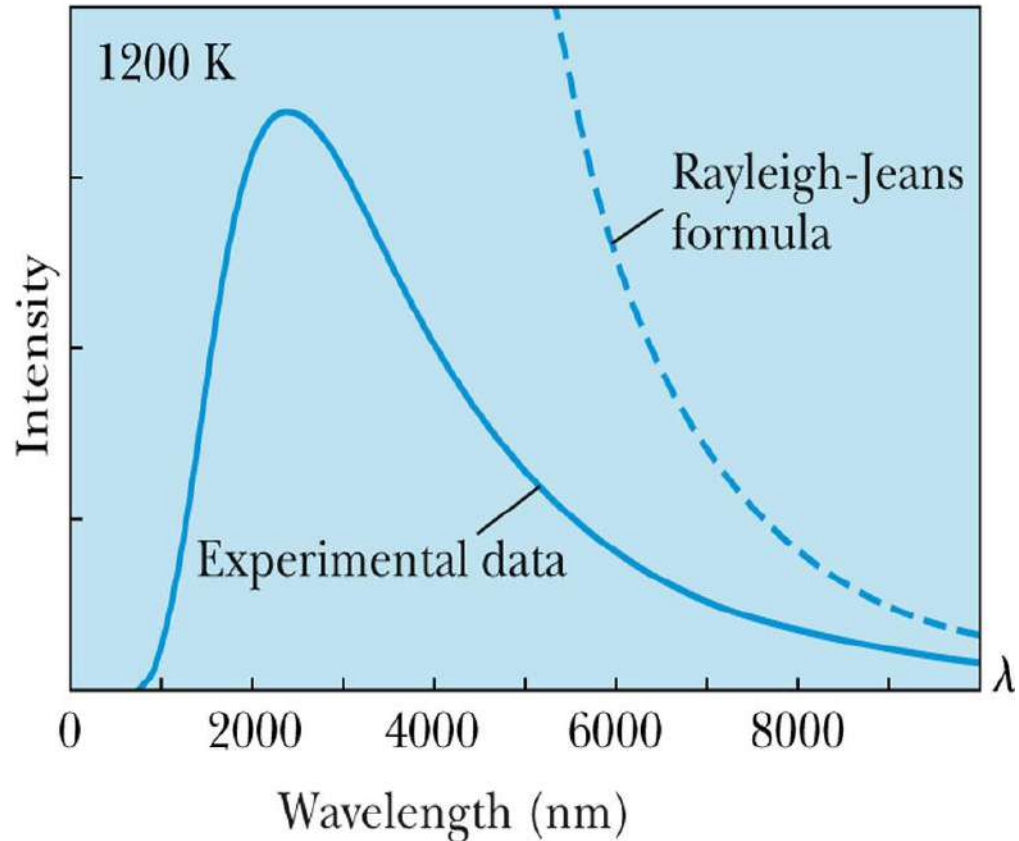
A catástrofe do ultravioleta



Fórmula Rayleigh-Jeans

Lord Rayleigh usou as teorias clássicas do eletromagnetismo e da termodinâmica para mostrar que a distribuição espectral de um corpo negro deveria ser:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2ckT}{\lambda^4}$$



Para comprimentos de ondas grandes esta equação se ajusta aos resultados experimentais, mas para os comprimentos de onda curtos há uma discordância muito grande entre esta teoria e a experiência. Esta discordância é chamada de **catástrofe do ultravioleta**.

Nem todo herói usa capa



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



Teoria de Planck



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

Foi Planck, em 1900 (prémio Nobel em 1918), que resolveu o problema

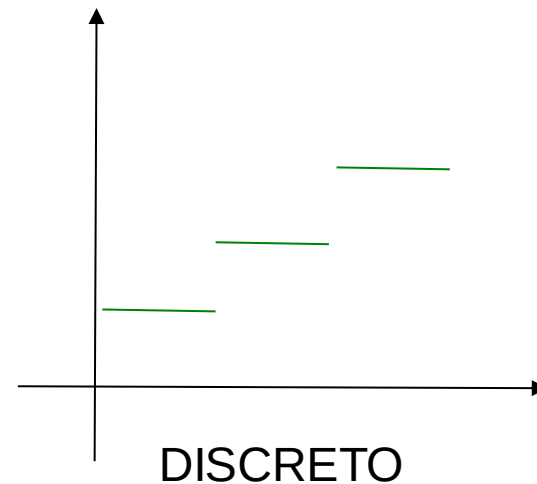
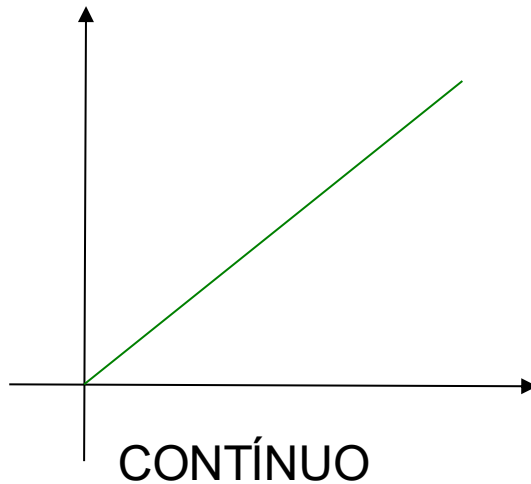
- A resposta ao problema da radiação de corpo negro foi dada por Max Planck, em 1900. Planck percebeu que o problema poderia ser resolvido se os objetos radiantes (átomos) só pudessem emitir (ou absorver) energia em determinadas quantidades fixas, que ele chamou de **quanta** (plural de **quantum**).

Teoria de Planck



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

A energia de um sistema não é uma variável contínua. A energia somente pode assumir alguns valores específicos, ou seja, ela é discreta ou quantizada.



Através da Lei da Radiação de Planck pode-se chegar a Lei de Stefan e Wien!

$$E = hf$$

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Teoria de Planck



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

Foi Planck, em 1900 (prêmio Nobel em 1918), que resolveu o problema

- A resposta ao problema da radiação de corpo negro foi dada por Max Planck, em 1900. Planck percebeu que o problema poderia ser resolvido se os objetos radiantes (átomos) só pudessem emitir (ou absorver) energia em determinadas quantidades fixas, que ele chamou de **quanta** (plural de **quantum**).
- A teoria de Planck resolveu o problema. Objetos frios não tem energia suficiente para produzir muitos quanta de alta frequência. Eles só conseguem irradiar energia na faixa de frequência em que a energia disponível em cada átomo seja comparável à dos quanta envolvidos na radiação.
- Ele utilizou a estatística de Boltzmann para obter uma equação teórica que concordava com os resultados experimentais para todos os comprimentos de onda
- Se sentiu mal, pois utilizou apenas um artifício para resolver o problema! Mas sem embasamento físico!

Teoria de Planck

Lei da Radiação de Planck

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Planck fez duas modificações na teoria clássica:

- Os osciladores (de origem electromagnética) podem ter apenas certas energias discretas:

$$E_n = n h f$$

onde n é um número inteiro, f é a frequência, e h é chamada de constante de Planck:

- Os osciladores podem absorver ou emitir energia em múltiplos discretos de um quantum fundamental de energia dada por:

$$\Delta E = h f$$

A radiação de corpo negro é o primeiro efeito a ser descrito utilizando uma descrição **quântica**

Resolveu o problema... SQN!



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

A luz é realmente uma onda?

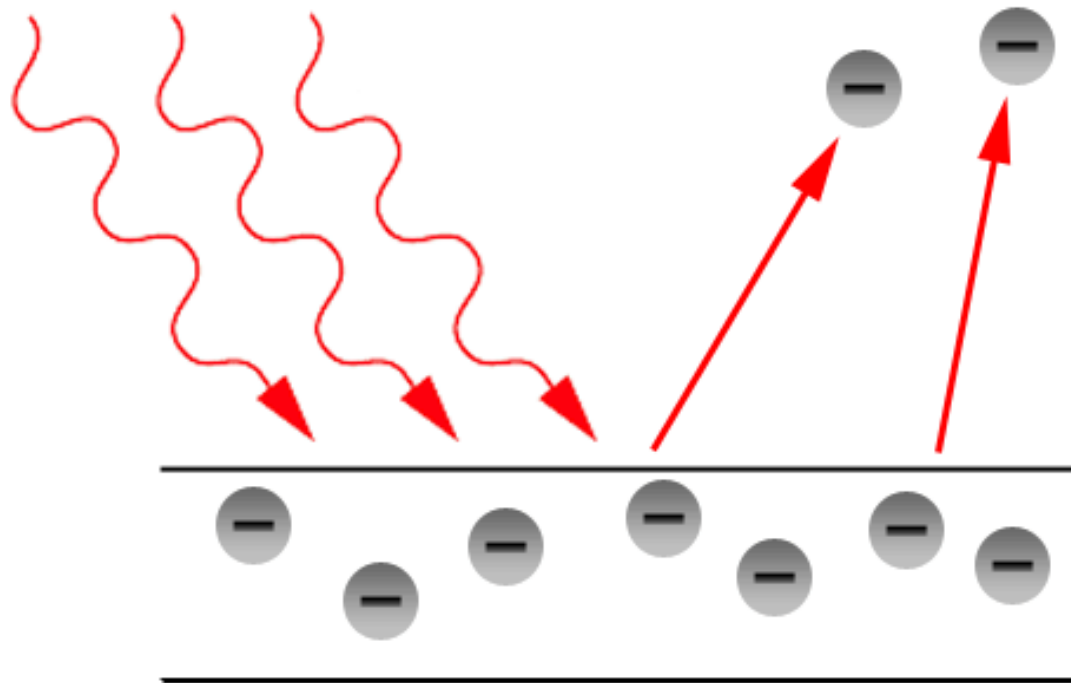


O **efeito fotoelétrico** é a emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando exposto a uma radiação eletromagnética (como a luz) de frequência suficientemente alta, que depende do material. Ele pode ser observado quando a luz incide numa placa de metal, literalmente arrancando da placa elétrons.

A idéia básica



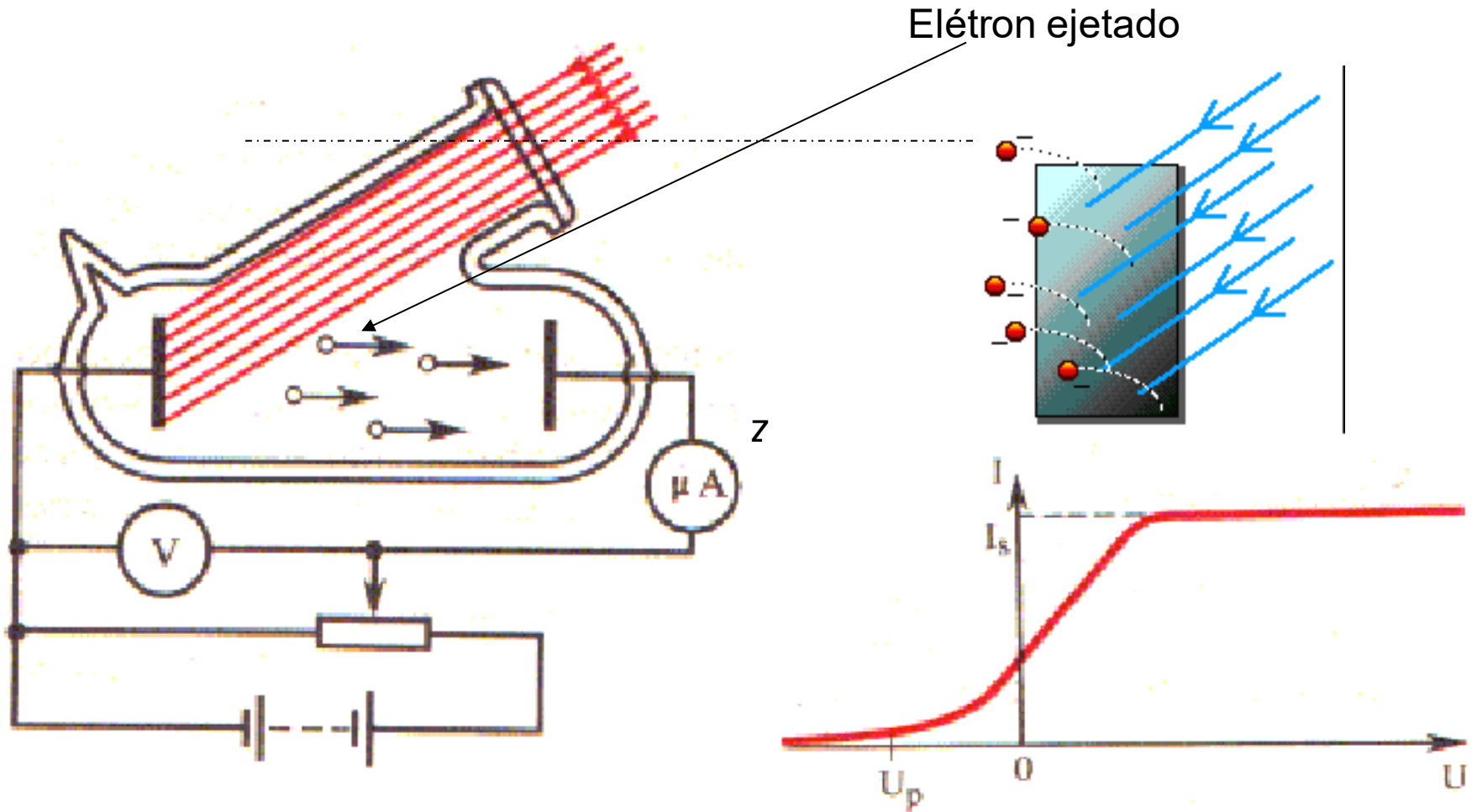
IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



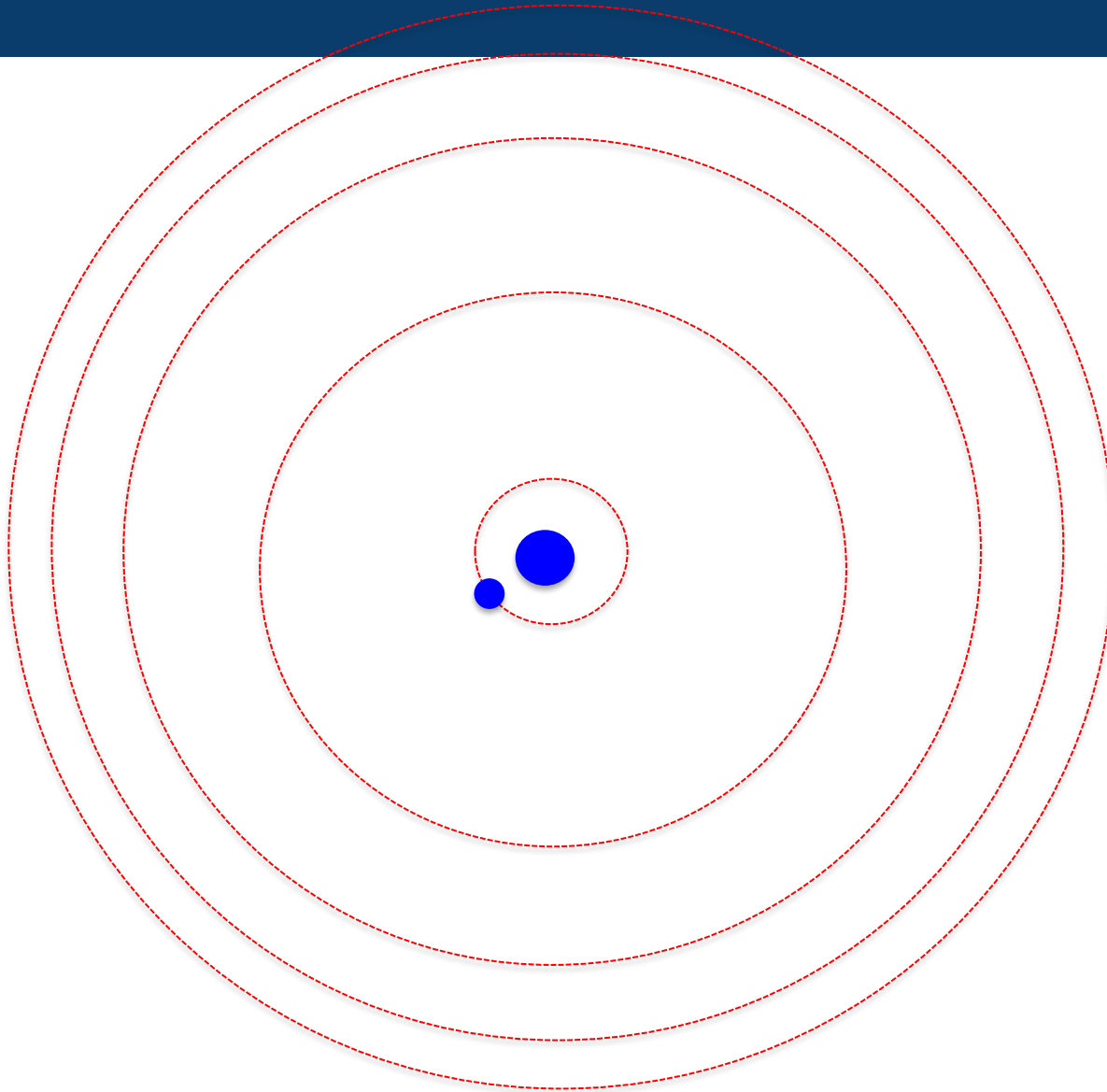
Efeito Fotoelétrico - Experimento de Hertz



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



Originalmente observado por Hertz em 1887



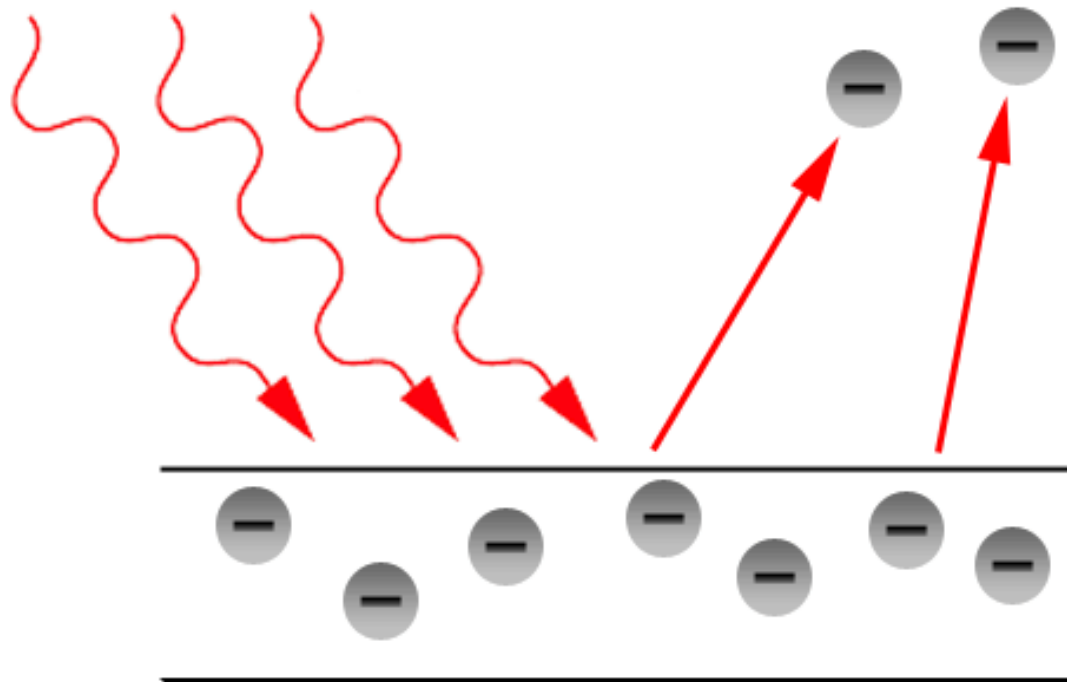
Energia de Ionização

Elétron girando em torno do núcleo (preso no átomo)

Efeito Fotoelétrico – Elétrons ligados no material



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



Uma parte da energia deve ser “deixada” pela luz para remover o elétron: função trabalho (W)

Contraste entre as previsões e os resultados experimentais

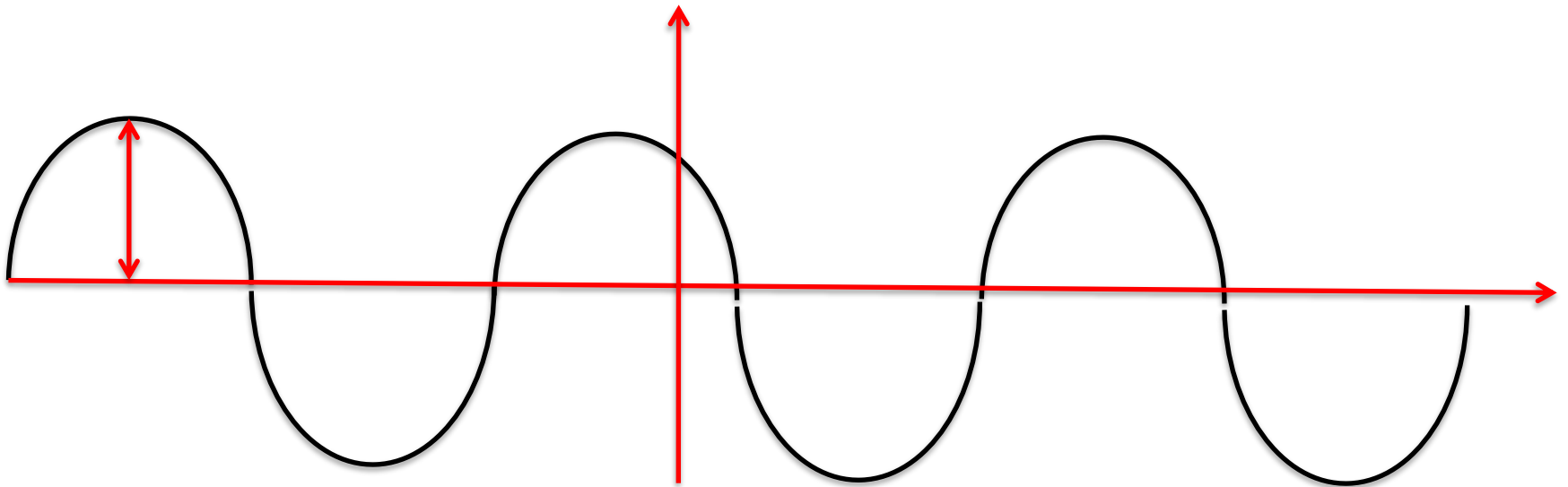
- Característica 1: A dependência da energia cinética dos fotoelétrons com a intensidade luminosa.
- Previsão clássica: Os elétrons devem absorver energia continuamente das ondas eletromagnéticas. Uma luz mais intensa deveria transferir energia mais rapidamente para o metal e os elétrons devem ser ejetados com mais energia cinética.
- Resultado experimental: A energia cinética máxima dos fotoelétrons é *independente* da intensidade da luz.

Contraste entre as previsões e os resultados experimentais



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

$$E \propto I = A^2$$

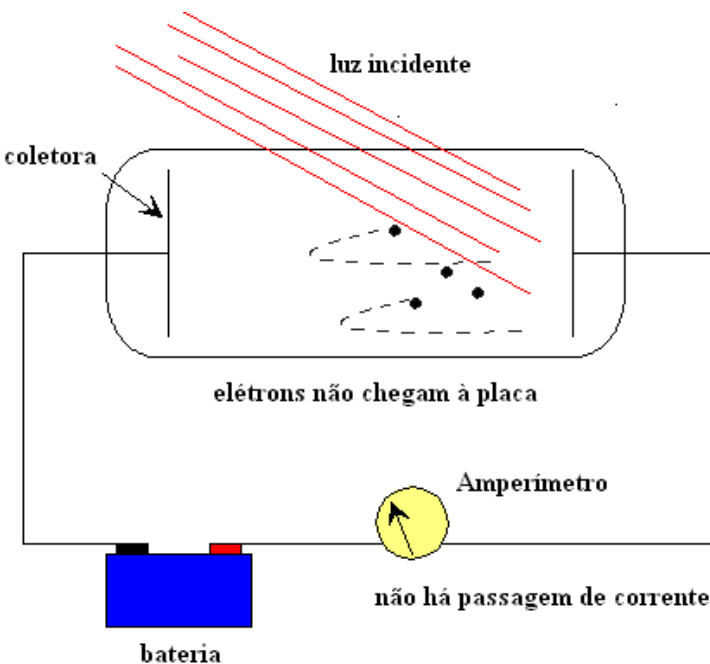


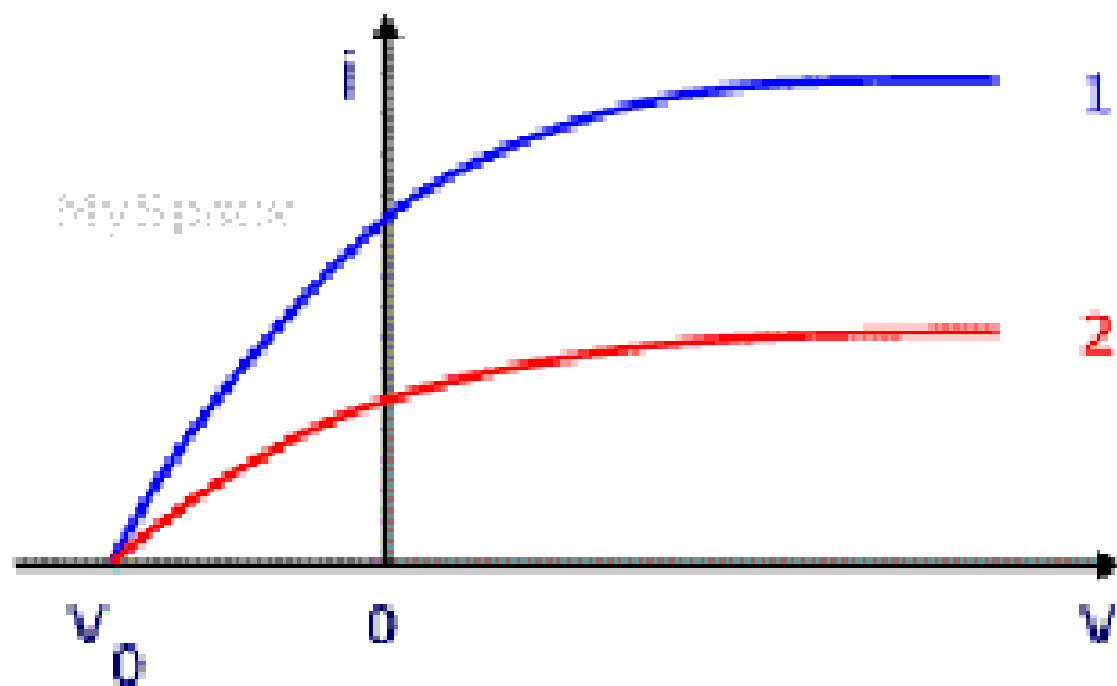
Contraste entre as previsões e os resultados experimentais

- potencial de frenamento independe da intensidade da luz

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{max} = eV_0$$

Existe uma ddp (potencial de frenamento = V_0) para a qual nenhum elétron atinge o ânodo (-)





Contraste entre as previsões e os resultados experimentais



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

- Característica 1: A dependência da energia cinética dos fotoelétrons para com a intensidade luminosa.
- Previsão clássica: Os elétrons devem absorver energia continuamente das ondas eletromagnéticas. Uma luz mais intensa deveria transferir energia mais rapidamente para o metal e os elétrons devem ser ejetados com mais energia cinética.
- Resultado experimental: A energia cinética máxima dos fotoelétrons é *independente* da intensidade da luz.

Contraste entre as previsões e os resultados experimentais

- Característica 2: O tempo entre a incidência da luz e a ejeção dos fotoelétrons.
- Previsão clássica: Para uma luz muito fraca, deve ocorrer um intervalo de tempo mensurável entre a incidência da luz e a ejeção de um elétron. Esse tempo é necessário para o elétron absorver a radiação incidente antes de adquirir energia suficiente para escapar do metal.
- Resultado experimental: Elétrons são emitidos da superfície quase que instantaneamente (menos de 10^{-9} s após a superfície ser iluminada), mesmo a intensidades muito baixas.

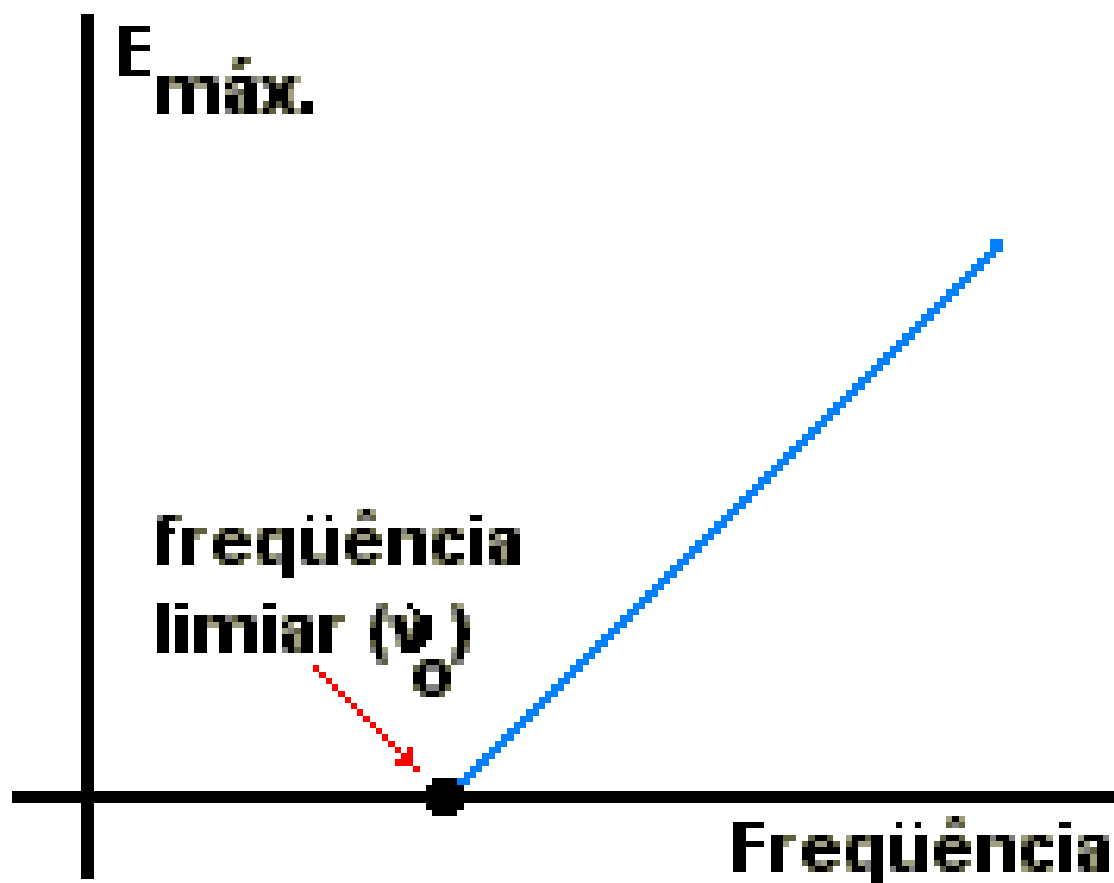
Contraste entre as previsões e os resultados experimentais



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

- Característica 3: A dependência da ejeção dos elétrons com a frequência da luz.
- Previsão clássica: Elétrons devem ser ejetados a qualquer frequência da luz incidente, desde que a intensidade seja alta o suficiente, pois energia está sendo transmitida ao metal independente da frequência.

- Colocando em um gráfico



Contraste entre as previsões e os resultados experimentais



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

- Característica 3: A dependência da ejeção dos elétrons com a frequência da luz.
- Previsão clássica: Elétrons devem ser ejetados a qualquer frequência da luz incidente, desde que a intensidade seja alta o suficiente, pois energia está sendo transmitida ao metal independente da frequência.
- Resultado Experimental: Não há ejeção de elétrons se a frequência da luz está abaixo de uma certa frequência de corte (f_0), que é característica do metal que está sendo iluminado.

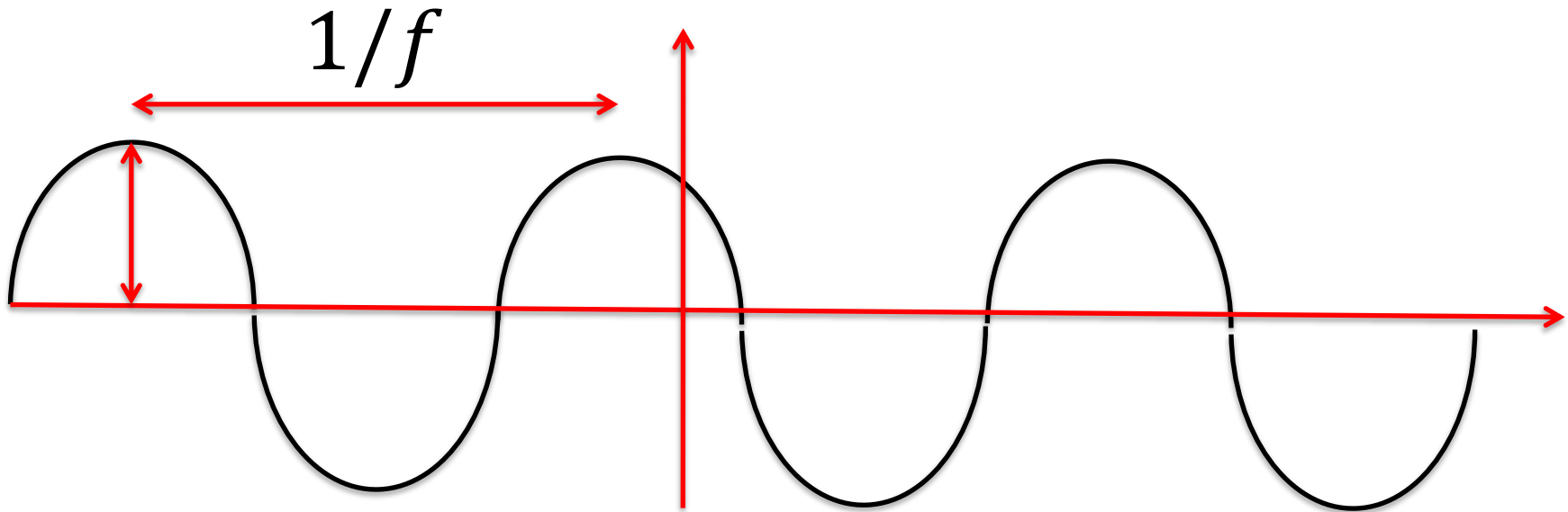
- Característica 4: A dependência da energia cinética dos elétrons para com a frequência da luz.
- Previsão clássica: Nenhuma relação entre a frequência da luz e a energia cinética dos fotoelétrons deve existir. A energia cinética deve estar relacionada com a intensidade da luz.

Contraste entre as previsões e os resultados experimentais



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

$$E \propto I = A^2$$



- Característica 4: A dependência da energia cinética dos elétrons para com a frequência da luz.
- Previsão clássica: Nenhuma relação entre a frequência da luz e a energia cinética dos fotoelétrons deve existir. A energia cinética deve estar relacionada com a intensidade da luz.
- Resultado experimental: A energia cinética dos fotoelétrons aumenta com o aumento da frequência da luz.

Nem todo herói usa capa



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



Efeito Fotoelétrico



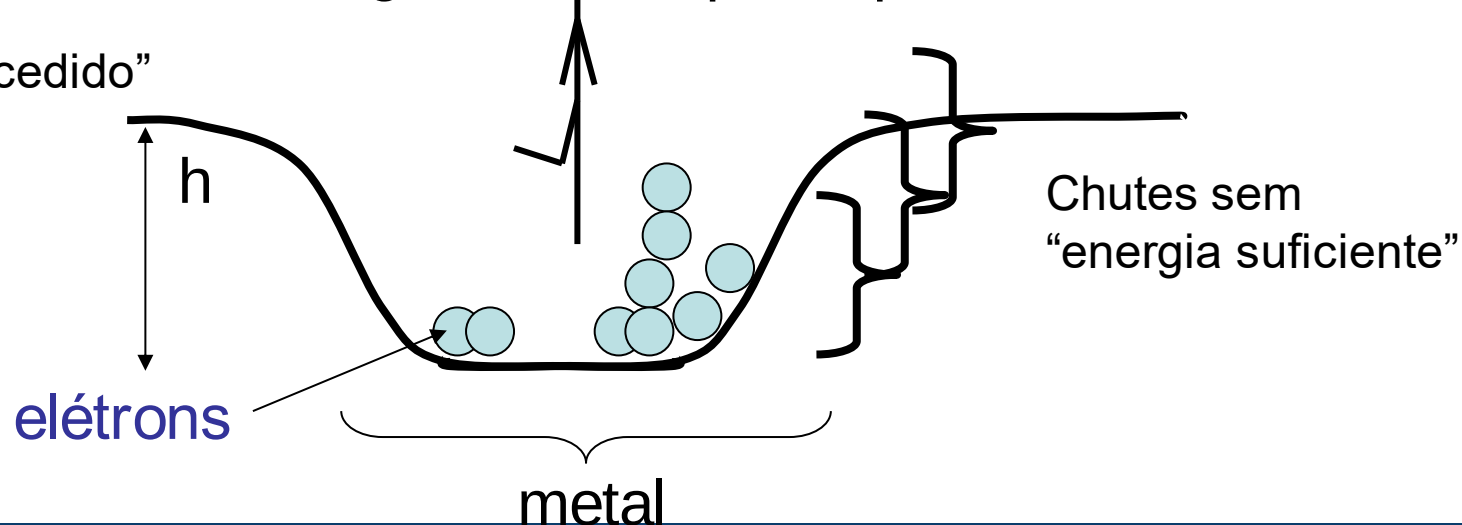
IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

Analogia: bola em um buraco

Energia Cinética da Bola = Energia do chute – mgh

Quanto mais forte o chute, maior a probabilidade da bola sair

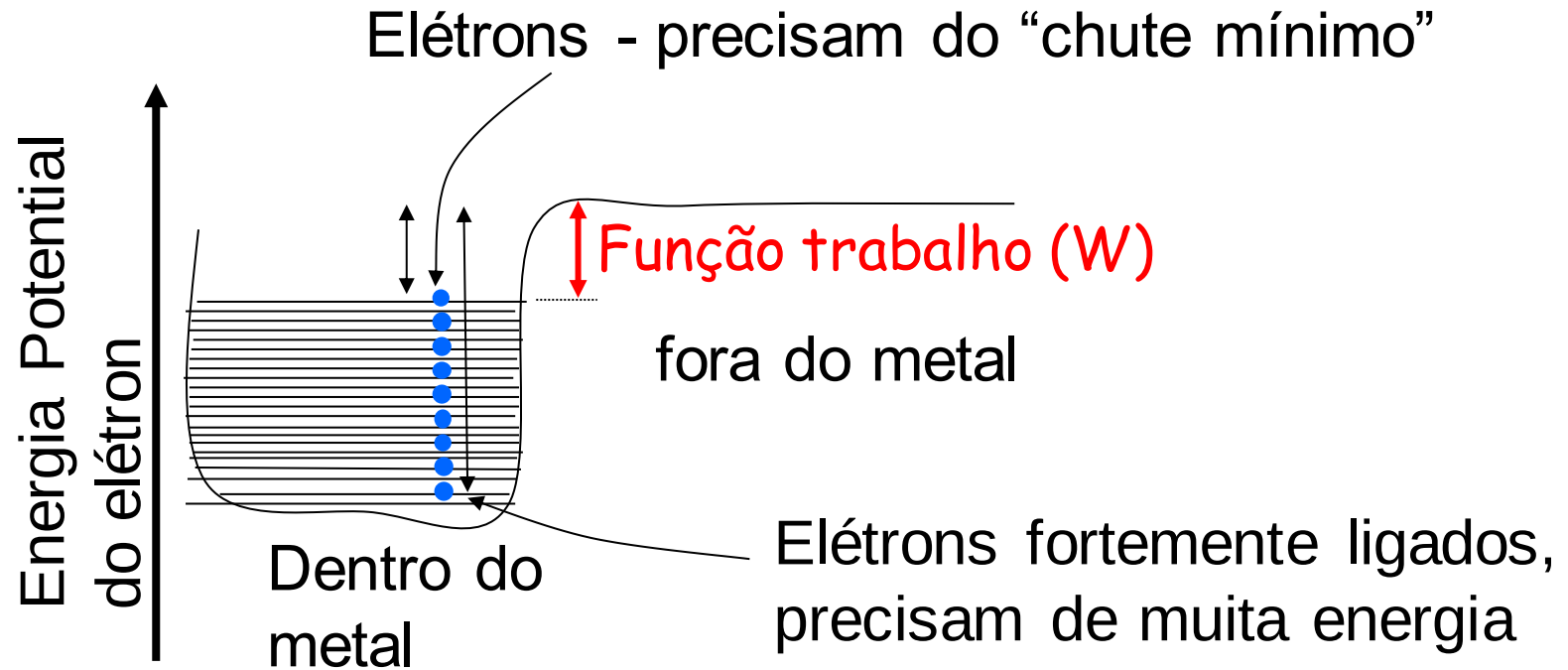
O chute deve ter uma energia mínima para que a bola saia!



No metal temos



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA



Efeito Fotoelétrico



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

- Equação de Einstein

Potencial de frenamento

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = eV_0 = hf - W$$

Energia cinética
do elétron

“chute”

W = função trabalho
(energia necessária para
“arrancar” o elétron)
característica do material

Como e quem dá o chute?

Proposta: Quantização (Planck) é um aspecto geral das ondas eletromagnéticas

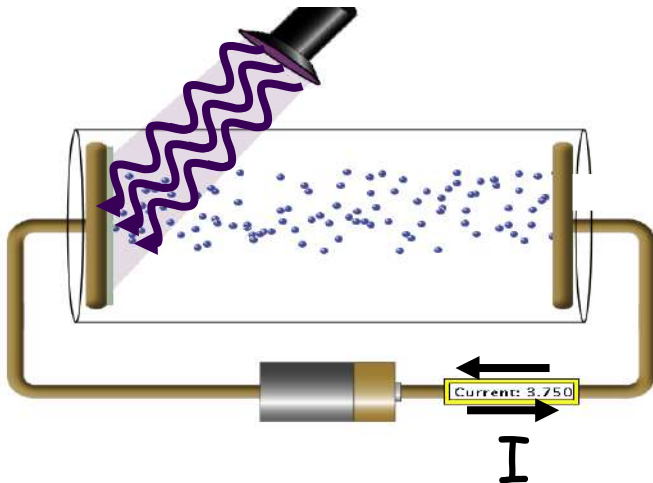
- Quanta = fótons
- Energia fornecida em pacotes (chutes)

Efeito Fotoelétrico



IFT - UNESP
INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

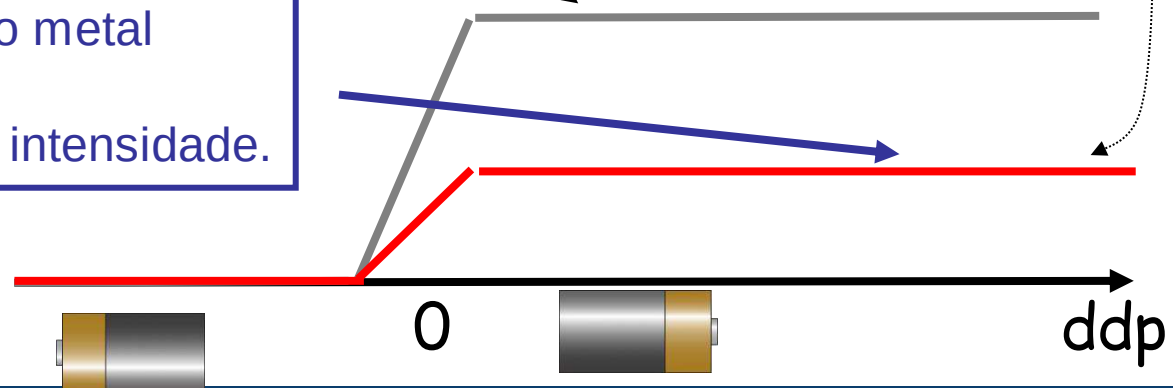
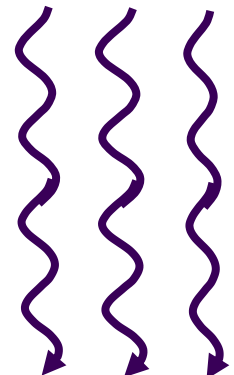
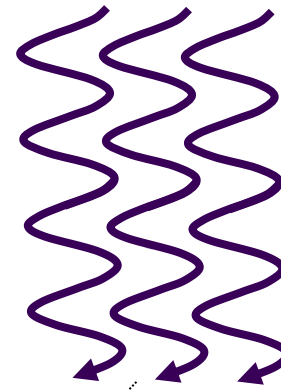
- Aumentar a intensidade $\neq$ aumentar energia
Número de fótons frequência



Menos elétrons saem do metal
Corrente decresce.
Corrente proporcional à intensidade.

Intensidade alta

Intensidade baixa



$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = 0 \rightarrow hf_0 = \varphi$$

- Interferência e difração = fenômenos coletivos (resultados médios)
- Fótons = fenômenos corpusculares (caráter individual)
- Comparação: gotas d'água – jato de água

Não é possível identificar gotas d'água em um jato na mangueira do jardim!

Dualidade onda-partícula

- Explicação dos fenômenos associados à ondas eletromagnéticas:
 - Ondas – difração, interferência, ...
 - Partículas – Corpo Negro, Efeito Fotoelétrico, Efeito Compton, criação e destruição de pares ...
- Necessários e complementares
- Experimento determina o caráter observado



Pergunta: um estudante afirma que vai ejetar elétrons de uma peça de metal colocando uma antena transmissora de rádio próxima o metal e enviando um forte sinal de rádio AM pela antena. Isso funcionará?

Dica: Calcule aproximadamente a energia de uma onda com frequência na faixa de rádio AM (em eletronsvolts).

A função trabalho típica de um metal é da ordem de alguns eV.