

Universidade Federal do ABC

Estrutura da Matéria

Introdução à Mecânica Quântica I

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Estrutura.html>

Física Quântica

- Física das **escalas atômicas** e **sub-atômicas**.
- Clássica \Leftrightarrow Quântica (desde ~ 1900)
- Certas **grandezas** (matéria, carga elétrica, energia, momento angular, ...) ocorrem somente em **determinados valores** \Rightarrow **Quantizadas**
- **Partículas** têm **propriedades** de **ondas** (comprimento de onda, interferência, ...) e vice-versa (quantização, momento linear, localização no espaço, ...) \Rightarrow **Dualidade partícula-onda**
- Estas partículas/ondas são descritas por **funções de ondas** (distribuições de probabilidades), que satisfazem a **Equação de Schrödinger**.

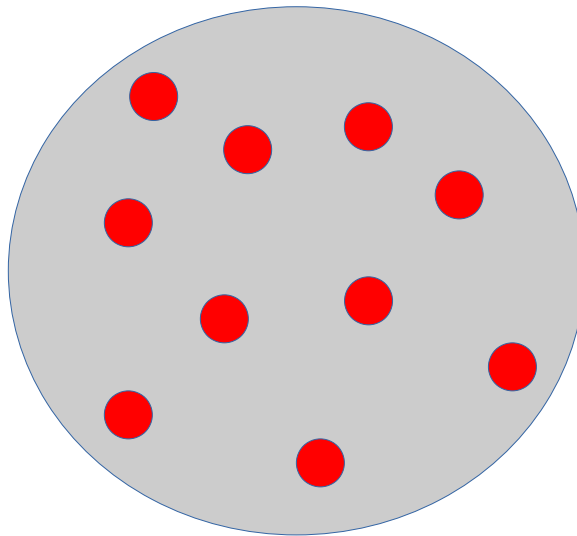
Física Quântica

- A física quântica **não é determinista**
- Existem **indeterminações** nas grandezas físicas (posição, momento linear, ...) cujos limites inferiores são relacionados pelo **princípio de incerteza** de Heissenberg.
- Partículas idênticas são indistinguíveis e **intercambiáveis**.
- Certas partículas (elétrons, prótons) seguem o **princípio de exclusão de Pauli**: Dois elétrons (ou prótons, ou ...) não podem estar ao mesmo tempo no mesmo estado (quântico).
- Os efeitos da física quântica se manifestam no mundo **microscópico** (átomos, partículas elementares).
Para ordens de grandeza do mundo **macroscópico**, as leis da física quântica têm que tender às leis da física clássica
=> **princípio de correspondência**

Lembrete: O Átomo de Thomson

Pudim de ameixas (Plum Pudding)

A **massa** dos **átomos** era muito **maior** do que a soma das **massas** dos seus **elétrons**.

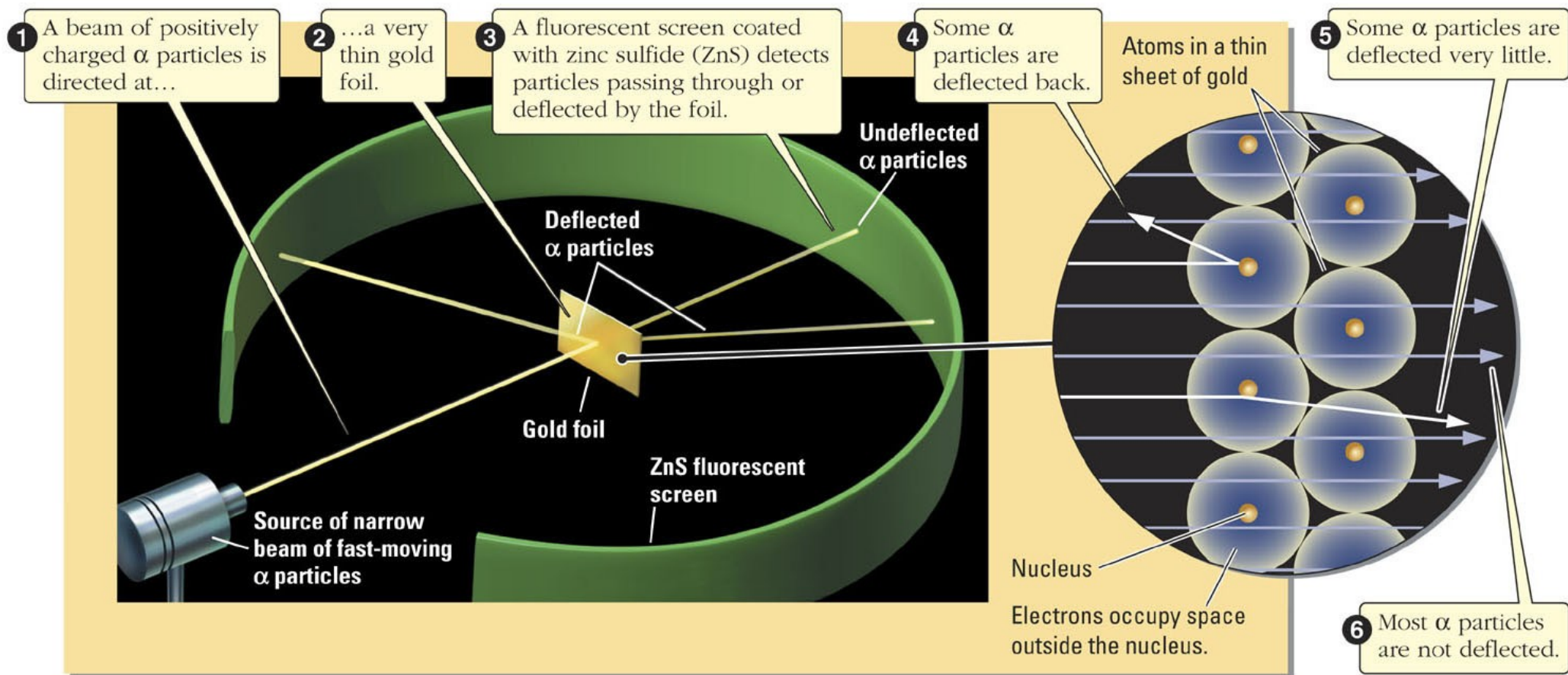


Uma **distribuição uniforme** dos **elétrons** no mar de massa e carga positiva garantia o **equilíbrio**.

=> Átomos {
Elétrons (cargas negativas)
Mar de massa e carga positiva

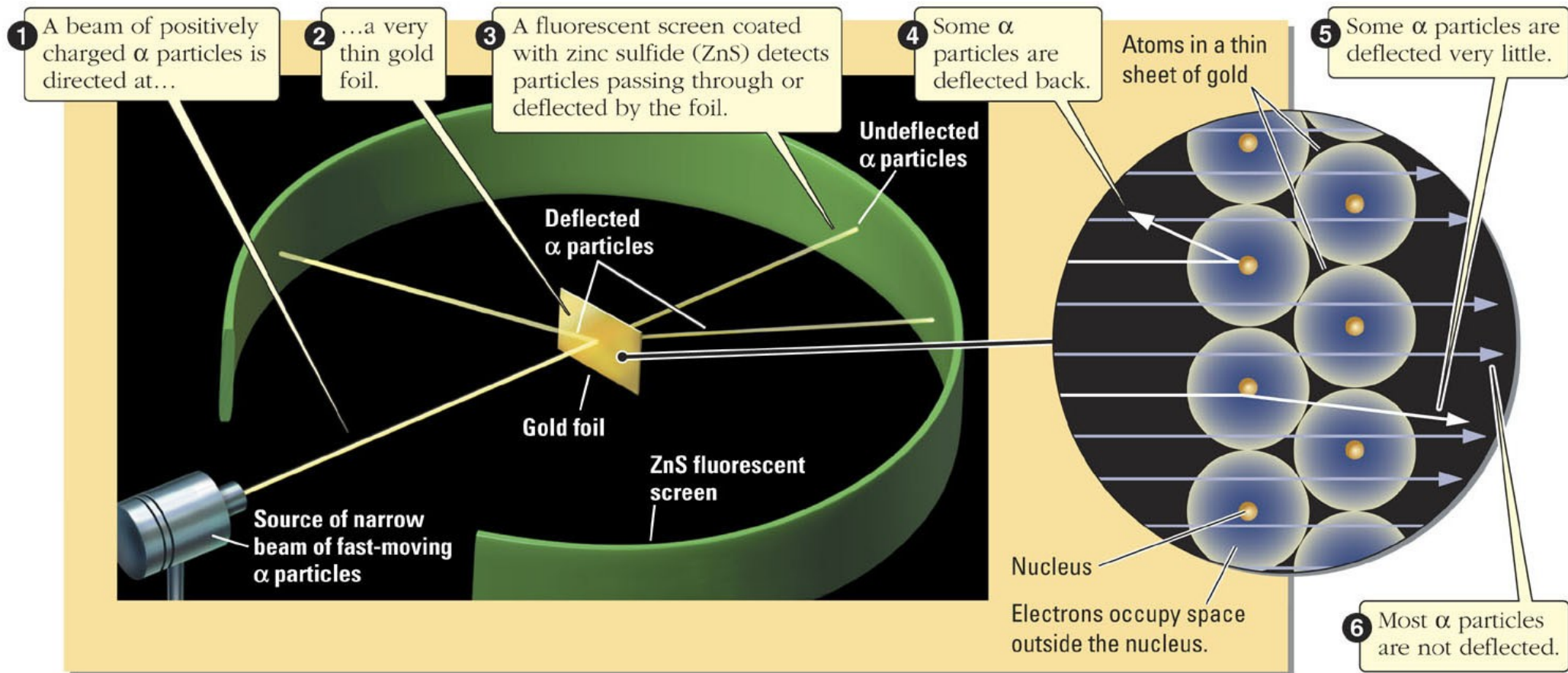
O Experimento de Rutherford

1908: O inglês Ernest Rutherford analisou a **distribuição** da **carga positiva** e da **massa** dentro dos **átomos**.



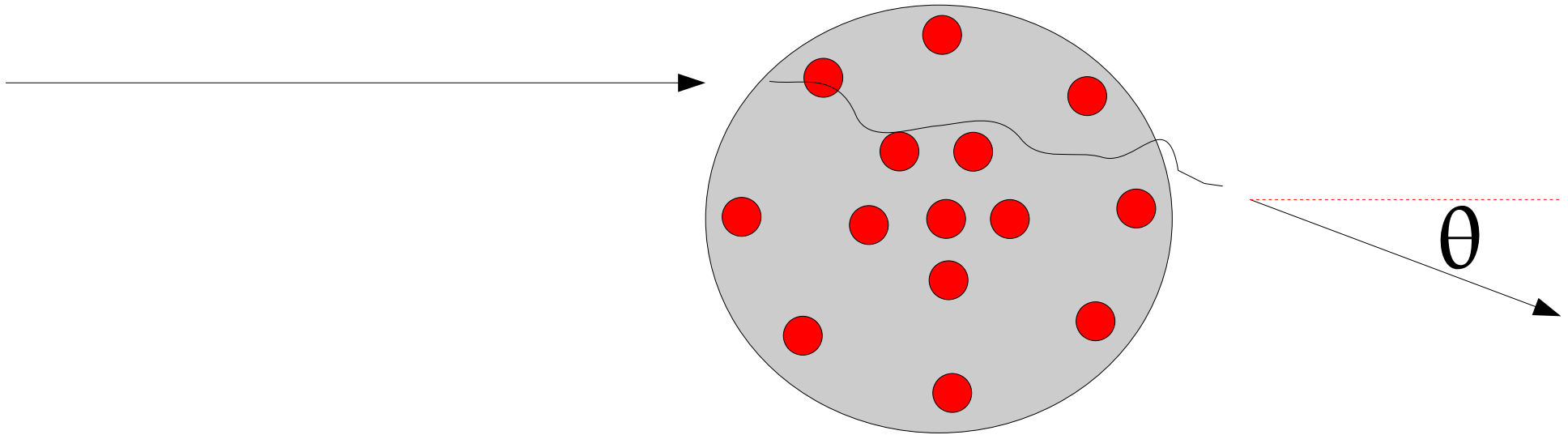
O Experimento de Rutherford

Ele observou o **espalhamento** de partículas α , que basicamente são núcleos de átomos de He (dois prótons e dois nêutrons), pelos **átomos** de uma **folha fina** de ouro.



O Experimento de Rutherford

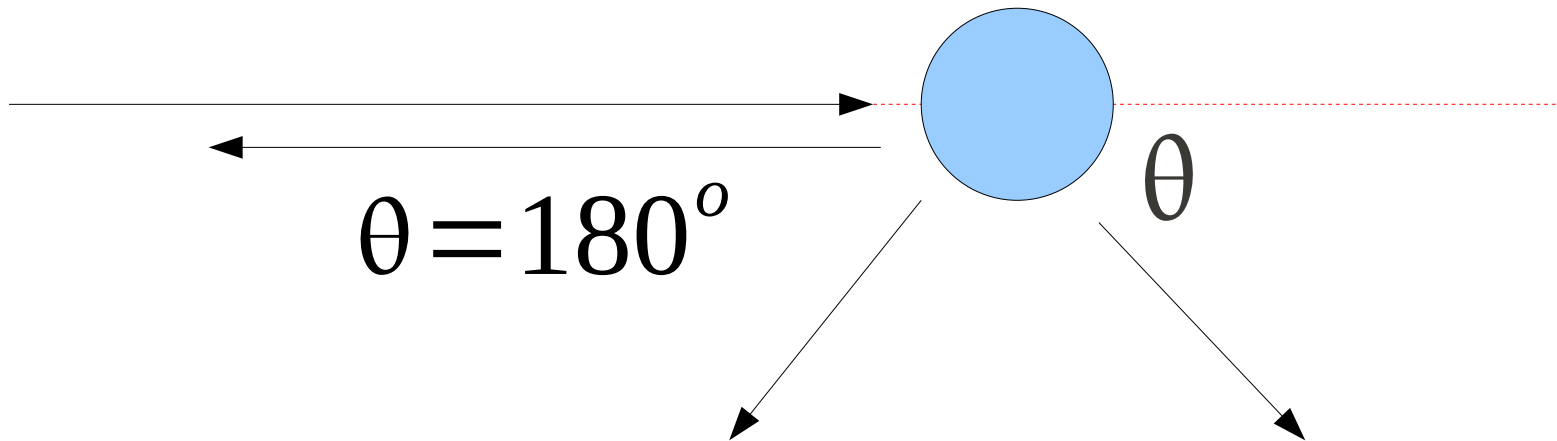
O que se **esperava**



Espalhamento das partículas α por **pequenos ângulos**.

O Experimento de Rutherford

O que se **obteve**

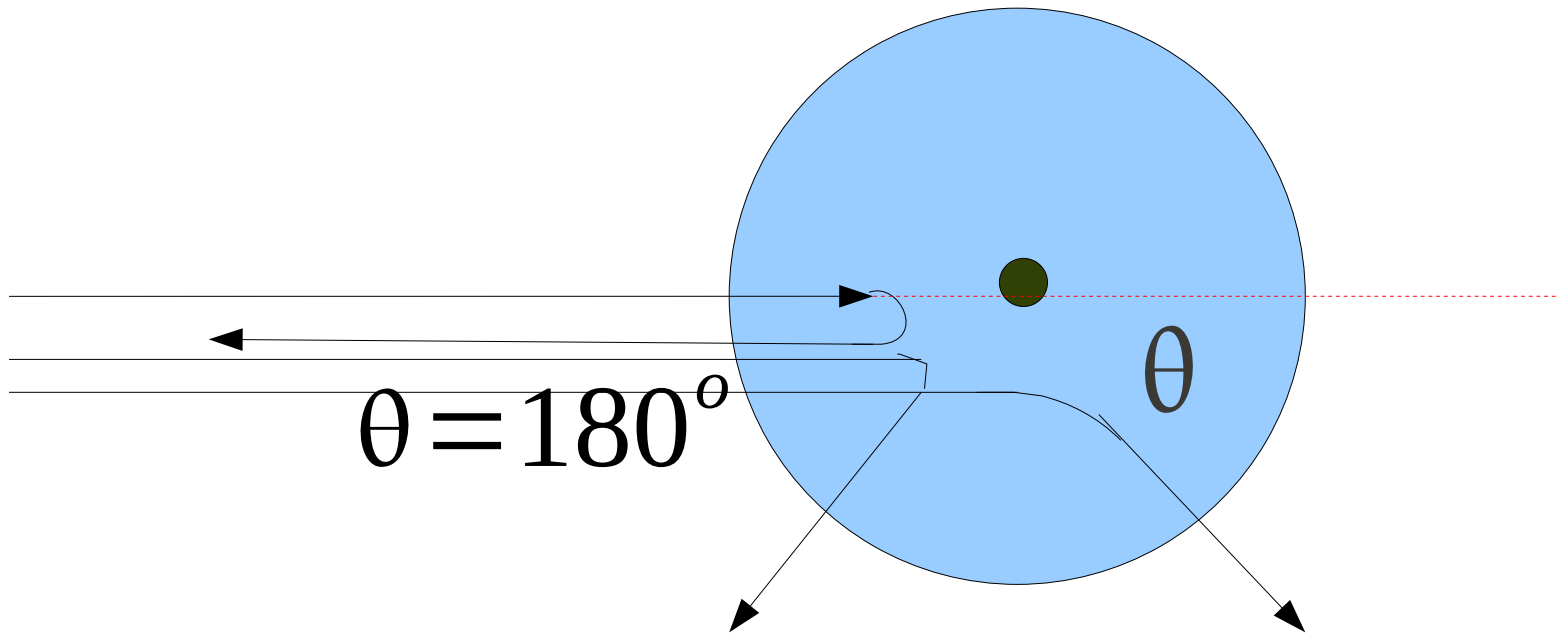


Espalhamento por **ângulos grandes**, até $> 90^\circ$.

Rutherford: “Foi o evento mais incrível da minha vida. Foi tão incrível quanto se você disparasse uma bala de canhão em um lenço de papel e ela voltasse para atingir você.”

O Experimento de Rutherford

A Explicação (mais de perto)



Toda a **massa** e **carga positiva** são concentradas num espaço muito pequeno, o **núcleo** do átomo.

O Experimento de Rutherford

A nova expectativa

Supondo uma **distribuição pontiforme** de **massa** e carga positiva pode se calcular o **número** de **partículas espalhadas** em função do **ângulo** de espalhamento θ , ou seja a distribuição de ângulos de espalhamento:

$$\Delta N = \left(\frac{I_0 A_{ci} nt}{r^2} \right) \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2E_k} \right)^2 \frac{1}{\text{sen}^4(\theta/2)}$$

O que foi confirmado no experimento.

=> A hipótese do núcleo deu certo, e este é tão **pequeno** que ele parece pontiforme para as partículas α .

O Experimento de Rutherford

O Tamanho do núcleo

Quanto **maior** é a **energia cinética** (velocidade) das partículas α , tanto mais fundo elas conseguem penetrar no campo elétrico do núcleo, ou seja, tanto **mais perto** do **núcleo** elas conseguem chegar.

As partículas α que estão indo rumo colisão frontal chegam o mais perto.

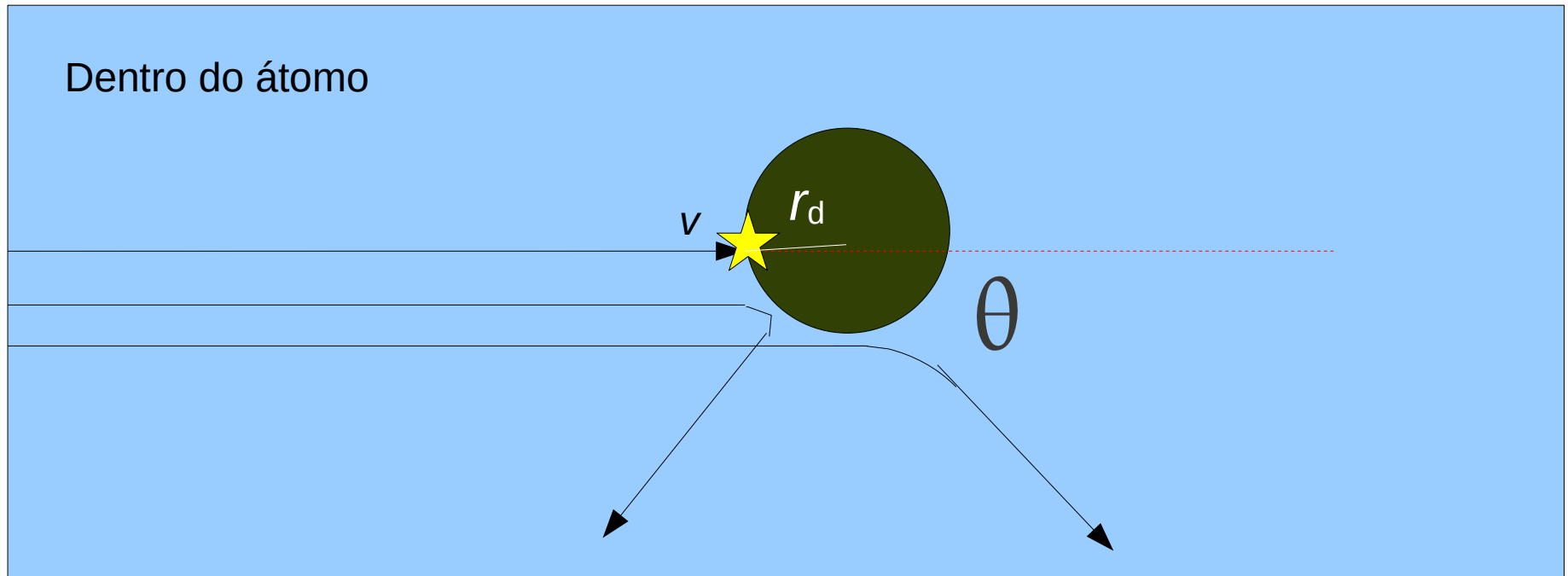
Elas chegam até a distância r_d do centro do núcleo.

$$r_d = \frac{k q_\alpha Q}{\frac{1}{2} m_\alpha v^2}$$

($q_\alpha = +2e =$ carga das partículas α ,
 $Q = +Ze =$ carga do núcleo, $m_\alpha =$ massa das partículas α , $k = 1/4\pi\epsilon_0 =$ constante de Coulomb)

O Experimento de Rutherford

O Tamanho do núcleo (mais de perto ainda)

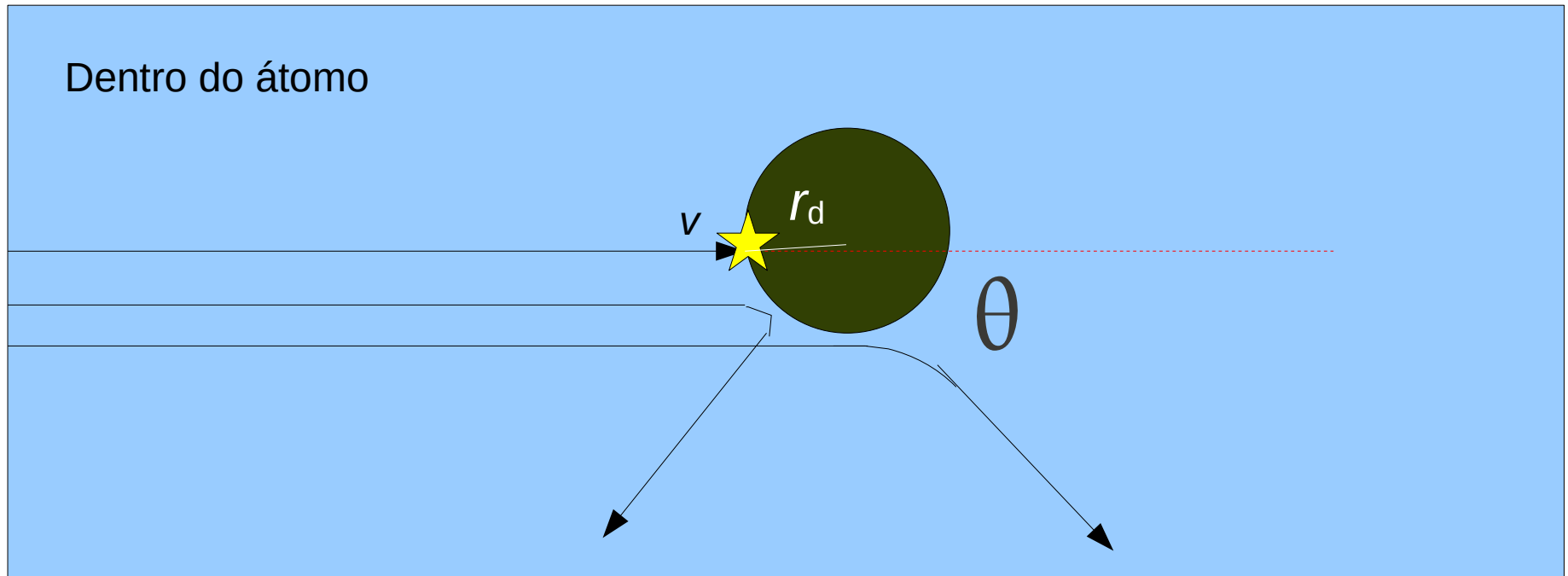


A partir de uma certa **velocidade** v das partículas α , a distribuição de **ângulos** de **espalhamento** começa a **desviar** da **teoria**, começando pelos ângulos grandes.

=> Nesta velocidade, as partículas α conseguem chegar até o núcleo e **bater** nele. => O r_d que corresponde a esta velocidade é o **raio do núcleo**.

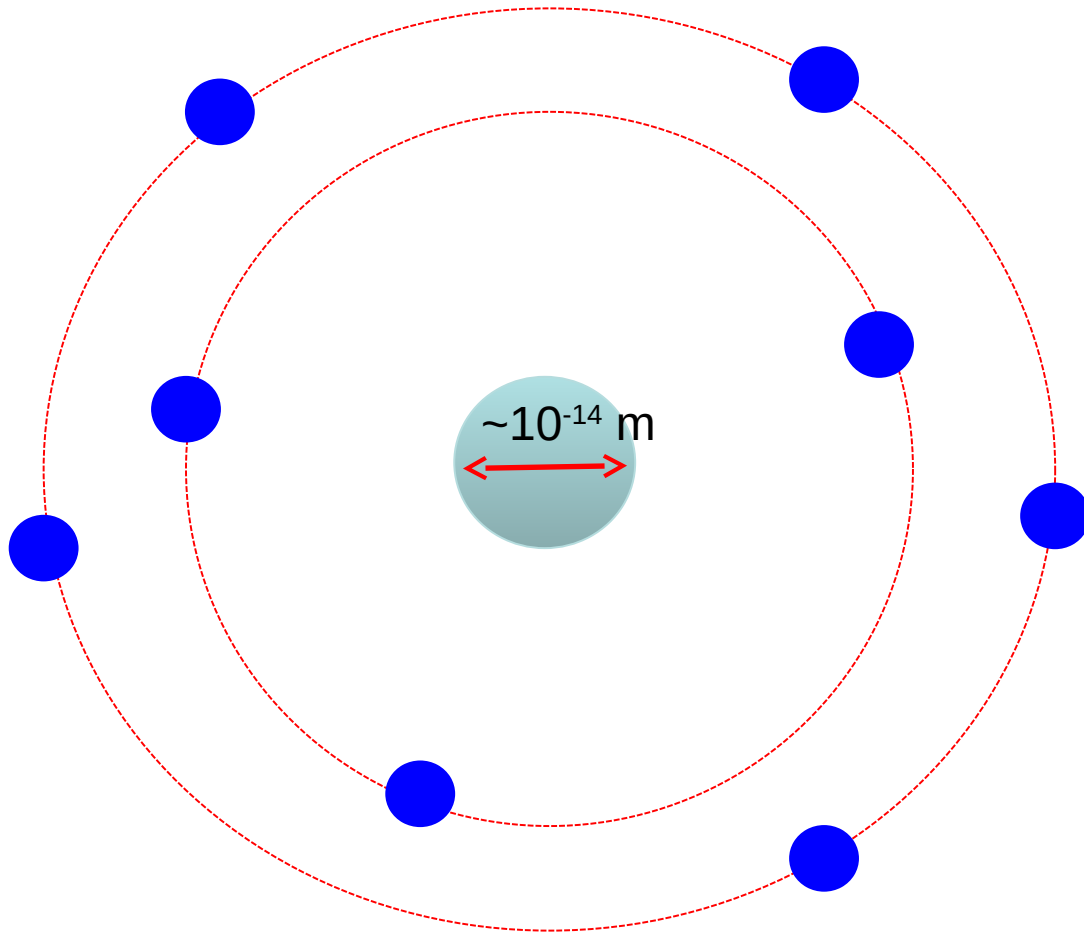
O Experimento de Rutherford

O Tamanho do núcleo (mais de perto ainda)



Rutherford encontrou, que o **tamanho** do núcleo é $\sim 10^{-14}$ m, da ordem de cinco ordens de magnitude menor do que o átomo inteiro (“uma mosca no Maracanã”).

O átomo de Rutherford



- **Núcleo** de carga $+Ze$ rodeado por Z **elétrons** (modelo planetário).
 Z é chamado **número atômico** (H: $Z = 1$, He: $Z = 2$, etc.).
O **número atômico** determina as **propriedades físicas** do átomo.
- Quase toda a massa é **concentrada** no **núcleo**
- Tamanho do núcleo $\sim 10^{-14}$ m

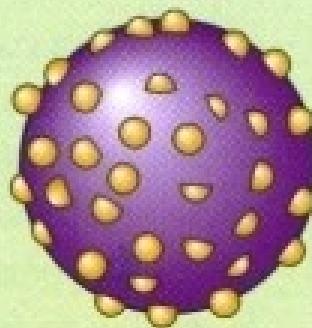
Resumo: Os modelos atômicos

Dalton:
"Bola de bilhar"



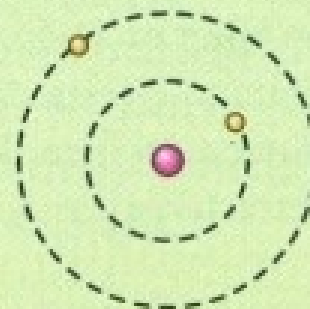
O átomo é uma esfera maciça, indivisível, neutra.

Thomson:
"Pudim de passas"



O átomo é uma esfera maciça, positiva com elétrons encravados nela.

Rutherford:
"Modelo planetário"



O átomo tem um núcleo positivo e muito pequeno ao redor do qual giram os elétrons.

Linha do tempo

1803



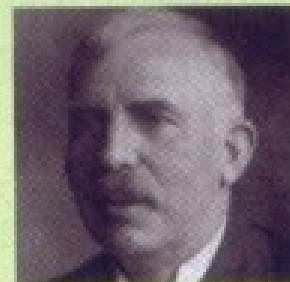
J. Dalton (1766-1844)

1897



J. J. Thomson (1856-1940)

1911



E. Rutherford (1871-1937)

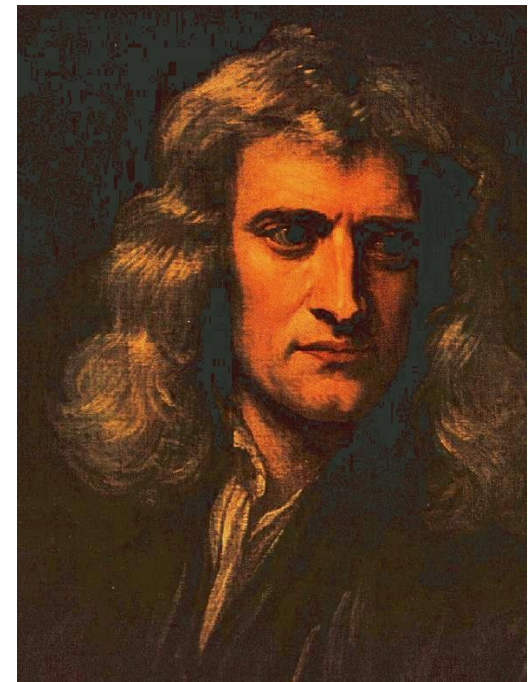
Radiação Eletromagnética

Radiação Eletromagnética: A Luz

Até o começo do século XIX, a maioria dos cientistas acreditava que a luz era um fluxo de partículas emitido por uma fonte luminosa.

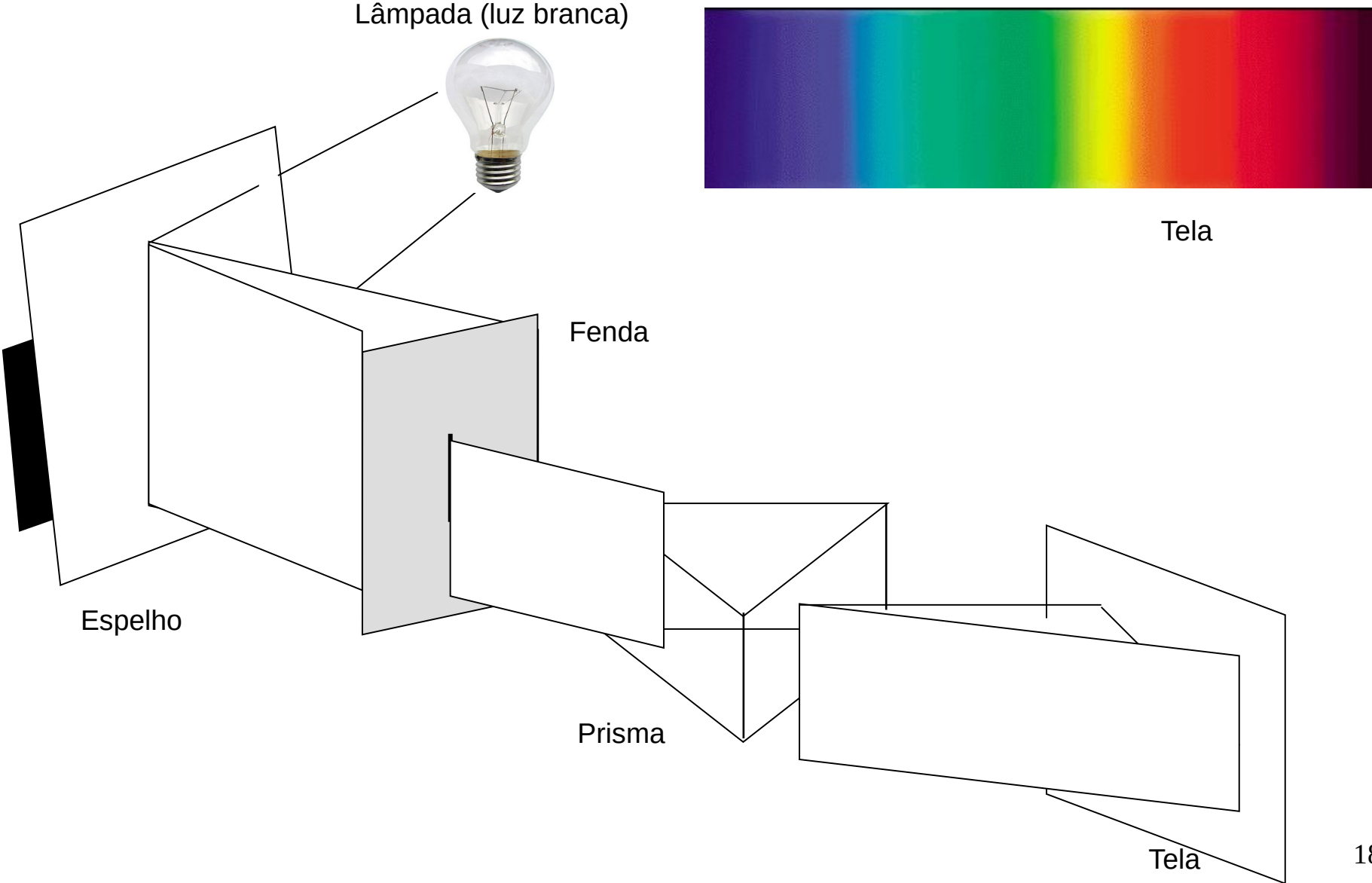
Com base neste modelo, as **partículas de luz** estimulavam a visão ao penetrar no olho.

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.



Newton (1642- 1727)

Espectro da radiação eletromagnética (Newton)



Modelo corpuscular (1672)

Em 1665, Newton demonstrou que a **luz branca**, como a luz do Sol, ao passar por um **prisma** se **decompõe** em luz de diferentes **cores**, formando um **espectro** como o arco-íris.

Usando a **hipótese corpuscular** e as leis da mecânica, ele conseguiu explicar

- A **reflexão**
- A **refração**
- A **dispersão** (a decomposição da luz ao atravessar um prisma) da **luz**.

Tudo bem, mas houve outros **fenômenos** da luz que **não** podiam ser explicados pelo modelo corpuscular:

- A **interferência**
- A **difração**



Modelo ondulatório (1678)

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

A luz como **onda**.

O modelo ondulatório **explica** corretamente a **dispersão**, as leis de **refração** e **reflexão**, a **interferência** e a **difração**, então **todas** as propriedades da luz e fenômenos óticos conhecidos até então, inclusive aqueles que não podiam ser explicados pelo modelo corpuscular.

=> **A luz é uma onda** (por enquanto)



Christiaan Huygens (1629-1695)

Modelo ondulatório da luz

Mas se a luz é uma onda, de que “consiste” a onda, ou seja, que **grandeza física** está **oscilando** e se **propagando** pelo espaço numa onda de luz?

Exemplos de outras ondas: Uma onda de **som** “consiste” de **variações** de **pressão** oscilando e se propagando.

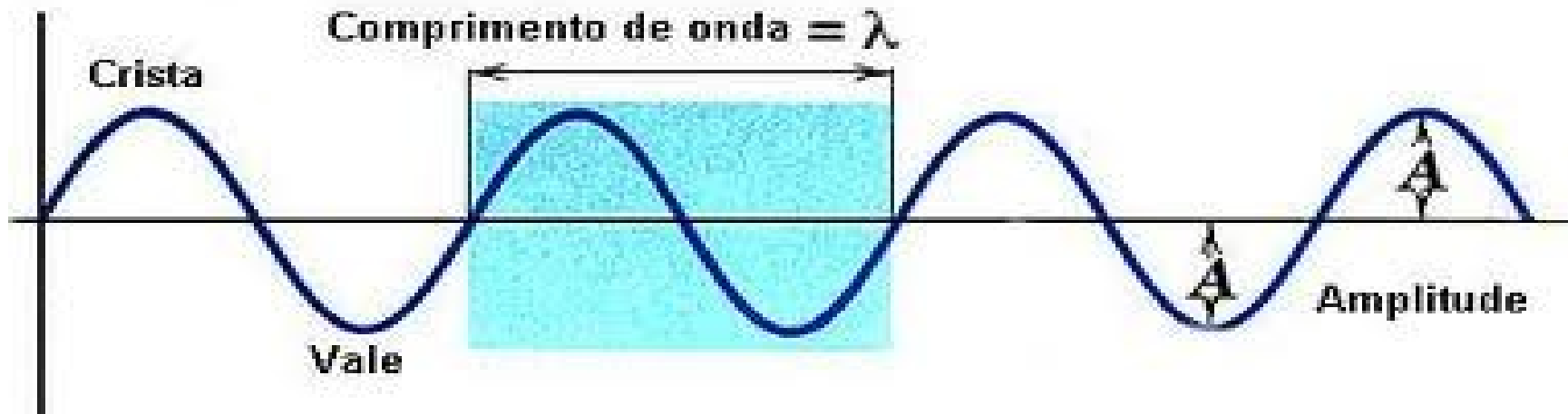
Uma onda no **mar** “consiste” de variações do **nível** da **superfície** da **água**, etc.

Cada onda é alguma **grandeza física** **oscilando** e **se propagando** pelo espaço. Em geral, há **transporte** de **energia**.

No caso da luz, esta(s) grandeza(s) são **campos elétrico** e **magnético**.

A luz é uma onda eletromagnética, ou seja, a combinação de um campo elétrico e um campo magnético oscilando e propagando-se pelo espaço.

Ondas Harmônicas



Amplitude A : intensidade do **deslocamento máximo** dos elementos a partir de suas posições de **equilíbrio** quando a onda passa por eles.

Comprimento de onda, λ : **distância** (paralela à direção de propagação da onda) entre **repetições** da **forma** da onda.

Período de oscilação T de uma onda: o **tempo** que um elemento qualquer da corda leva para se mover realizando **uma oscilação completa**.

Frequência ν (ou f) = $1/T$

Velocidade de propagação $v = \lambda/T = \lambda\nu$

Modelo ondulatório da luz

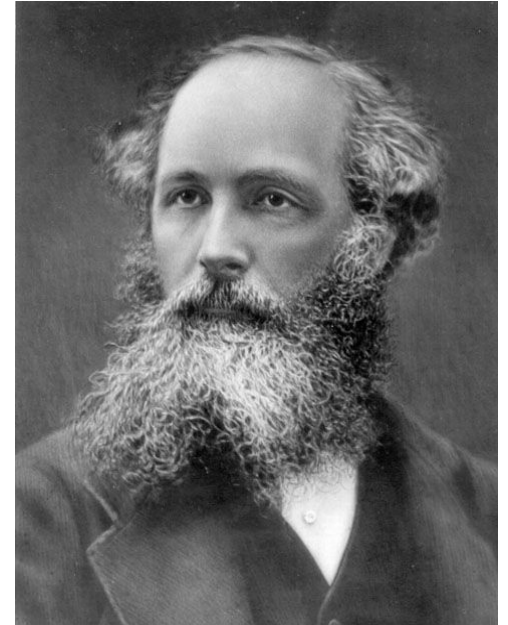
Esse modelo ondulatório da luz não foi aceito de imediato, pois, dentre outras argumentações, temos que as ondas conhecidas na época (som, ondas na superfície da água, etc.) eram ondas mecânicas e necessitavam de um **meio** para se propagar.

Entretanto, a luz viaja do Sol até a Terra no **vácuo**.

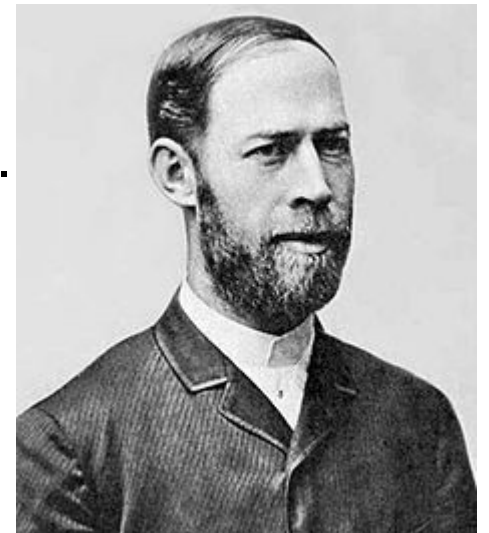
A partir de então, vários outros **cientistas** (Augustin Fresnel, Jean Foucault, dentre outros) desenvolveram **experimentos** e modelos que **fortaleceram** o **modelo ondulatório** da luz.

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.



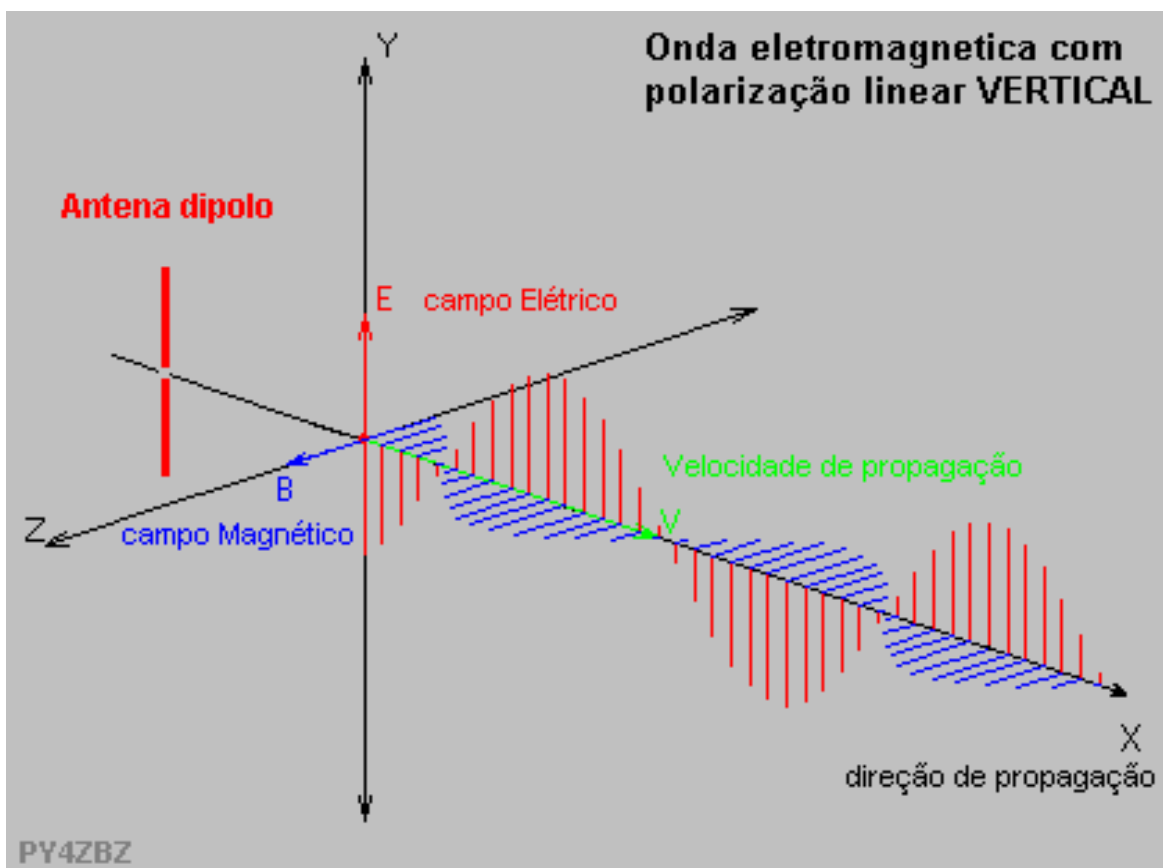
James Clerk Maxwell
(1831-1879)



Heinrich Rudolf Hertz 23
(1857-1894)

Propagação de uma onda eletromagnética

Os campos elétrico e magnético são perpendiculares à direção de propagação da onda e entre si, como mostrado neste desenho. As ondas eletromagnéticas são produzidas pela aceleração de cargas.



A onda se propaga na direção $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$.

!!! A onda existe no espaço inteiro, não só no eixo x.

As ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo com uma velocidade c (a velocidade da luz).

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

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$ = permeabilidade no vácuo

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$ = permissividade no v.

$\Rightarrow c \approx 300\,000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Frequência e comprimento de onda

Como a onda se propaga com a velocidade c pela distância de um comprimento de onda, λ , no tempo de um período de oscilação, $T = 1/\nu$, é fácil obter a relação entre λ e ν :

$$c = \lambda/T = \lambda \cdot \nu \Rightarrow \lambda = c/\nu \text{ ou } \nu = c/\lambda$$

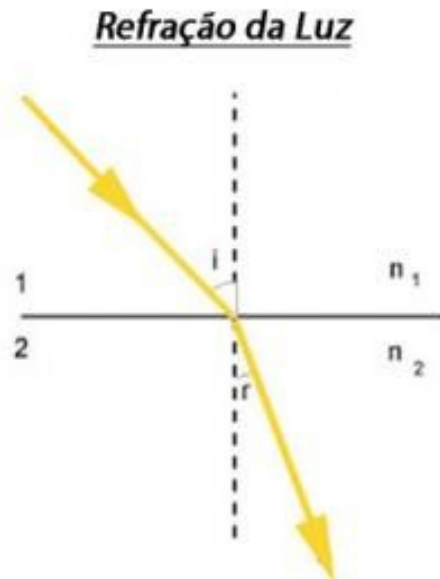
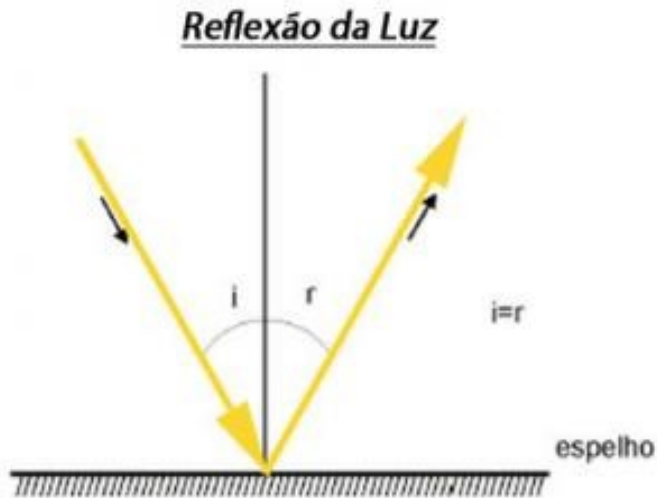
O comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência.

Como visto no experimento de Newton, a luz branca é a sobreposição de luz de todas as cores do arco-íris.

A luz das diferentes cores do arco-íris se distingue pela frequência / pelo comprimento de onda:

Luz azul tem frequência maior resp. comprimento de onda menor do que luz vermelha.

Reflexão e Refração da Luz



Reflexão

Quando luz é **espelhado** numa superfície, os **ângulos** de **incidência** e **reflexão** são **iguais**:

$$i = r$$

Refração

Quando luz passa de um **meio** para um **outro**, a relação entre os **ângulos** de **incidência** e **refração** é

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

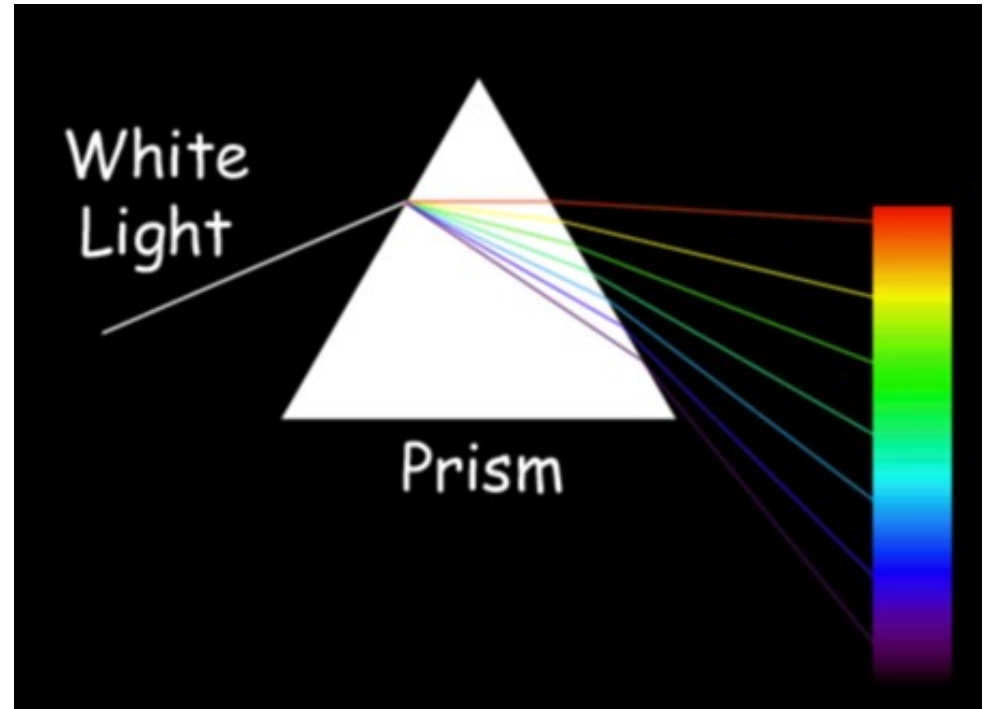
onde $n_{1,2}$ são os **índices de refração** dos dois meios. Quanto **maior** o **índice de refração** de um **material**, tanto **menor** é a **velocidade** da **luz** v no material: $v = c/n$ (no vácuo, $n = 1$).

Porque a luz se separa num prisma?

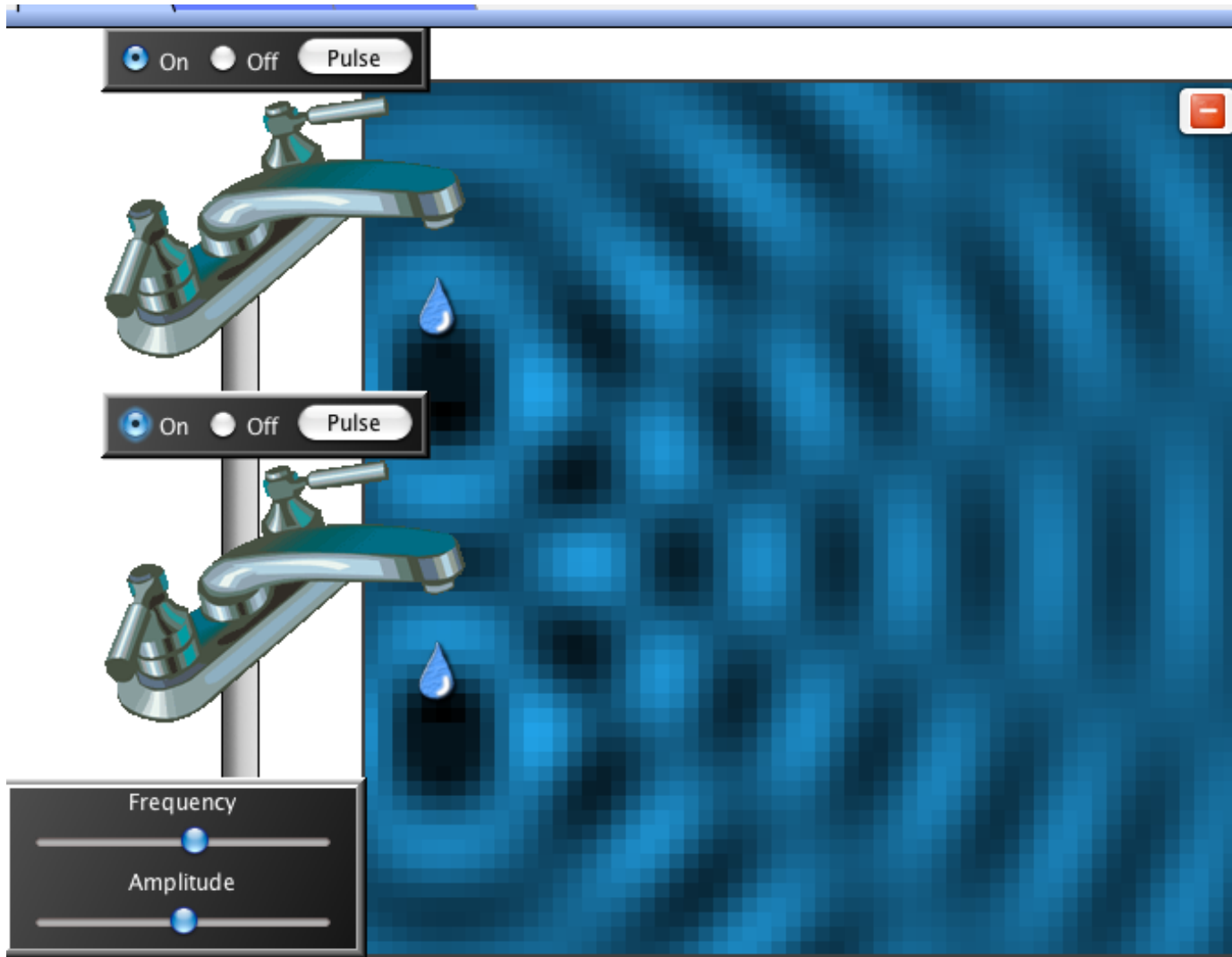
Os **índices de refração** dos **materiais dependem** da **frequência** (da **cor**) da luz.

Por isto, o **ângulo de refração** na **entrada** (e na saída) do **prisma** depende da **cor**.

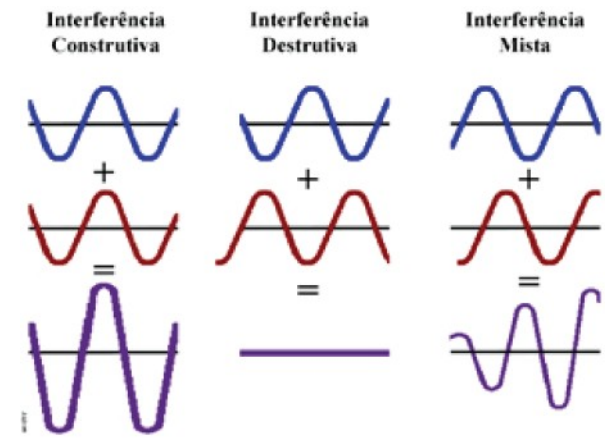
=> Luz com **cores diferentes** é defletida em **direções diferentes** ao passar pelo **prisma**.
A luz é **separada** por **frequência** resp. por **comprimento de onda**.



Interferência



Quando duas ondas se **sobrepõem**, elas se **amplificam** em **certos lugares** (**interferência construtiva**), e se **cancelam** em **outros lugares** (**i. destrutiva**), assim criando um **padrão de interferência**.

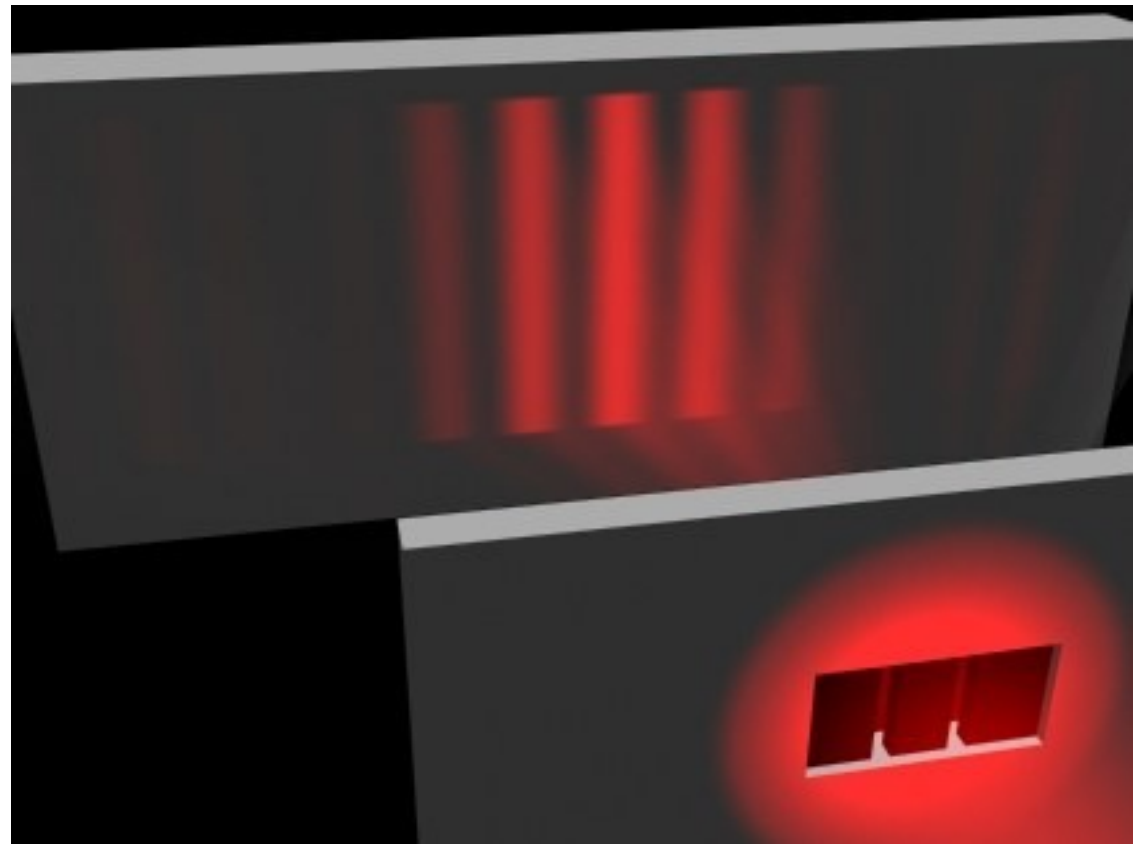
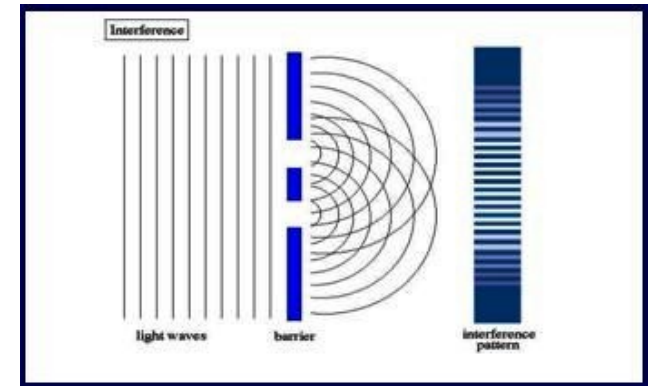


Interferência

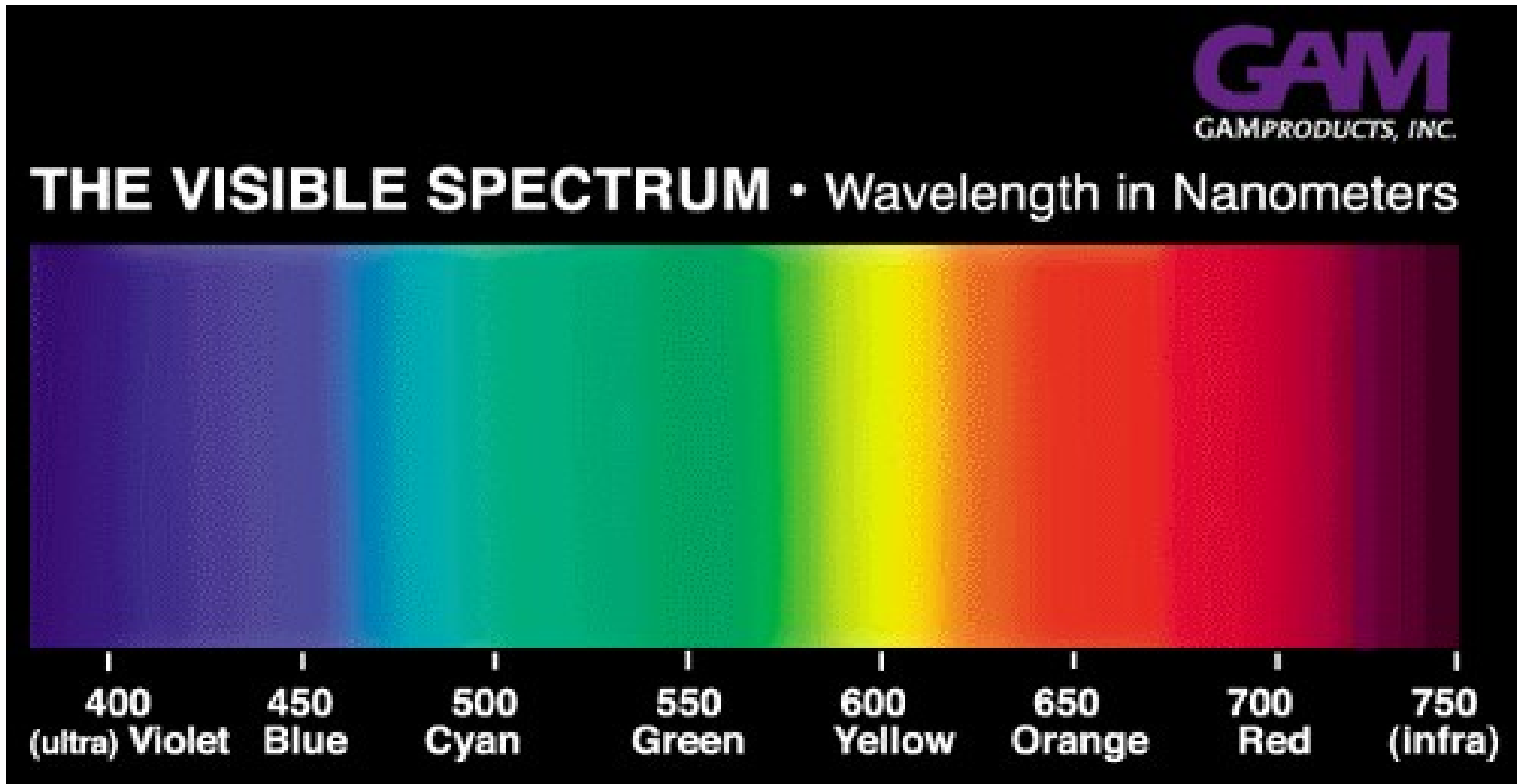
Exemplo de um **padrão** de **interferência** de duas ondas de luz numa **tela**.

As duas ondas são produzidas pela passagem da luz de uma **única fonte** por **duas fendas**.

Para ver o padrão de interferência, a luz tem que ser **monocromática**, q. d. de **uma única frequência** resp. cor.



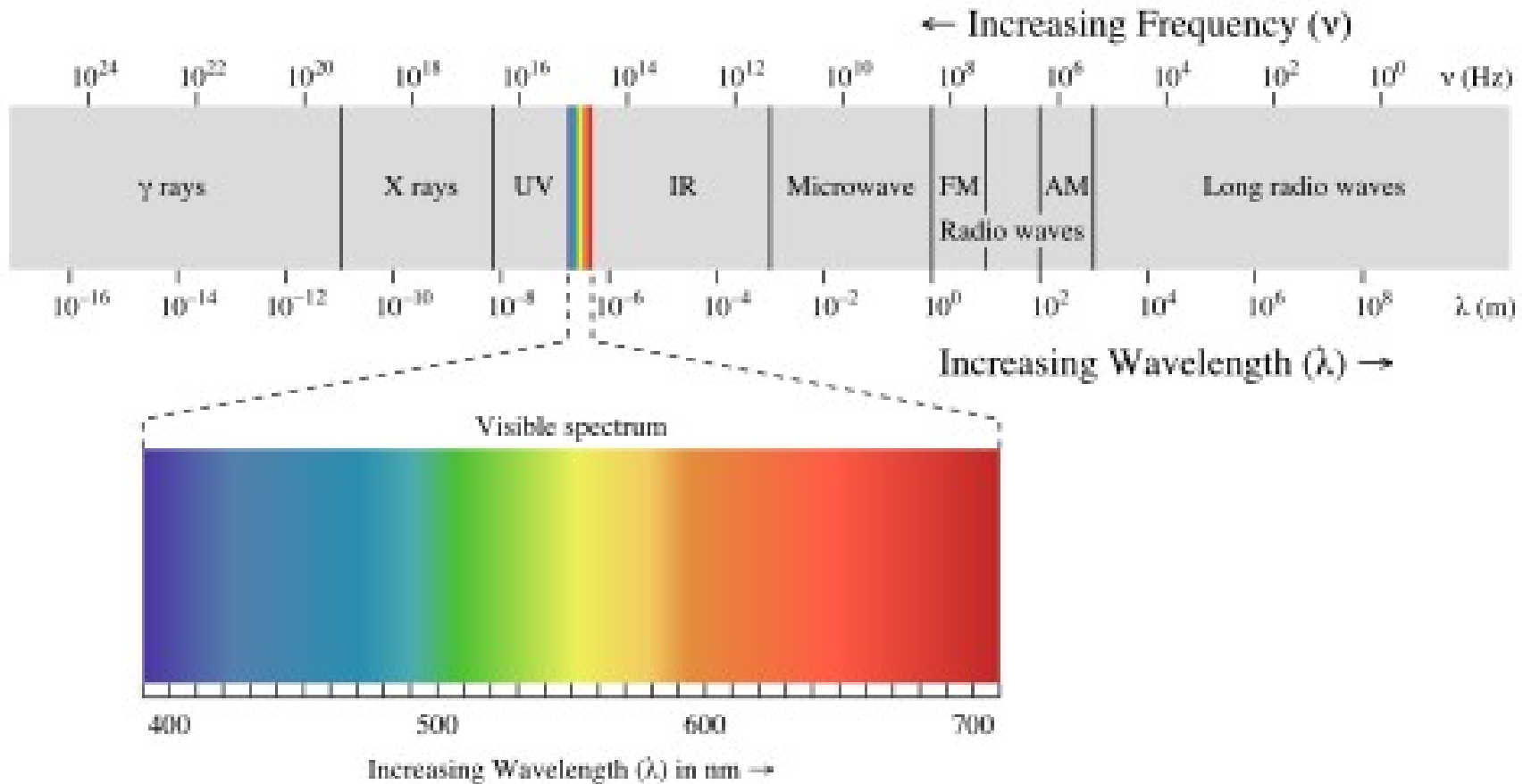
Espectro de comprimentos de onda da luz visível



Espectro de comprimentos de onda da luz visível

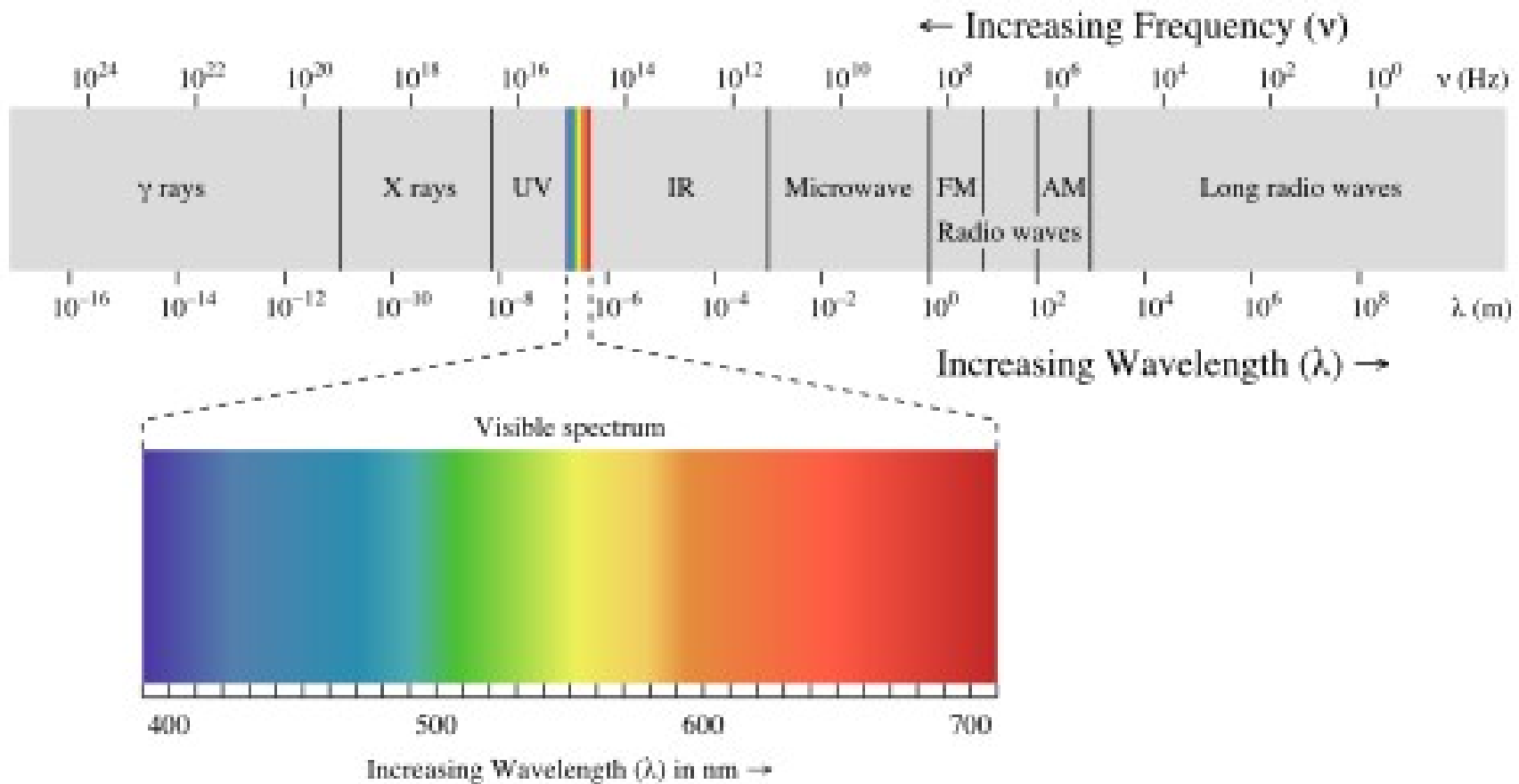
color	wavelength interval	frequency interval
red	~ 700–635 nm	~ 430–480 THz
orange	~ 635–590 nm	~ 480–510 THz
yellow	~ 590–560 nm	~ 510–540 THz
green	~ 560–490 nm	~ 540–610 THz
blue	~ 490–450 nm	~ 610–670 THz
violet	~ 450–400 nm	~ 670–750 THz

Espectro da radiação eletromagnética



Costuma-se classificar a **radiação eletromagnética** pelo seu **comprimento de onda**. Quanto **maior** a **frequência** / **menor** o **comprimento de onda**, tanto **mais energética** é a radiação.

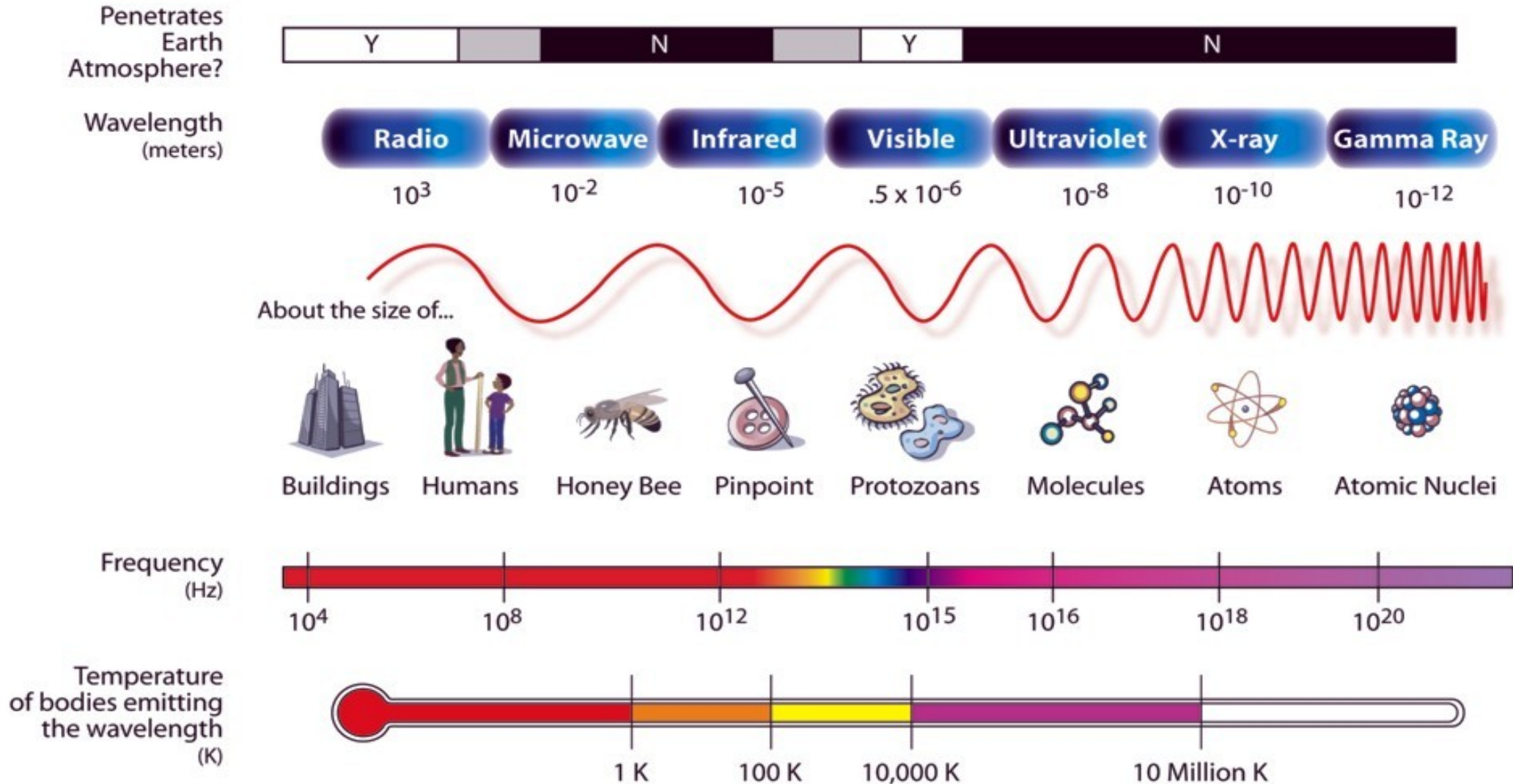
Espectro da radiação eletromagnética



A luz visível ocupa somente uma porção do espectro eletromagnético. Existe radiação EM **menos energética** do que a **luz visível**: ondas **rádio**, **micro-ondas** e radiação **infravermelha**. Também existe radiação EM **mais energética** do que a luz visível: Radiação **ultravioleta**, **raios-X** e raios **γ** (gama).

Espectro da radiação eletromagnética

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



Aspectos do Espectro eletromagnético

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

Aspectos do Espectro eletromagnético



Um homem com a mão num saco de lixo visto no ótico.

Aspectos do Espectro eletromagnético



A mesma fôto no infravermelho.
Nestes comprimentos de onda, o saco de lixo
é transparente, e os óculos, opacos.

Aspectos do Espectro eletromagnético

Röntgen descobriu acidentalmente os raios-X em 1895.

Raios-X são uma radiação eletromagnética muito energética, com frequência alta, resp., comprimento de onda curto.

Raios-X atravessam a carne, pois sua densidade é baixa em relação aos osso.
Porém ao encontrá-los são refletidos.



Wilhelm Conrad
Röntgen (1845-1923)

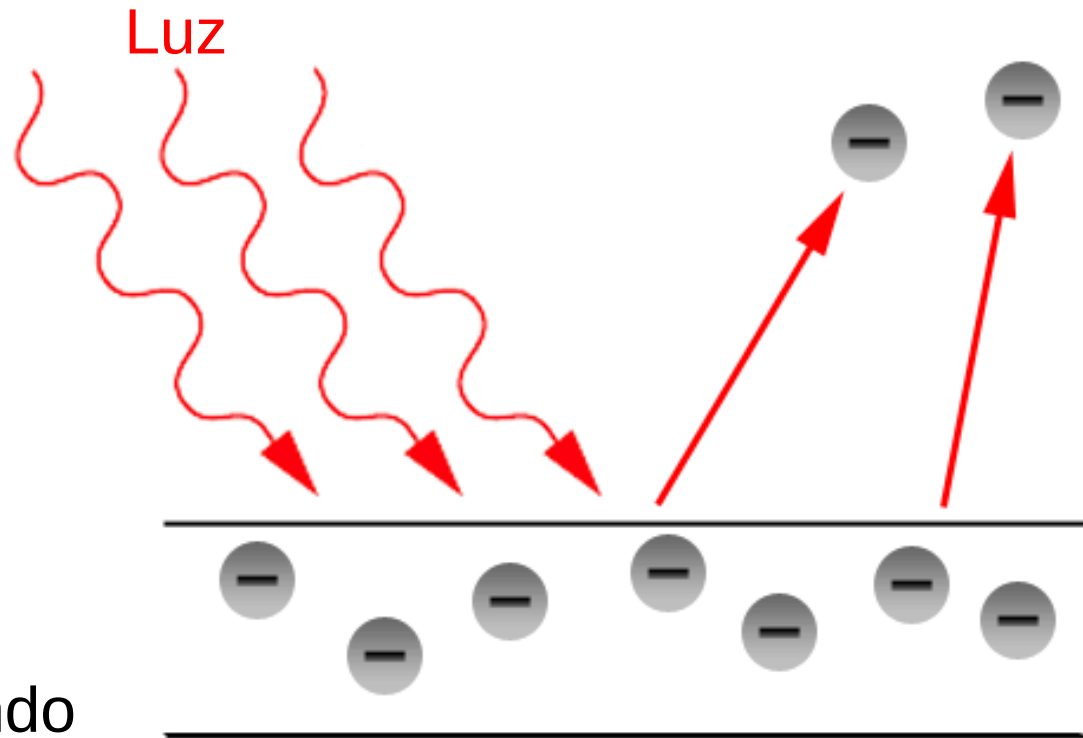


A luz é realmente uma onda?

O Efeito Fotoelétrico

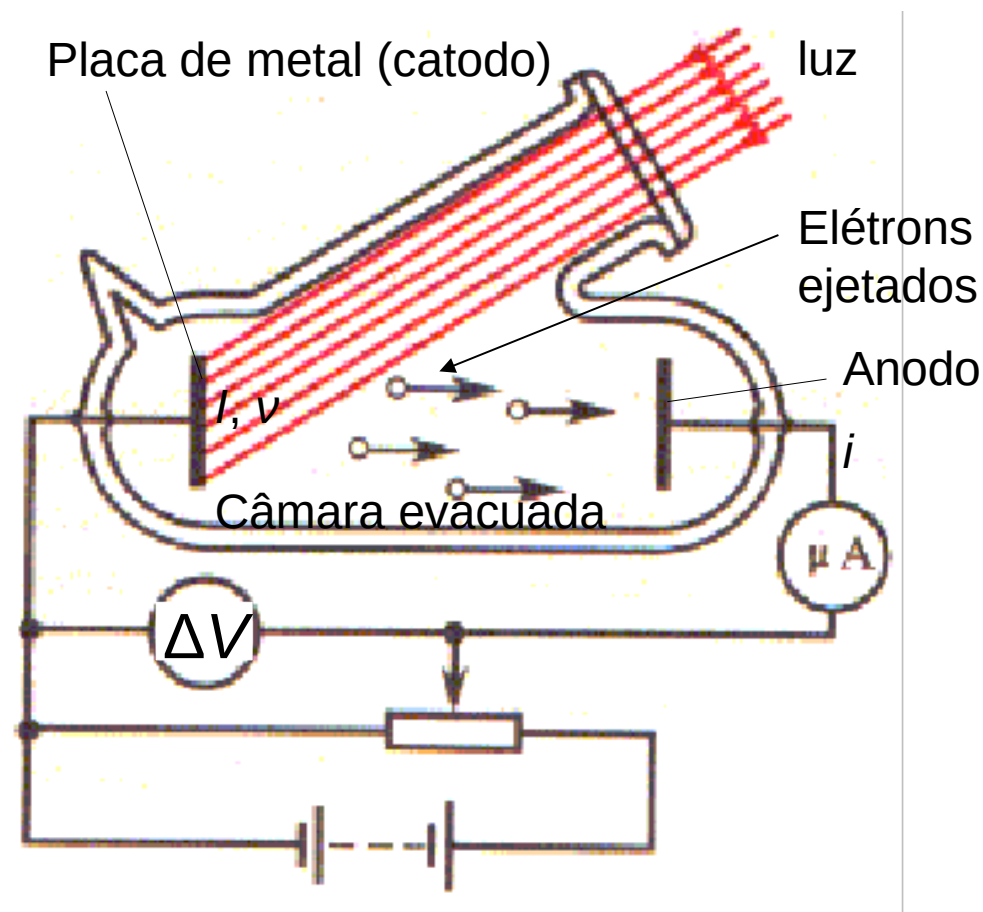
O **efeito fotoelétrico** é a **emissão** de **elétrons** por um **material**, geralmente metálico, quando exposto a uma **radiação eletromagnética** (como a luz) suficientemente **energética**, ou seja, de **frequência** suficientemente **alta**, o quanto é “suficiente” **depende** do **material**.

Ele pode ser observado quando a luz incide numa placa de metal, literalmente arrancando elétrons da placa!



O Efeito Fotoelétrico

O experimento de Hertz (1887)



1. **Luz** (frequência ν , intensidade I) **incide** numa placa de **metal**.

2. **Elétrons** são **ejetados** da placa.

3. Parte dos elétrons chega ao **anodo** e constitui a **corrente** i .

Quando ΔV **aumenta**, mais elétrons chegam ao anodo
 \Rightarrow **i aumenta**.

De baixo de um certo valor (negativo) de ΔV , o **potencial de corte** (ou de frenamento) V_0 , os elétrons não conseguem mais superar a barreira de potencial. Eles “recaem” no catodo

\Rightarrow **i é zero**.

O Efeito Fotoelétrico

O experimento de Hertz (1887)

O que Hertz esperava (usando a hipótese que luz é uma onda)

- A luz **esquenta** a placa com uma **taxa** que depende apenas da **intensidade** I (potência por unidade de área) da luz, e **não** da sua **frequência**.

=> **Após um tempo**, o metal alcança temperatura suficiente (ou seja, os elétrons ganham energia cinética suficiente) para expulsar os elétrons. **A corrente i deve começar a fluir**.

- Após mais um tempo alcança-se um equilíbrio: A energia cinética dos elétrons expulsos é igual à energia da luz incidente.

=> Como o **potencial de corte** é proporcional à energia cinética máxima dos elétrons: $e \cdot V_0 = (\frac{1}{2}m_e \cdot v^2)_{\max}$, ele deve **aumentar** quando a **intensidade** da luz incidente **aumenta**:

V_0 deve depender (apenas) de I

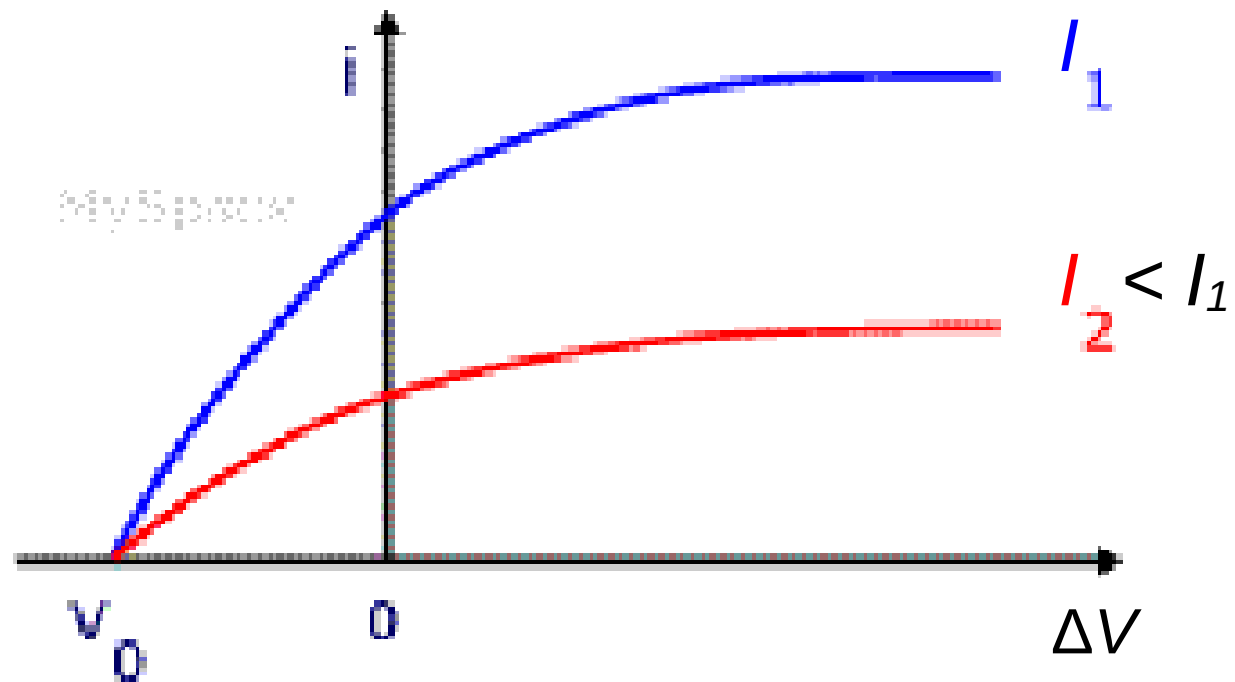
O Efeito Fotoelétrico

O experimento de Hertz (1887)

O que ele observou

- A **corrente i flui**, ou seja, elétrons são ejetados da placa, **instantaneamente** quando se liga a luz incidente.

- O **potencial de corte V_0** , e, então, a **energia cinética** máxima dos fotoelétrons, **não depende da intensidade da luz**, mas **sim**, da **frequência ν** (mas a corrente i depende, sim, da intensidade)



O Efeito Fotoelétrico

O experimento de Hertz (1887)

O que ele observou

- O **potencial de corte**, e, então, a energia cinética máxima dos fotoelétrons **aumenta com a frequência!**

Equação do efeito fotoelétrico:

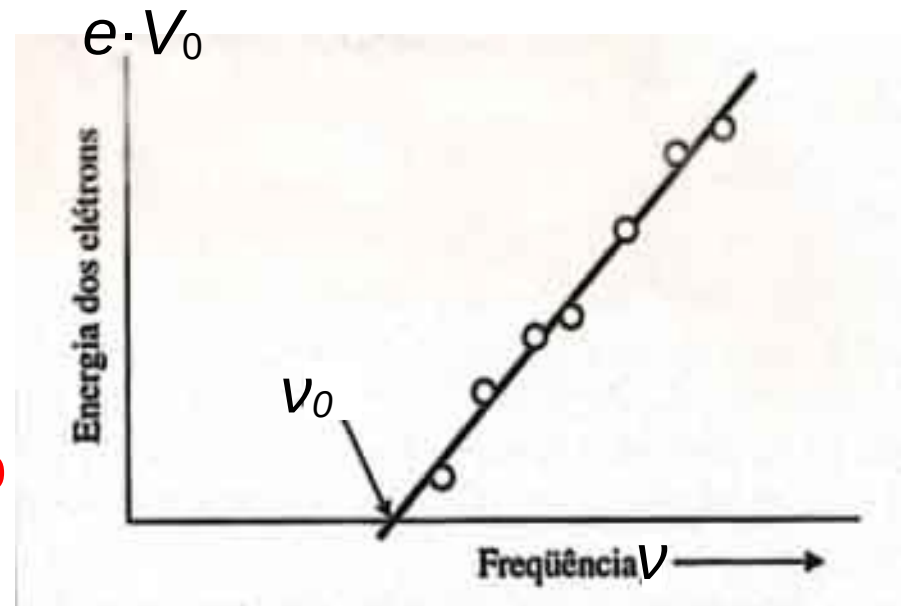
$$e \cdot V_0 = \left(\frac{1}{2}m_e \cdot v^2\right)_{\max} = h \cdot \nu - \phi$$

onde

h = constante de Planck

ϕ := **função de trabalho**, constante que é **característica do material**, corresponde à **energia de ionização**

Debaixo de uma certa **frequência de corte** $\nu_0 = \phi/h$, **não há ejeção de elétrons**.



O Efeito Fotoelétrico

O experimento de Hertz (1887)

Como explicar isto?

Einstein (1905):

- A luz consiste de “pacotes/partículas” de energia $E = h \cdot \nu$, os fótons.
=> Quantização da luz.
- A energia necessária para arrancar um elétron de um material corresponde à função de trabalho ϕ .
- Quando um fóton com energia suficiente para arrancar um elétron, $h \cdot \nu \geq \phi$, ou seja $\nu \geq \nu_0$, incide na placa, ele é absorvido, e a sua energia é usada para expulsar um elétron.
A energia cinética do elétron será $h \cdot \nu - \phi$.
- Se esta energia cinética é o suficiente para passar a barreira do potencial elétrico, $h \cdot \nu - \phi \geq e \cdot \Delta V$, os elétrons chegam no anodo, e corrente flui.

O Efeito Fotoelétrico

O experimento de Hertz (1887)

Como explicar isto?

=> A **energia cinética** dos **fotoelétrons**, e então o potencial de corte, depende apenas da **frequência** da **luz** incidente.

O número de elétrons emitidos, e então a corrente i , é proporcional ao número de fótons, ou seja à intensidade da luz incidente.

A hipótese dos fótons consegue explicar todas as observações do Hertz.

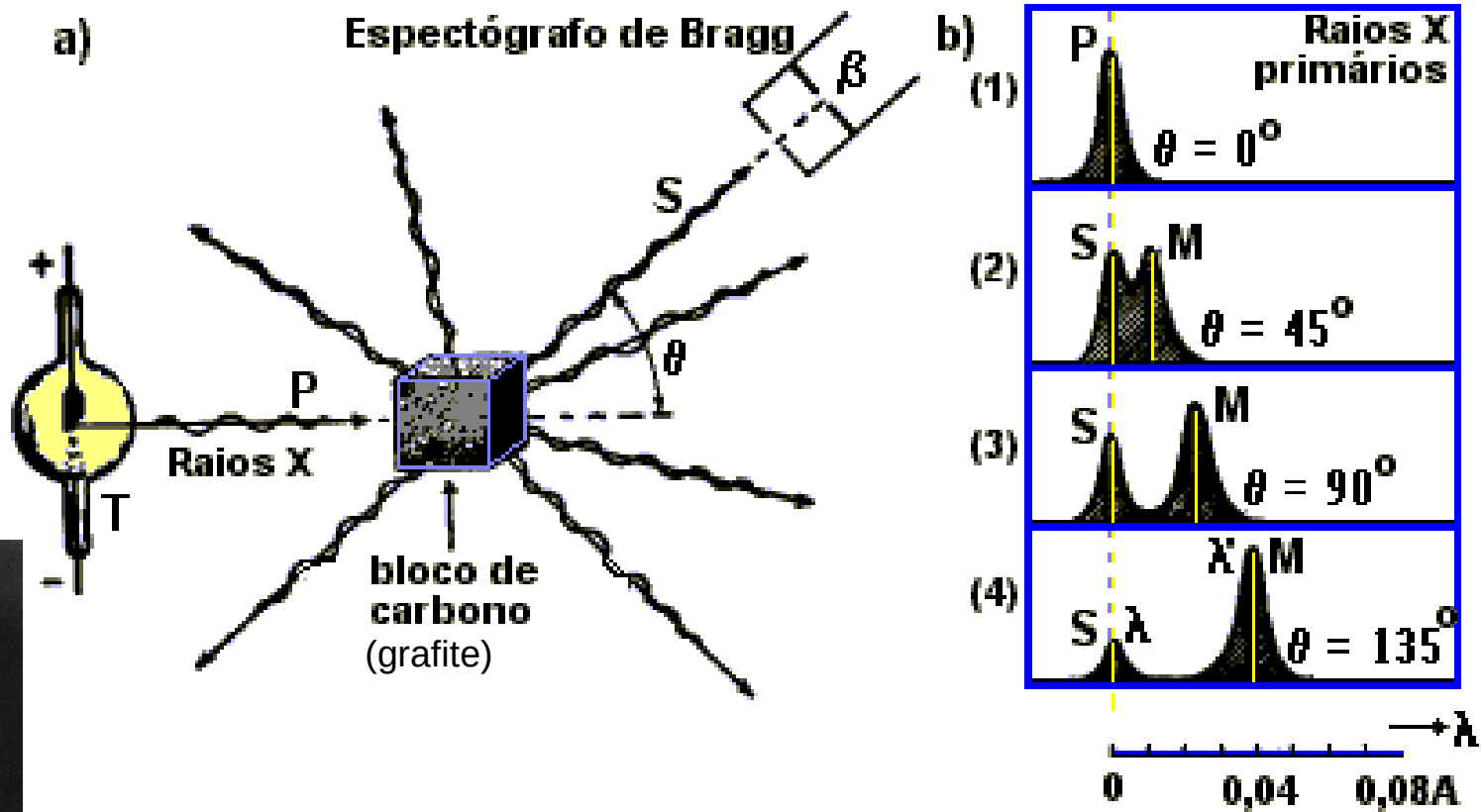
Obviamente, **a luz tem propriedades de partículas** também.



Einstein ganhou o prêmio Nobel de física para a explicação do efeito fotoelétrico.

O Efeito Compton

1923: Compton fez incidir um feixe de **raios X** num bloco de carbono e mediu o **ângulo de espalhamento** e o **comprimento de onda** da radiação espalhada pelo carbono.



Arthur Holly Compton (1892-1962)

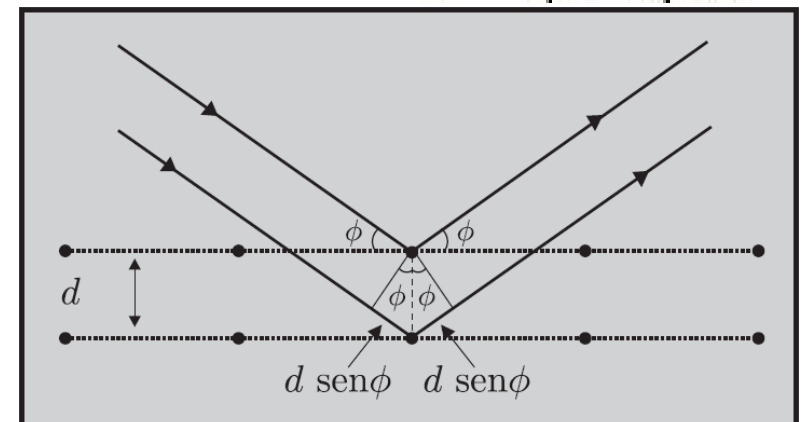
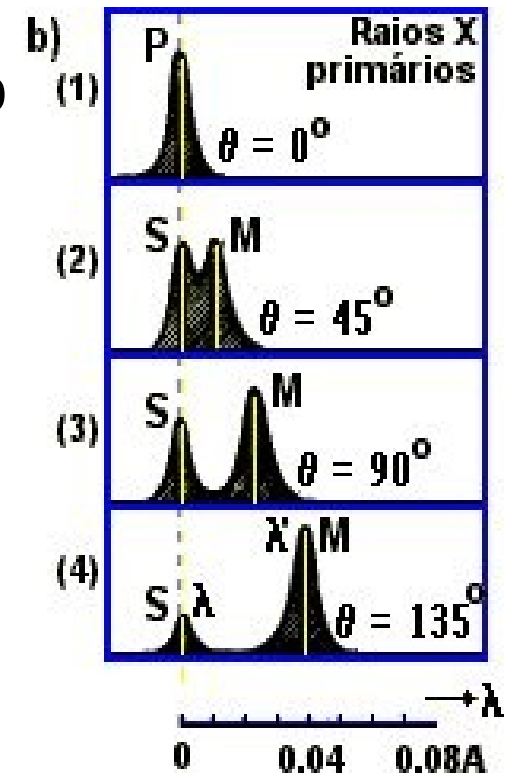
O Efeito Compton

1º resultado: **Parte** dos raios X passa pelo bloco de carbono **sem** ser **espalhado** (os raios X primários), o resto é espalhado apenas em **certas direções** (por certos ângulos).

=> **Difração**

Fenômeno esperado se raios X são **ondas**: É a **interferência** da radiação espalhada pelos átomos das diferentes **camadas** do **cristal**, ocorre quando o comprimento de onda da luz incidente é da mesma ordem de tamanho do alvo, neste caso da estrutura cristalina do carbono.

$$2d \sin \varphi = n\lambda$$

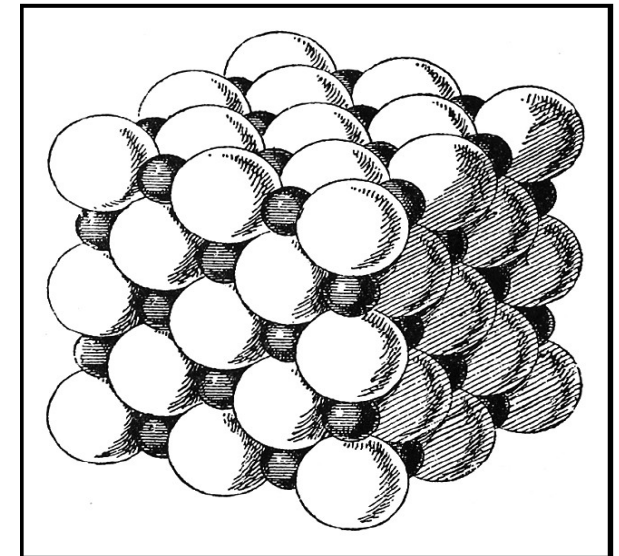
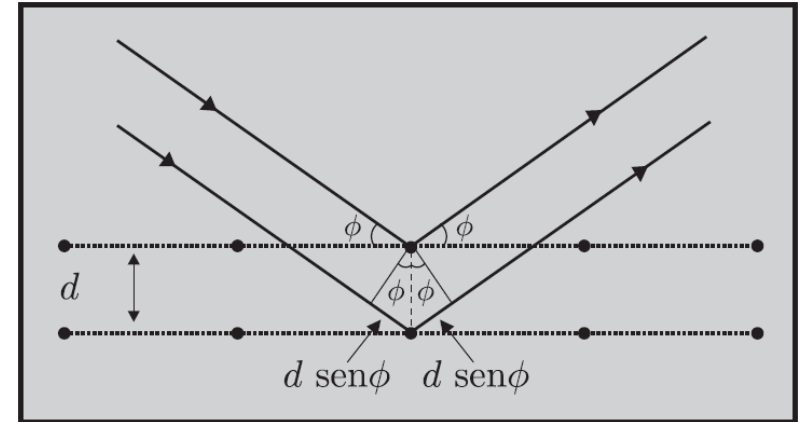


O Efeito Compton

Raios X: $\lambda \sim 10^{-9}$ cm, **estrutura cristalina** tem dimensões da ordem de 10^{-8} cm.

Pelo espectro de ângulos de espalhamento pode-se determinar a estrutura cristalina do carbono.

Tudo bem, **raios X** são **ondas**, como já sabíamos.



O Efeito Compton

Tudo bem?

Não tudo, ainda há um segundo resultado do experimento de Compton:

Os **comprimentos de onda** dos raios espalhados são **maiores**, resp. as **frequências/energias** são **menores**, do que aqueles do raio incidente (e dos raios X primários)!

Quanto maior o ângulo de espalhamento, tanto maior é o comprimento de onda, e tanto menor a frequência.

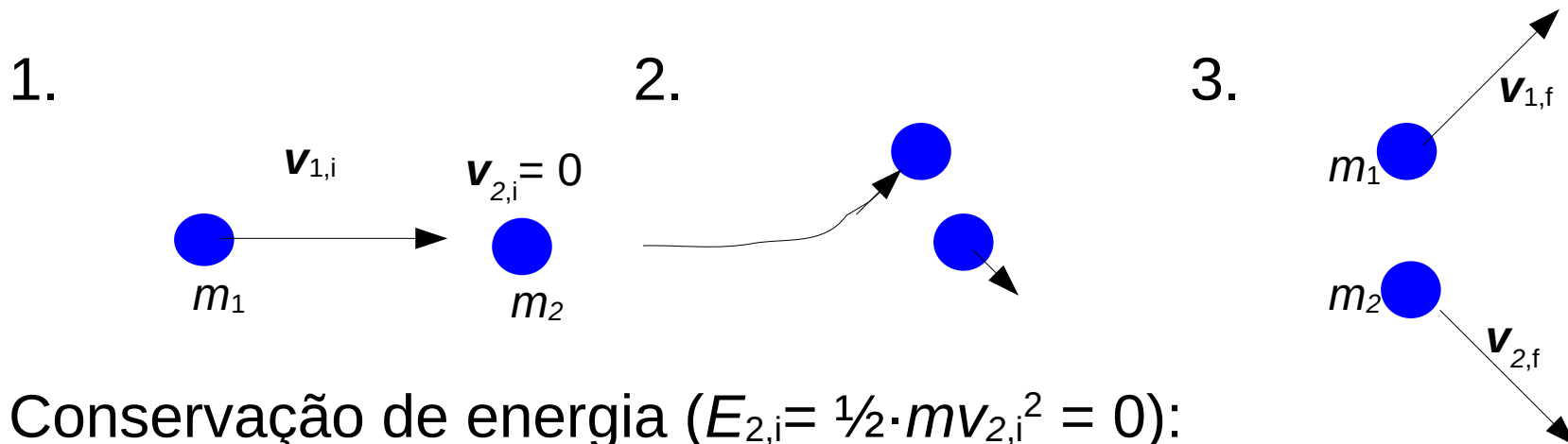
Isto **não** é esperado para **ondas** clássicas. Na teoria clássica, a onda incidente agita o material com a frequência ν , e a radiação emitida teria a mesma frequência.

Obviamente, a frequência (ou **energia**) dos raios X é **reduzida** quando eles são **espalhados**.

O Efeito Compton

Como explicar isto?

Poderia ser algo parecido como o espalhamento de duas partículas:



Conservação de energia ($E_{2,i} = \frac{1}{2} \cdot m v_{2,i}^2 = 0$):
 $E_{1,i} + 0 = E_{1,f} + E_{2,f} \Rightarrow E_{1,f} = E_{1,i} - E_{2,f} < E_{1,i}$

A partícula 1 perde energia cinética para a partícula 2 quando é espalhado per esta. A partícula 2 ganha energia $\Rightarrow v_{2,f} \neq 0$.

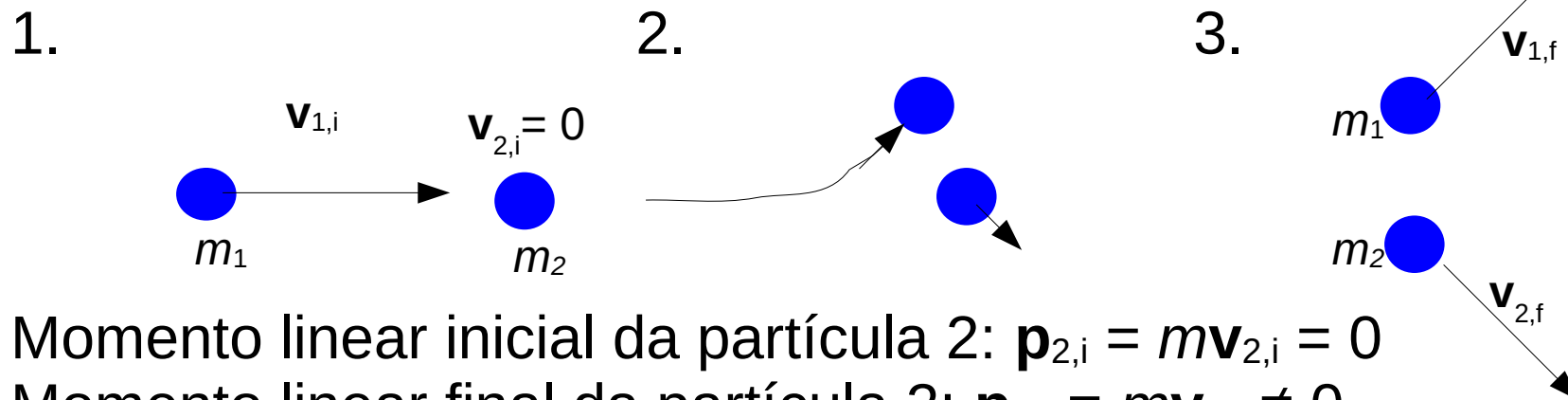
Análogo: No efeito Compton, **os raios X perdem energia** ($h \cdot \nu$) para os elétrons do material **quando são espalhados** por estes.

Isto só é possível, se **os raios X consistem de partículas**, ou **fótons**.

O Efeito Compton

Como explicar isto?

Mas no espalhamento de partículas também há **conservação de momento linear!**



Momento linear inicial da partícula 2: $\mathbf{p}_{2,i} = m\mathbf{v}_{2,i} = 0$

Momento linear final da partícula 2: $\mathbf{p}_{2,f} = m\mathbf{v}_{2,f} \neq 0$

O momento linear da partícula 2 muda (aumenta).

=> Momento linear é transferido entre as partículas.

Análogo: No efeito Compton, **momento linear** é **transferida** entre os fótons e os elétrons do material.

=> **Fótons têm momento linear** e podem trocá-lo com partículas ou outros fótons.

O Efeito Compton

Quanto é o momento linear de um fóton?

Teoria da relatividade: $\mathbf{p} = E/c = h \cdot \nu/c = h/\lambda$ na **direção** da **propagação** do fóton/da onda (Não esqueçam que o momento linear é um **vetor**).

No efeito Compton, o elétron atinge velocidades perto daquela da luz => temos que usar os termos relativísticos para o seu momento linear e a sua energia (sem dedução):

$\mathbf{p} = \gamma m_e \mathbf{v}$, $E_{\text{tot}} = \sqrt{(pc)^2 + (m_e c^2)^2}$, $E_{\text{cin}} = E_{\text{tot}} - m_e c^2$,
onde $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$, m_e = massa de elétron, $m_e c^2$ = energia de repouso

Para velocidades baixas, $v \ll c$, estas expressões se tornam as expressões newtonianas, $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, $E_{\text{cin}} = \frac{1}{2}mv^2$;

Para partículas com massa zero, como o fóton, obtém-se $p = E/c$.

O Efeito Compton

Usando estes termos para os **momentos lineares** e **energias** iniciais e finais do **fóton** e do **elétron**, e aplicando as **leis de conservação**:

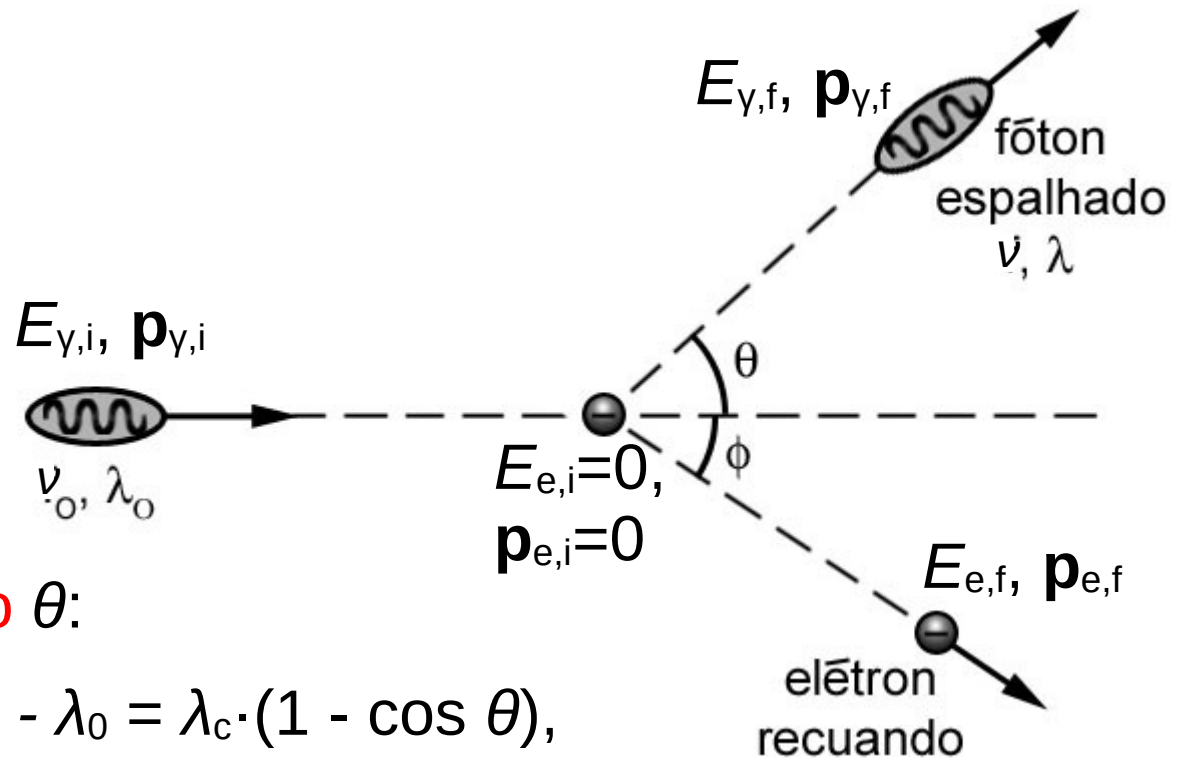
$$E_{\gamma,i} + E_{e,i} = E_{\gamma,f} + E_{e,f}$$

$$\mathbf{p}_{\gamma,i} + \mathbf{p}_{e,i} = \mathbf{p}_{\gamma,f} + \mathbf{p}_{e,f}$$

pode se calcular a **variação** do **comprimento de onda** do **fóton** em função do **ângulo de espalhamento** θ :

Equação de Compton: $\lambda - \lambda_0 = \lambda_c \cdot (1 - \cos \theta)$,
onde $\lambda_c = h/(m_e c)$ **comprimento de onda Compton** do elétron

o que bate com as medidas de Compton.



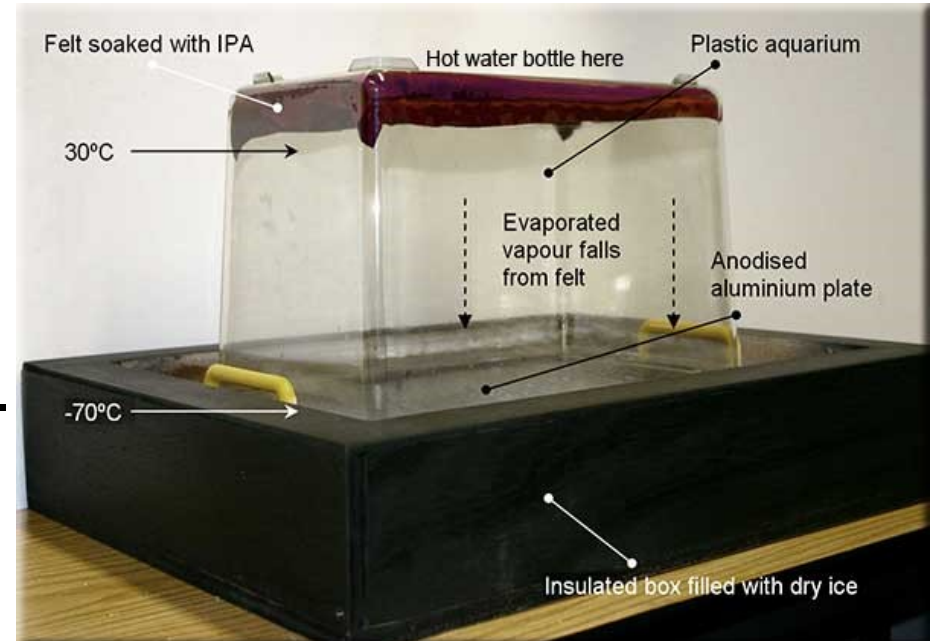
O Efeito Compton

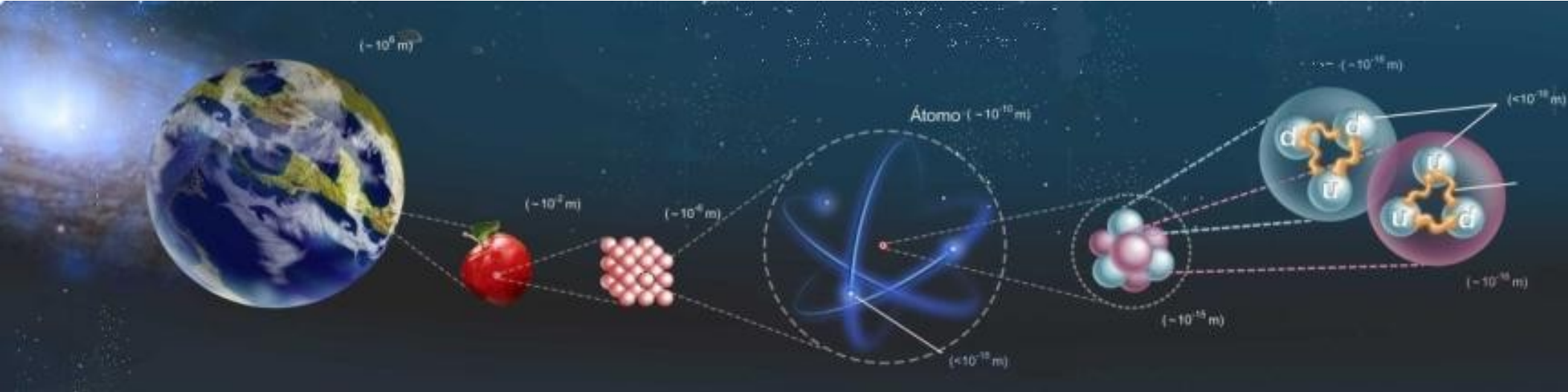
E os elétrons espalhados?

Com uma câmara de nuvens Wilson conseguiu **verificar** o **espalhamento** do **elétron**, de acordo com o **efeito Compton**.

Essa explicação só faz **sentido** se considerarmos a **onda eletromagnética** como sendo uma **partícula (fóton)** com **energia cinética** ($h \cdot \nu$) e **momento linear** ($E/c = h \cdot \nu/c = h/\lambda$).

Comprovação independente do **postulado** de **Einstein**.





Universidade Federal do ABC

Estrutura da Matéria

FIM pra hoje

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Estrutura.html>