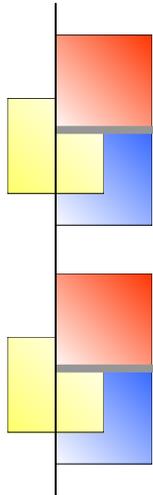




**INSTITUTO DE FÍSICA**  
Universidade Federal Fluminense

## **Física IV**



**Cap 38 - O fim da física clássica (aula 7)**

**Prof. Carlos Eduardo (Cadu)**

Niterói, Maio/2016

## **Objetivos:**

- Entender como ocorreu a descoberta das propriedades atômicas da matéria.
- Entender como nasceu a Física Quântica.

## O Fim da Física Clássica

Por volta de 1900 a Física Clássica – Física Newtoniana e Eletromagnetismo de Maxwell – não funcionava para explicar muitos dos resultados obtidos através do estudo da matéria...

A Física Clássica era um tremendo fracasso quando aplicada aos sistemas atômicos.



No fim do séc. XIX os cientistas questionavam basicamente três assuntos:

- Matéria – (Evidências apontadas com a Termodinâmica)
- Eletricidade – (Eletrólise: a água não é mais substância elementar)
- Luz (Experimento da Fenda Dupla de Thomas Young)

# O que têm em comum?

- propriedades de materiais
- ímãs permanentes
- estrelas
- átomos estáveis
- espectros discretos de substâncias puras
- espectros contínuos de objetos macroscópicos

**R: Todos esses fenômenos**

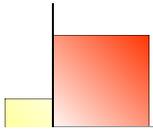
- A) Podem ser explicados pelo eletromagnetismo do século XIX**
- B) Podem ser explicados pela termodinâmica do século XIX**
- C) Podem ser explicados combinando as teorias físicas do século XIX**
- D) Não podem ser explicados pelas teorias físicas do século XIX**

# Qual o tamanho dos átomos?

"Estando (...) em Clapham, onde há, no parque, um lago, o qual observei um dia estar agitado pelo vento, eu tomei um frasco de óleo, e deixei cair um pouco na água. Eu o vi se espalhar com surpreendente velocidade sobre a superfície (...). E lá o óleo, embora não somasse mais que uma colher de chá, produziu uma instantânea calma, sobre um espaço de diversos metros quadrados, a qual se espalhou de maneira admirável, (...) fazendo todo aquele quarto do lago, talvez meio acre [2000m<sup>2</sup>], ficar liso como um espelho."

**Benjamin Franklin, cerca de 1765**





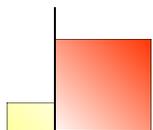
# Qual o tamanho dos átomos?

"Estando (...) em Clapham, onde há, no parque, um lago, o qual observei um dia estar agitado pelo vento, eu tomei um frasco de óleo, e deixei cair um pouco na água. Eu o vi se espalhar com surpreendente velocidade sobre a superfície (...). E lá o óleo, embora não somasse mais que uma colher de chá, produziu uma instantânea calma, sobre um espaço de diversos metros quadrados, a qual se espalhou de maneira admirável, (...) fazendo todo aquele quarto do lago, talvez meio acre [2000m<sup>2</sup>], ficar liso como um espelho."

**Benjamin Franklin, cerca de 1765**

**Considerando o volume de uma colher de chá, estime a espessura aproximada do filme de óleo observado por Franklin**

- A)  $10^{-3}\text{m}$     B)  $10^{-6}\text{m}$     C)  $10^{-9}\text{m}$     D)  $10^{-12}\text{m}$**



# Qual o tamanho dos átomos?

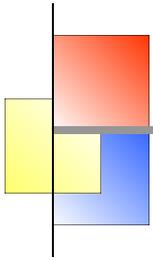
"Estando (...) em Clapham, onde há, no parque, um lago, o qual observei um dia estar agitado pelo vento, eu tomei um frasco de óleo, e deixei cair um pouco na água. Eu o vi se espalhar com surpreendente velocidade sobre a superfície (...). E lá o óleo, embora não somasse mais que uma colher de chá, produziu uma instantânea calma, sobre um espaço de diversos metros quadrados, a qual se espalhou de maneira admirável, (...) fazendo todo aquele quarto do lago, talvez meio acre [2000m<sup>2</sup>], ficar liso como um espelho."

**Benjamin Franklin, cerca de 1765**

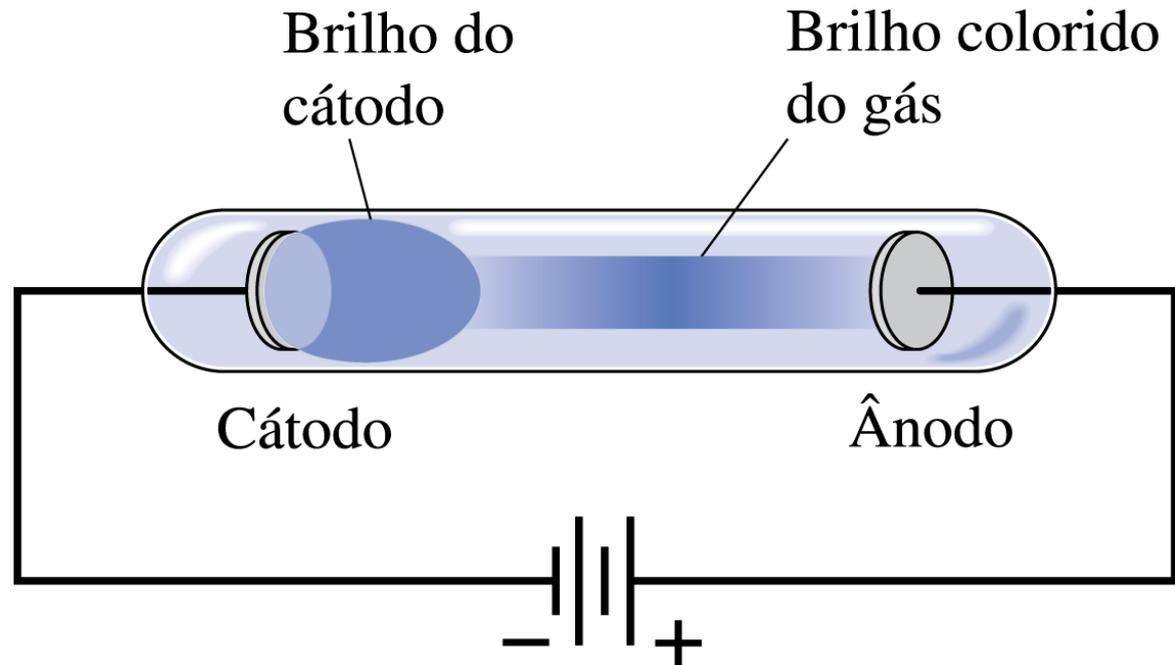
**Considerando o volume de uma colher de chá, estime a espessura aproximada do filme de óleo observado por Franklin**

- A)  $10^{-3}\text{m}$     B)  $10^{-6}\text{m}$     C)  $10^{-9}\text{m}$     D)  $10^{-12}\text{m}$**

# Tecnologia fundamental

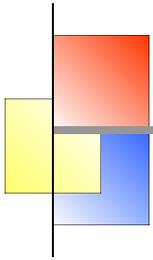


## Tubo de descarga em gás de Michael Faraday.

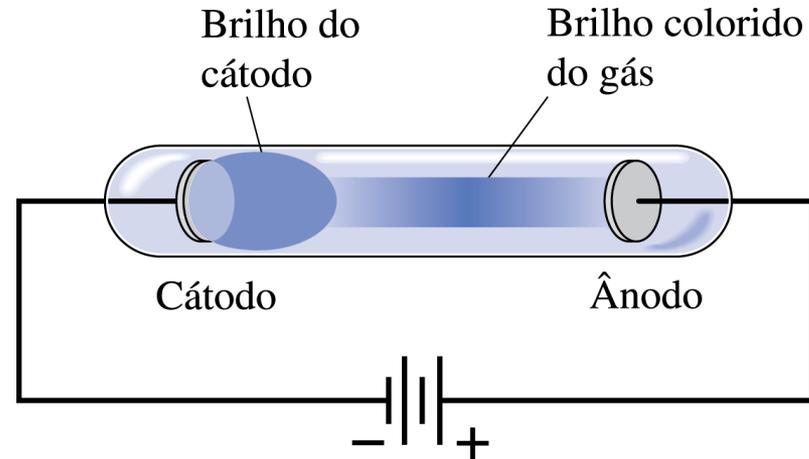


No experimento de Faraday o gás era ar (basicamente  $N_2$ ) – roxo.

# Tecnologia fundamental



## Tubo de descarga em gás de Michael Faraday.



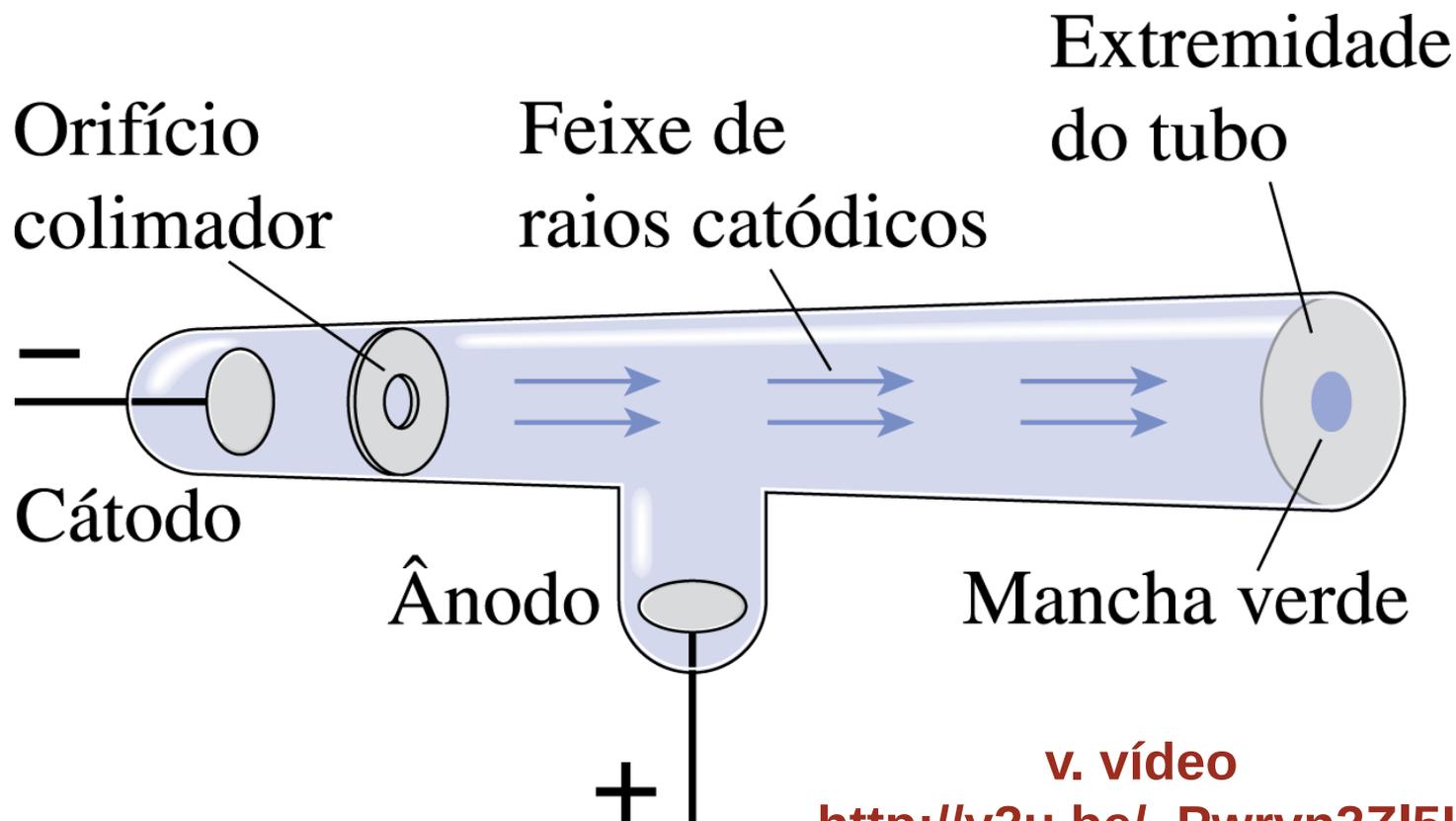
### Conclusões de Faraday:

- 1) A corrente flui através do gás a baixa pressão.
- 2) A cor da luz emitida pela descarga depende do gás.
- 3) Independente do tipo de gás, existe um brilho constante em torno do cátodo)

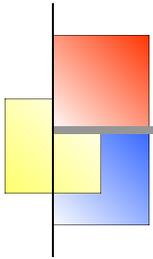
# Tubos de Crookes

**William Crookes, cientista inglês.**

Na década de 1870 desenvolveu um conjunto aperfeiçoado de tubos de vidro para estudos minuciosos dos raios catódicos.



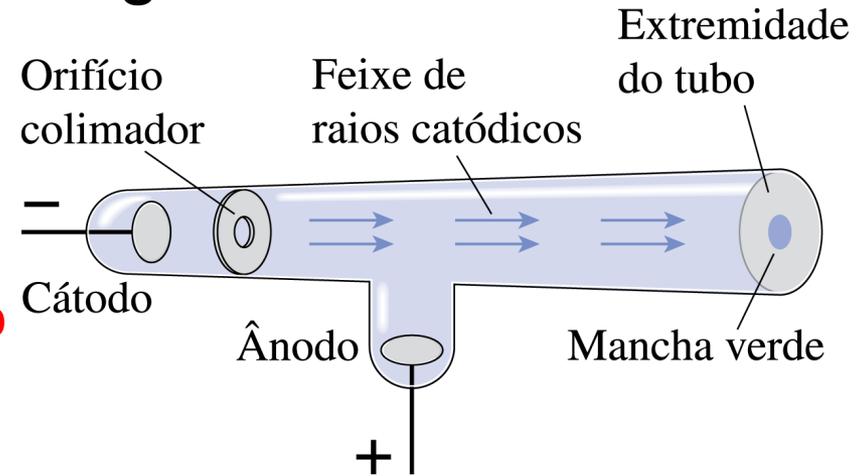
# Tubos de Crookes



**William Crookes, cientista inglês.**

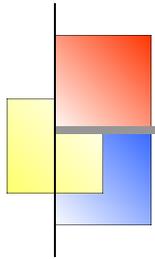
Algumas conclusões de Crookes:

- 1) Existe uma corrente elétrica no tubo.
- 2) Os raios são desviados por um campo magnético.
- 3) Os raios catódicos independem do metal do qual é feito o cátodo.
- 4) Os raios podem exercer forças sobre objetos e transferir energia.



**P: qual dessas observações é inconsistente com a hipótese dos 'raios' serem uma forma de radiação eletromagnética?**

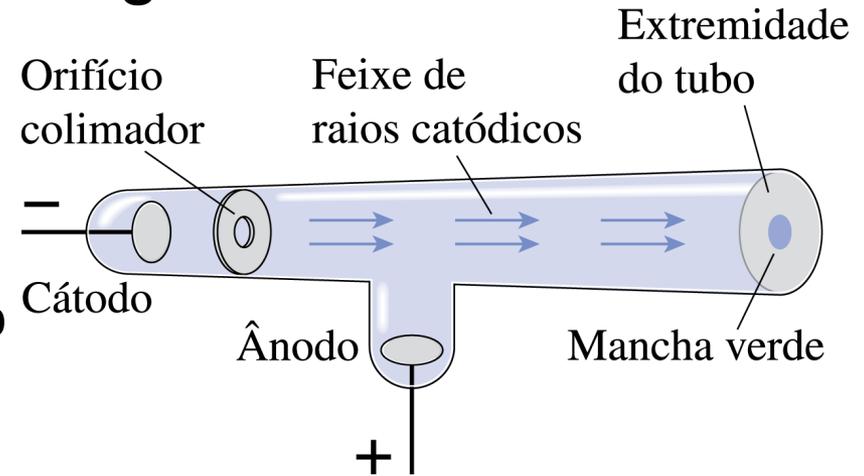
# Tubos de Crookes



**William Crookes, cientista inglês.**

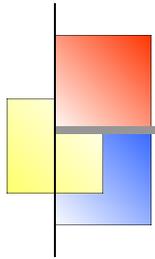
**Algumas conclusões de Crookes:**

- 1) Existe uma corrente elétrica no tubo.**
- 2) Os raios são desviados por um campo magnético.**
- 3) Os raios catódicos independem do metal do qual é feito o cátodo.**
- 4) Os raios podem exercer forças sobre objetos e transferir energia.**



**P: qual dessas observações é inconsistente com a hipótese dos 'raios' serem uma forma de radiação eletromagnética?**

# Tubos de Crookes



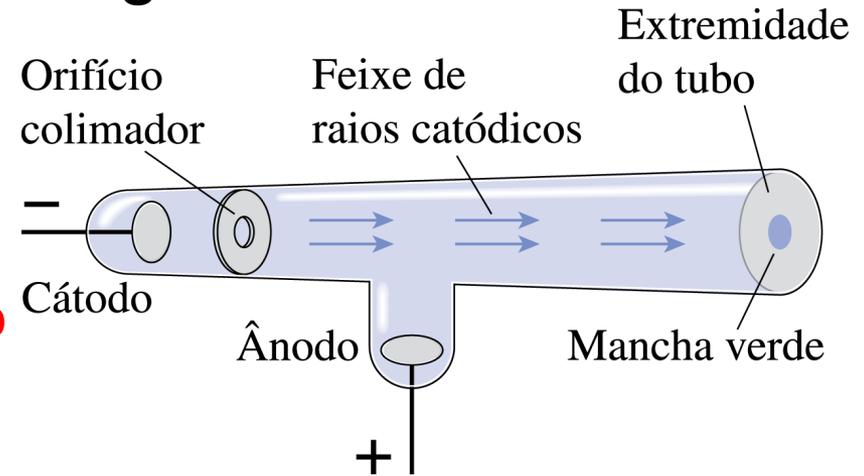
**William Crookes, cientista inglês.**

Algumas conclusões de Crookes:

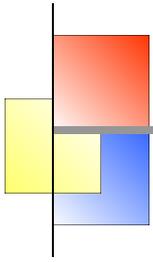
- 1) Existe uma corrente elétrica no tubo.
- 2) Os raios são desviados por um campo magnético.
- 3) Os raios catódicos independem do metal do qual é feito o cátodo.
- 4) Os raios podem exercer forças sobre objetos e transferir energia.

Hipótese de Crookes: corrente seria formada por moléculas do gás que colidiram com o cátodo, adquiriram (de algum modo) carga negativa e então foram repelidas em alta velocidade pelo cátodo.

Ideia imediatamente atacada – o raio percorria 90 cm no tubo, mas uma molécula só poderia percorrer 6 mm em média antes de colidir com outra.

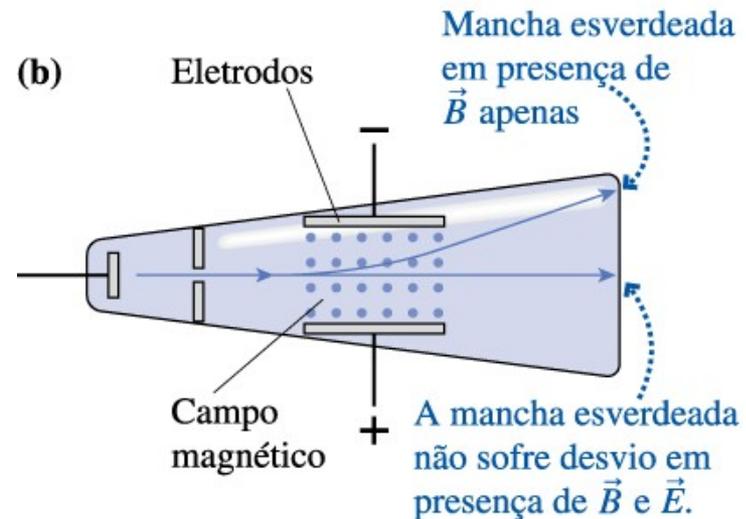
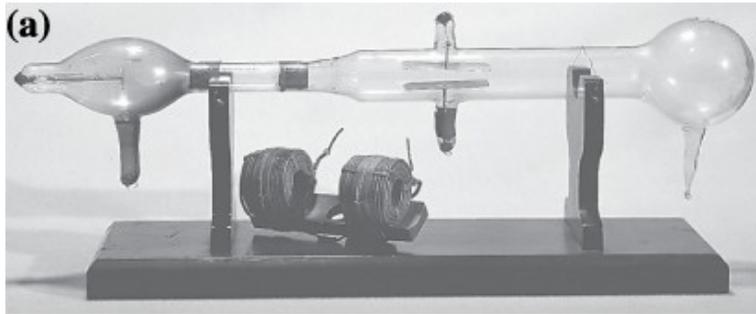


# A descoberta do elétron (1897)



**J. J. Thomson – físico inglês**

Experimento (1895) submetendo raios catódicos a campos E e B cruzados,  
Obs: recipiente em vácuo!



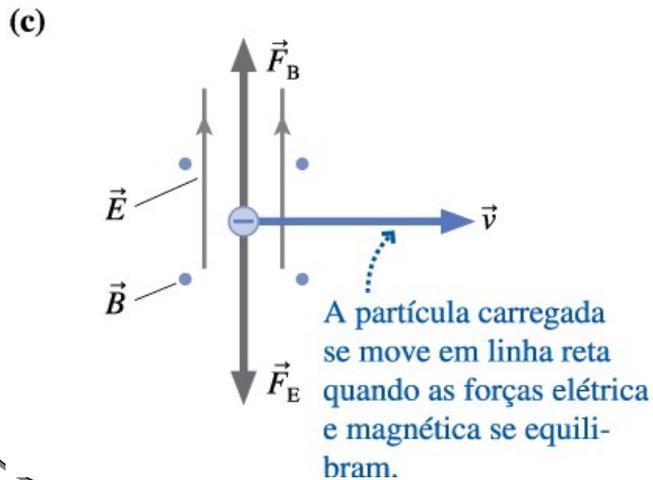
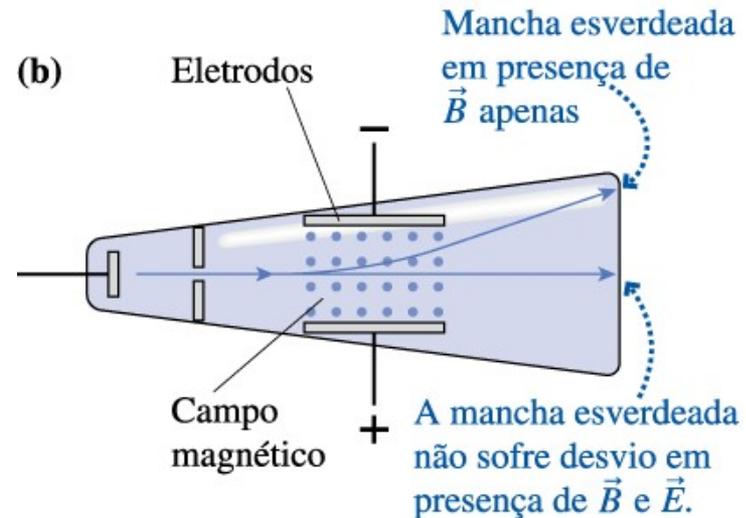
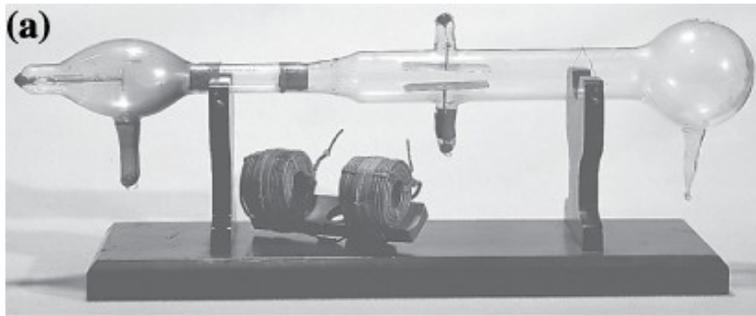
Ligando apenas o campo B: trajetória circular de raio R satisfazendo

$$qvB = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow \frac{q}{m} = \frac{v}{BR}$$

# A descoberta do elétron (1897)

J. J. Thomson – físico inglês

Experimento (1895) submetendo raios catódicos a campos E e B cruzados:



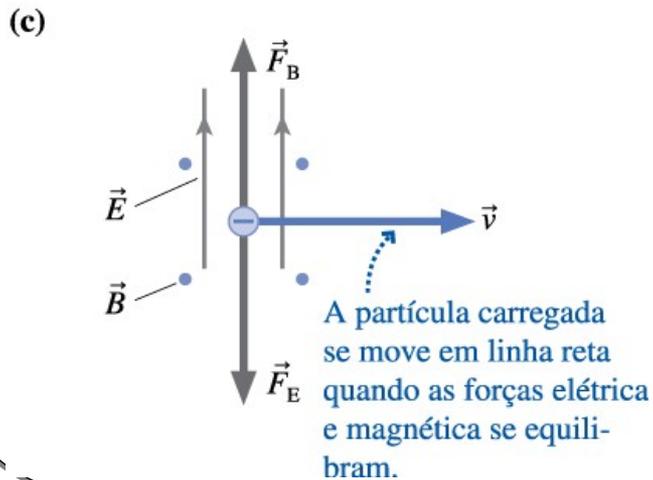
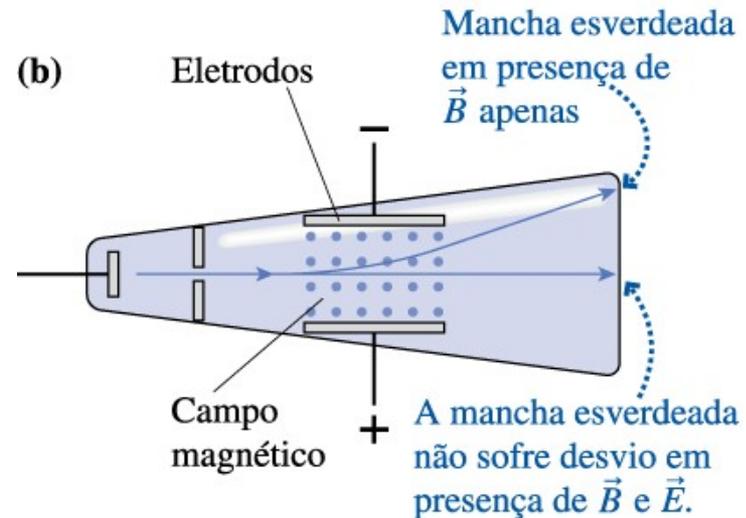
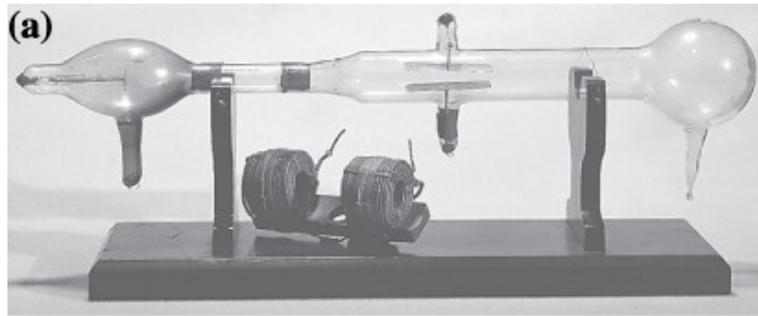
O valor de  $v$  pode ser obtido aplicando ainda uma força eletrostática calibrada para cancelar a força magnética:

$$qvB = qE \Rightarrow v = \frac{E}{B}$$

# A descoberta do elétron (1897)

J. J. Thomson – físico inglês

Experimento (1895) submetendo raios catódicos a campos E e B cruzados:

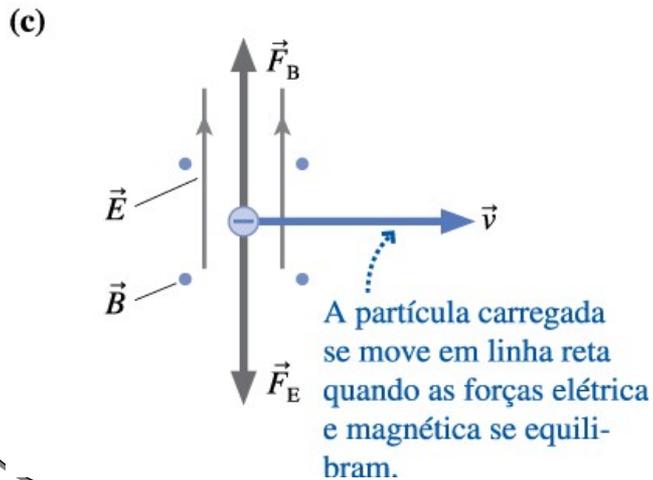
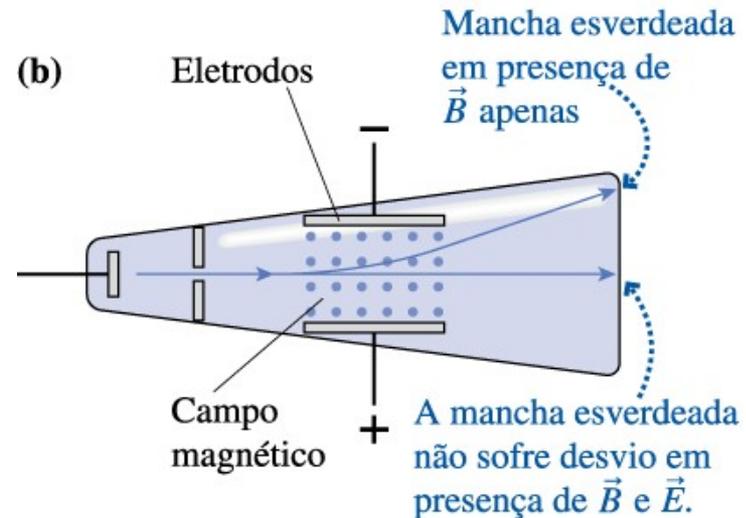
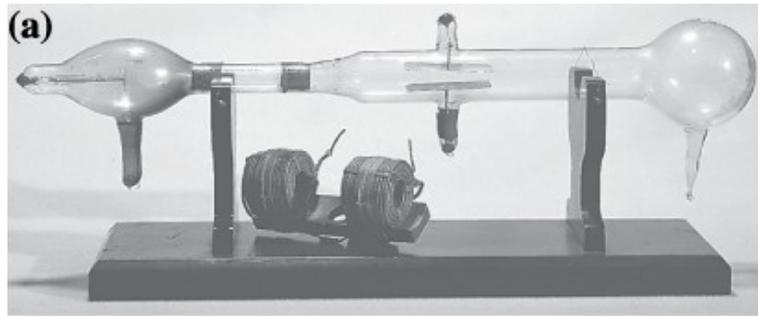


Thomson obteve assim a razão  $q/m$  (carga/massa) dos constituintes dos 'raios'. O valor obtido ( $q/m \sim 10^{11} \text{ C/Kg}$ ) era mais de 1000 vezes maior que o  $q/m$  do Hidrogênio!

# A descoberta do elétron (1897)

J. J. Thomson – físico inglês

Experimento (1895) submetendo raios catódicos a campos E e B cruzados:

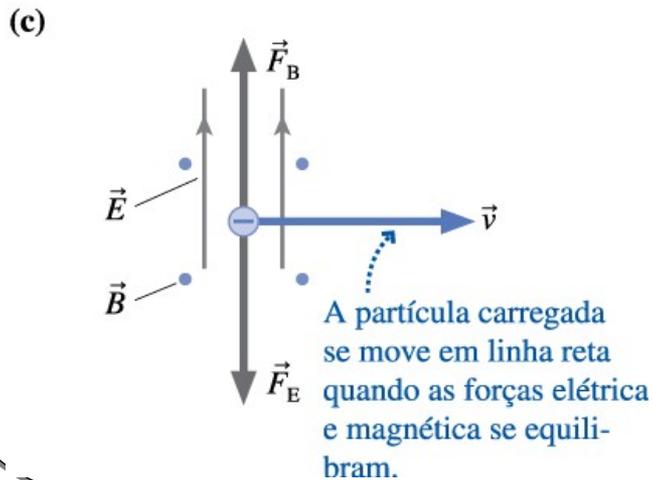
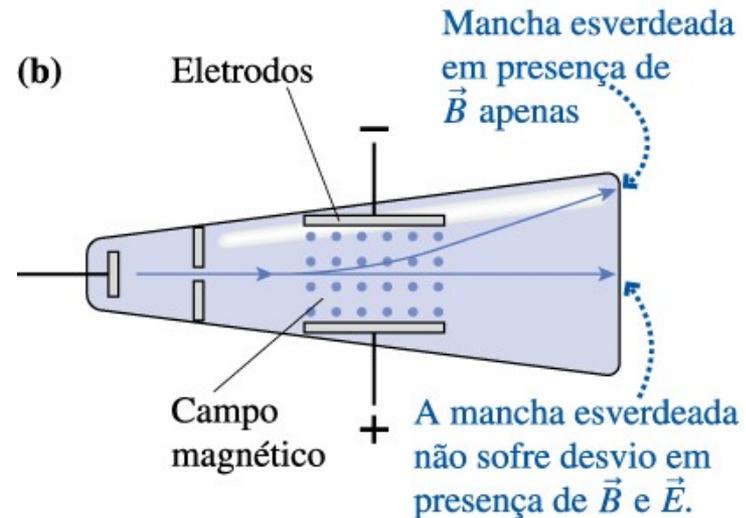
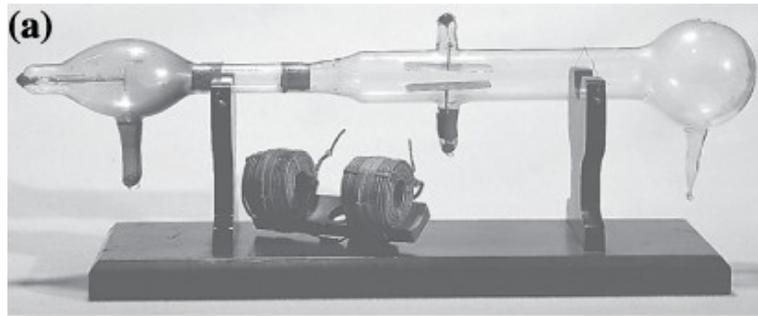


Thomson obteve assim a razão  $q/m$  (carga/massa) dos constituintes dos 'raios'. O valor obtido ( $q/m \sim 10^{11}$  C/Kg) era **mais de 1000 vezes maior que o  $q/m$  do Hidrogênio!**

# A descoberta do elétron (1897)

J. J. Thomson – físico inglês

Experimento (1895) submetendo raios catódicos a campos E e B cruzados:



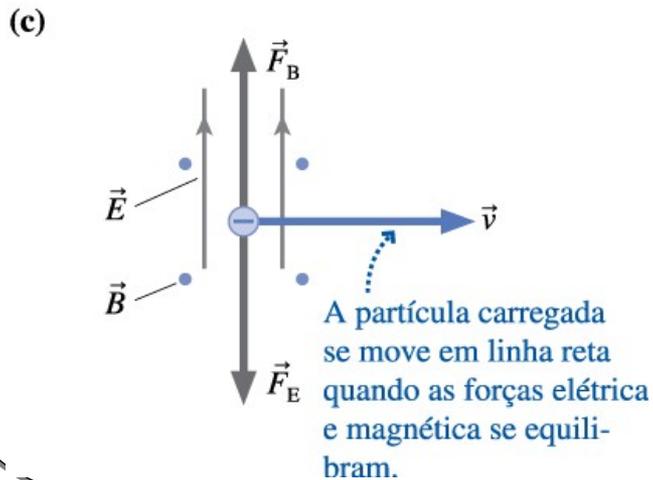
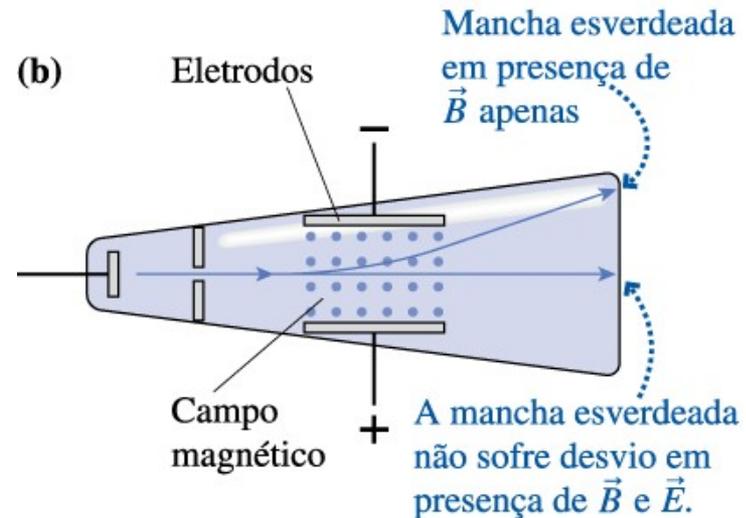
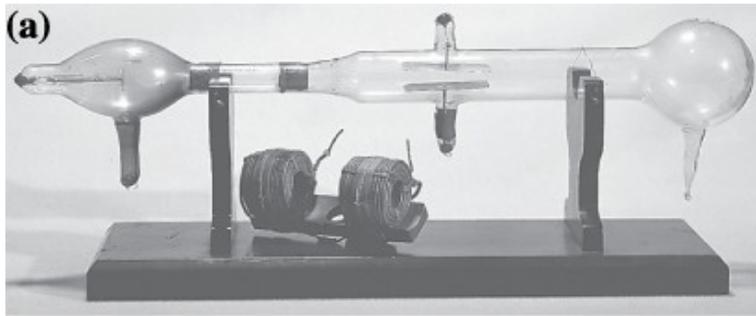
Conclusão (1897): raios catódicos são partículas negativas e com massa inferior à dos átomos – **SE TRATA DE UMA PARTÍCULA SUBATÔMICA, UM DOS CONSTITUINTES DO ÁTOMO.**

Prêmio Nobel de 1906

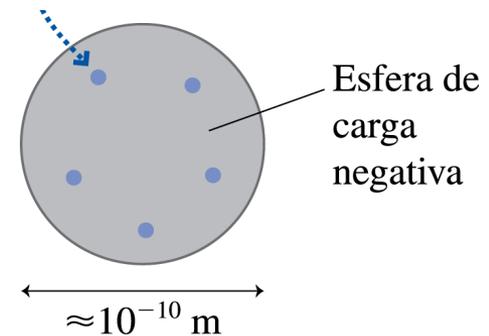
# A descoberta do elétron (1897)

J. J. Thomson – físico inglês

Experimento (1895) submetendo raios catódicos a campos E e B cruzados:



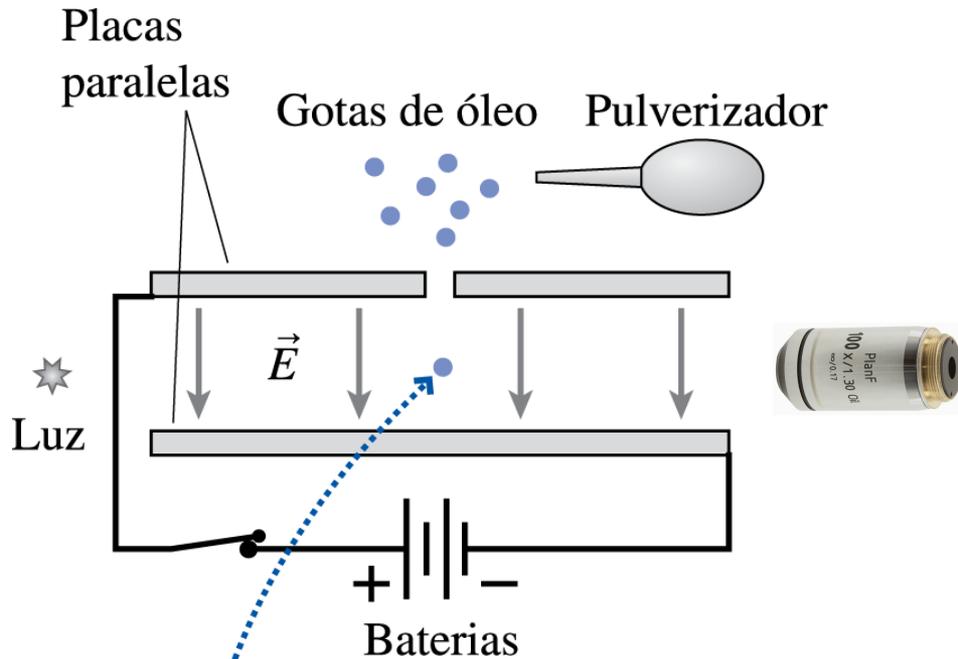
**Modelo atômico de Thomson**



# Experimento de Millikan (1906)

Robert Millikan, cientista Norte-Americano

Experimento da gota de óleo – conseguiu determinar a carga do elétron



A força elétrica orientada para cima sobre uma gota carregada negativamente equilibra a força gravitacional orientada para baixo.

$$q_{gota} = \frac{m_{gota}g}{E}$$

valores obtidos para  $q_{gota}$ :  
sempre múltiplos inteiros da  
*carga fundamental*

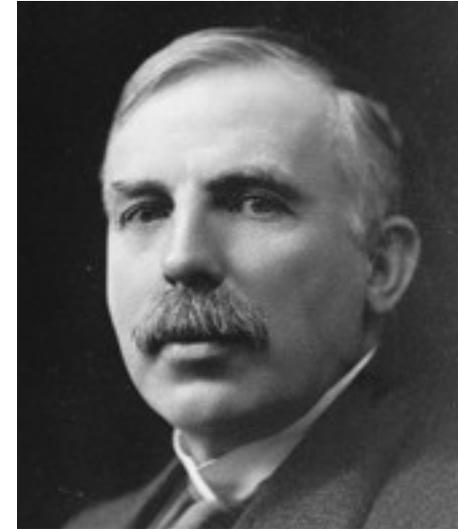
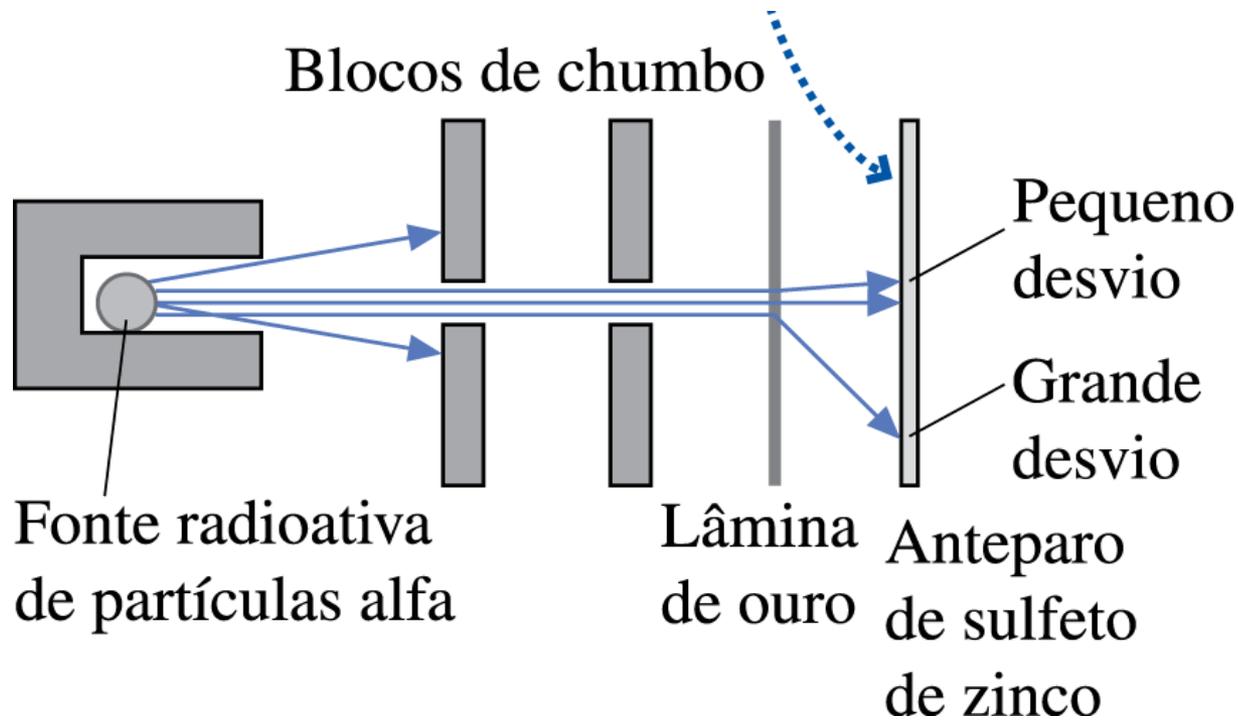
$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

como já se conhecia  $q/m$ , foi possível então determinar a *massa do elétron*

$$m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ Kg}$$

# Experimento de Rutherford (1909)

Aluno de Thomson – Ernest Rutherford (neozelandês)



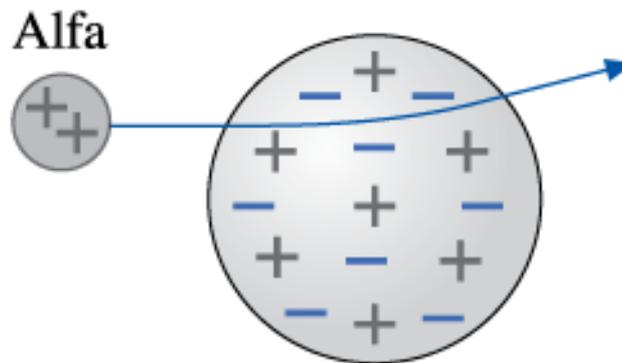
v. vídeo

<http://y2u.be/XBqHkraf8iE>

# Experimento de Rutherford (1909)

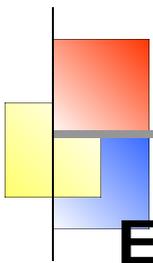
Aluno de Thomson – Ernest Rutherford (neozelandês)

Se o átomo fosse como Thomson havia sugerido, JAMAIS uma partícula alfa seria retroespalhada.



A partícula alfa é minimamente desviada por um átomo de Thomson, pois as forças das cargas positivas e negativas espalhadas praticamente se cancelam.

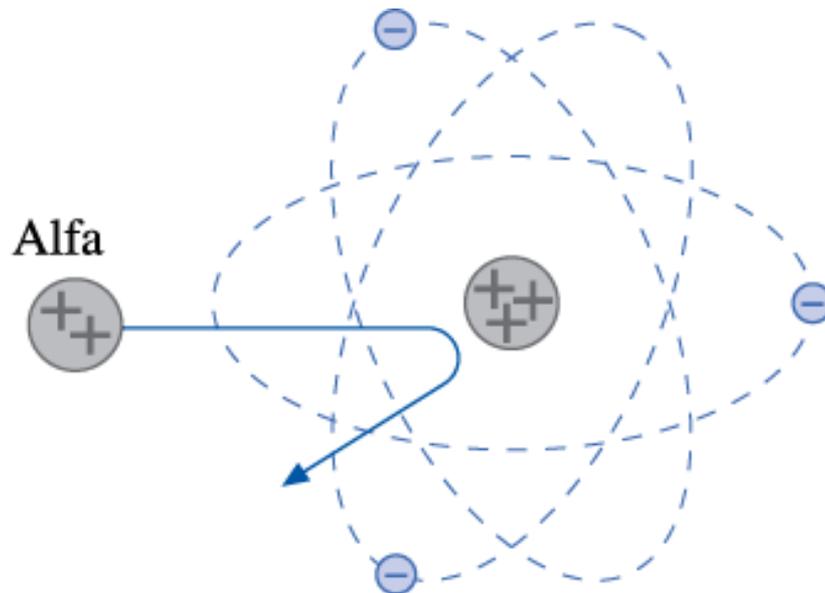
# Experimento de Rutherford (1909)



**Este foi o modelo atômico proposto por Rutherford.**

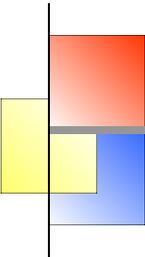
Algumas partículas eram desviadas em altos ângulos e algumas eram retroespalhadas.

(b)



Observem que a maior parte do átomo é espaço vazio.

Se o átomo contivesse um núcleo positivo e de grande massa específica, algumas partículas alfa chegariam muito perto do núcleo e sofreriam, assim, uma força repulsiva muito intensa.

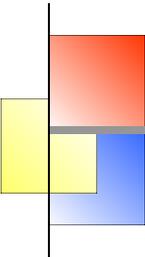


# Experimento de Rutherford (1909)

---

**Por que o modelo de Rutherford para os átomos não pode ser verdadeiro?**

- A) Pois é impossível haver tanto espaço vazio na matéria
- B) Pois os elétrons teriam de perder energia ao orbitar os núcleos, eventualmente caindo nele
- C) Pois os núcleos teriam de se autodestruir por repulsão Coulombiana
- D) Pois os elétrons se ejetariam espontaneamente devido à sua repulsão mútua

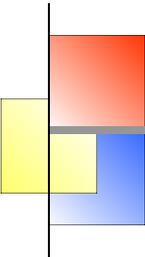


# Experimento de Rutherford (1909)

---

**Por que o modelo de Rutherford para os átomos não pode ser verdadeiro?**

- A) Pois é impossível haver tanto espaço vazio na matéria
- B) Pois os elétrons teriam de perder energia ao orbitar os núcleos, eventualmente caindo nele
- C) Pois os núcleos teriam de se autodestruir por repulsão Coulombiana (precisa da existência de alguma força de coesão no interior do núcleo)
- D) Pois os elétrons se ejetariam espontaneamente devido à sua repulsão mútua



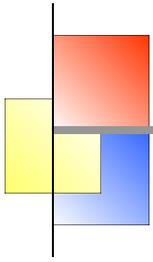
# Experimento de Rutherford (1909)

---

**Por que o modelo de Rutherford para os átomos não pode ser verdadeiro?**

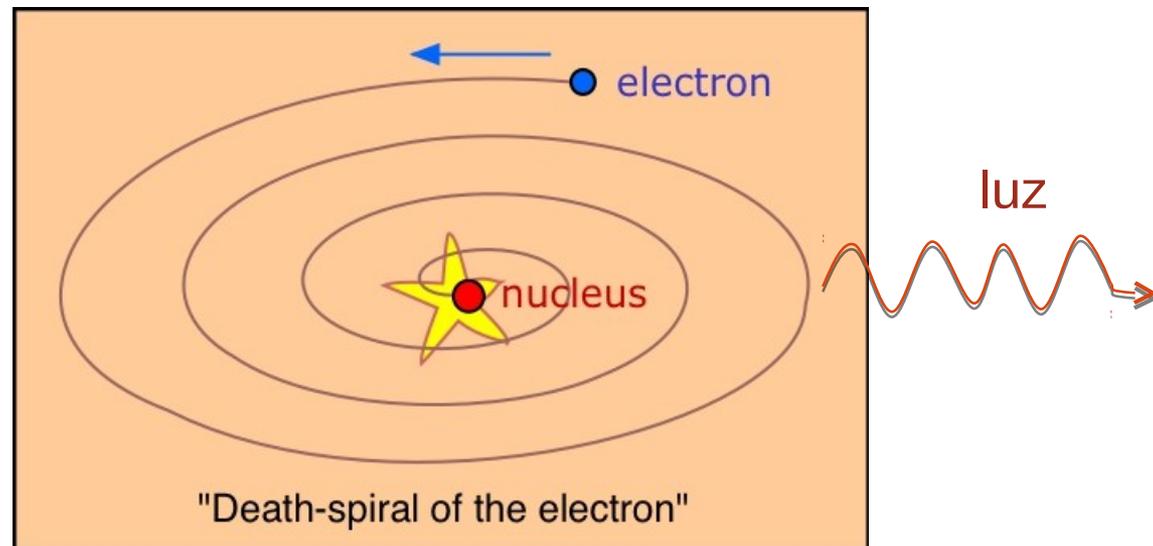
- A) Pois é impossível haver tanto espaço vazio na matéria
- B) Pois os elétrons teriam de perder energia ao orbitar os núcleos, eventualmente caindo nele**
- C) Pois os núcleos teriam de se autodestruir por repulsão Coulombiana (precisa da existência de alguma força de coesão no interior do núcleo)
- D) Pois os elétrons se ejetariam espontaneamente devido à sua repulsão mútua

# Experimento de Rutherford (1909)

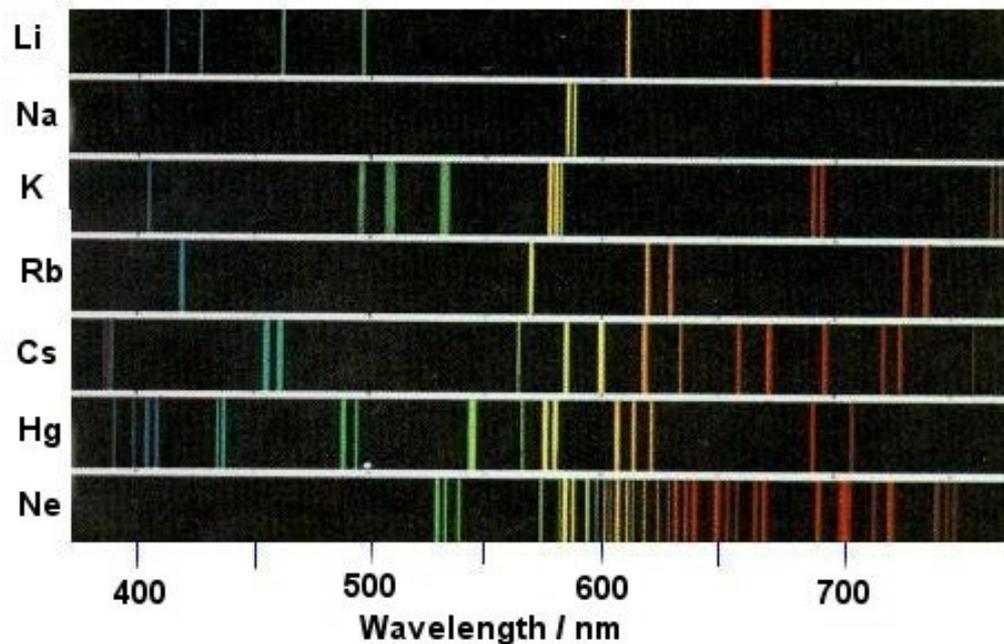


B. Pois os elétrons teriam de perder energia ao orbitar os núcleos, eventualmente caindo nele

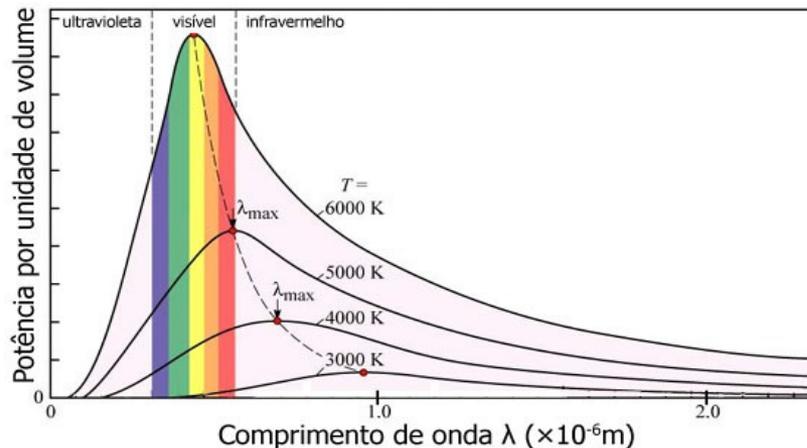
**Motivo:** um elétron em “órbita” estaria em **movimento acelerado**. Pelas equações de Maxwell, ele se comportaria então como uma **antena**, ie, emitiria radiação (luz). Mas aí rapidamente perderia energia até cair no núcleo!!!  
**A Física clássica prevê que os átomos seriam instáveis !!**



# O que têm em comum?

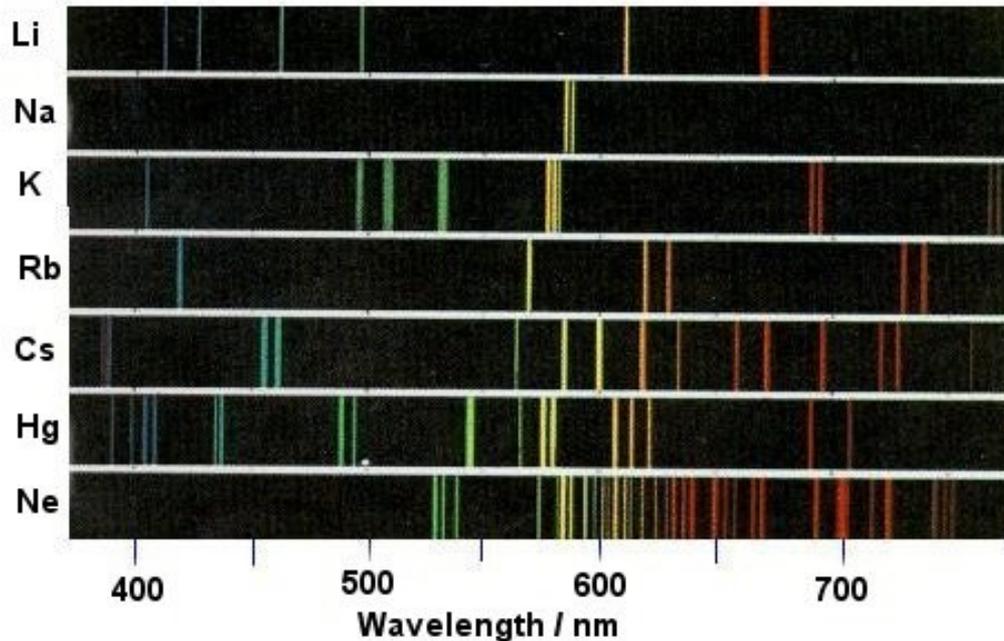


**Espectro discreto de emissão de substâncias puras**



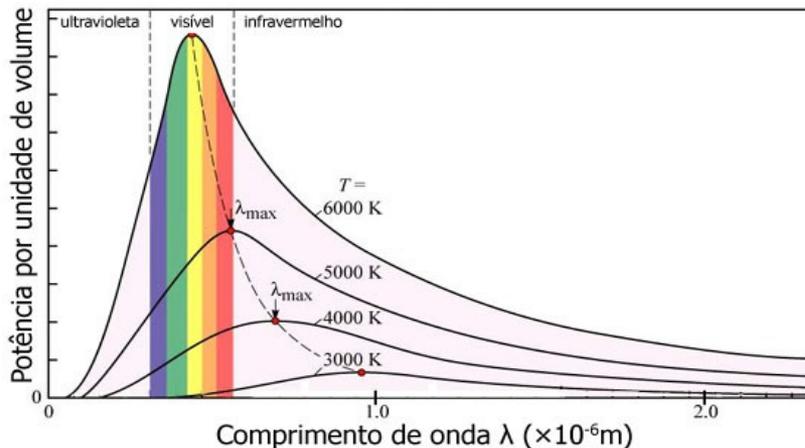
**Espectro contínuo de emissão de “corpos negros” (objetos macroscópicos aquecidos)**

# O que têm em comum?



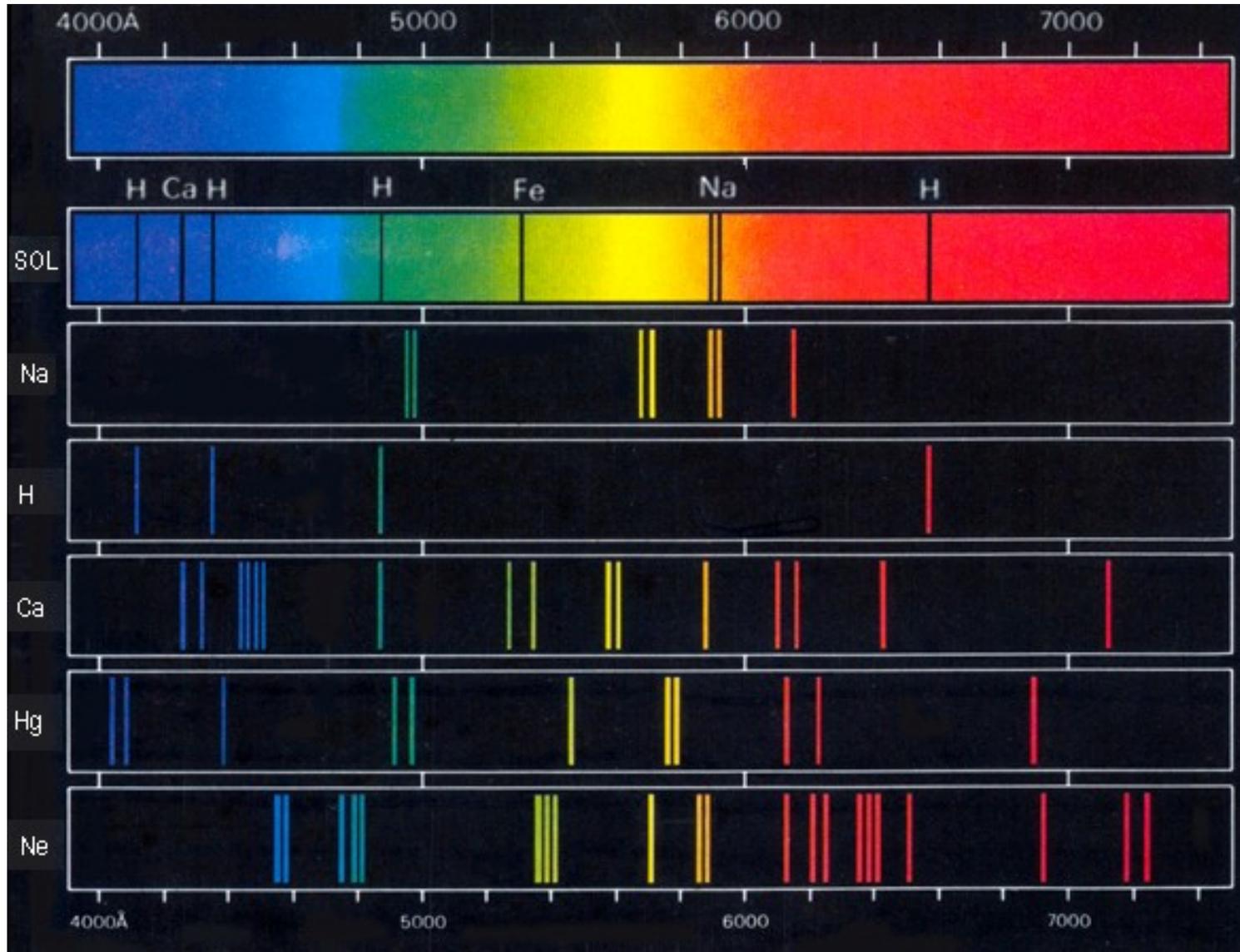
**Espectro discreto de emissão de substâncias puras**

**Por que apenas alguns  $\lambda$ 's?**

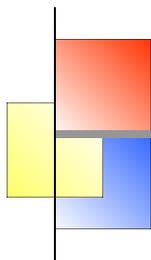


**Espectro contínuo de emissão de “corpos negros” (objetos macroscópicos aquecidos)**

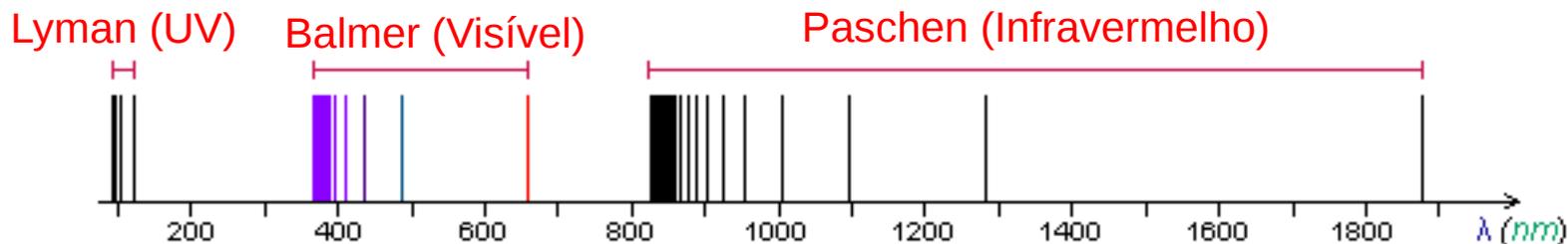
# Do que o Sol é feito?



# Espectro do Hidrogênio



Linhas particularmente simples, separadas em 'séries'



Em 1885, J. Balmer descobriu uma fórmula empírica capaz de descrever as linhas do espectro em luz visível do Hidrogênio (apenas neste caso)

$$\lambda = \frac{91,8 \times 10^{-9} m}{\left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)}$$

onde:  $n = 3, 4, 5 \dots$

As linhas espectrais se estendem até o limite da série, de 364,7 nm.

Espectro de emissão do hidrogênio.



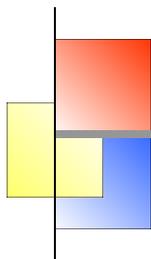
656,5 nm

486,3 nm

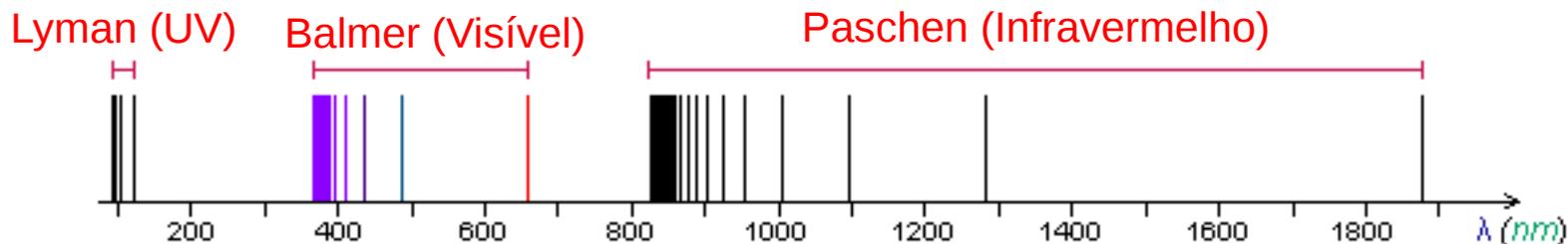
434,2 nm

410,3 nm

# Espectro do Hidrogênio



Linhas particularmente simples, separadas em 'séries'

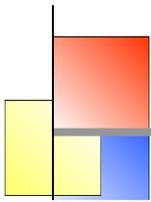


Logo depois, J. Rydberg percebeu que, com uma pequena modificação, a fórmula de Balmer explicava *todas* as linhas espectrais do Hidrogênio

**Fórmula de Rydberg:** 
$$\lambda = \frac{91,8 \times 10^{-9} m}{\left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)}$$
 onde sempre:  $n > m$

$m = 1, 2, 3$  corresponde às Séries de Lyman, Balmer e Paschen, respectivamente

**Não havia, porém, uma explicação para o motivo desta fórmula empírica funcionar**



# Radiação de corpo negro

Um objeto aquecido emite radiação térmica com um perfil que depende de sua temperatura:

Objetos a uma temperatura maior emitem com maior intensidade e apresentam um pico em comprimentos de onda mais curtos.



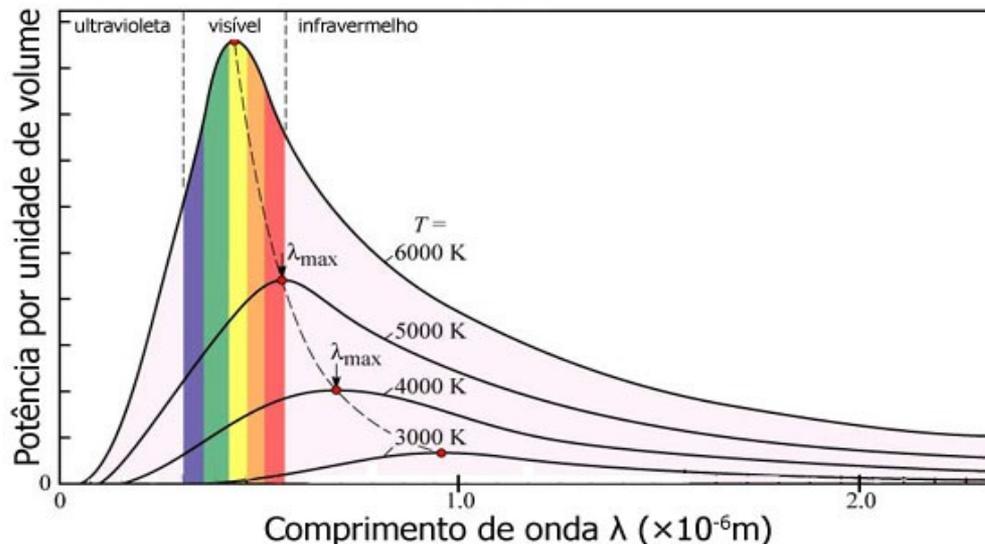
'Leis' empíricas

Lei de Stefan-Boltzmann

$$I = \sigma \cdot T^4; \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Js}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

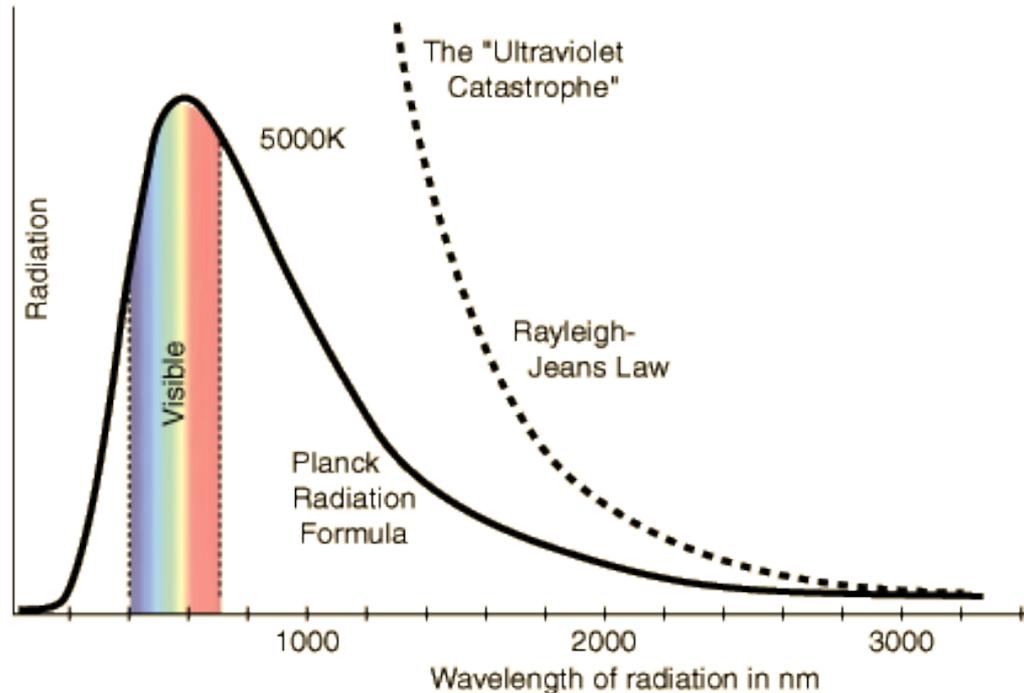
Lei de deslocamento de Wien

$$\lambda_{\text{max}} = (2.90 \times 10^{-3} \text{ m.K}) / T$$



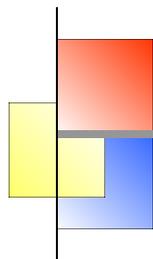
# Radiação de corpo negro

## “Catástrofe” do ultravioleta

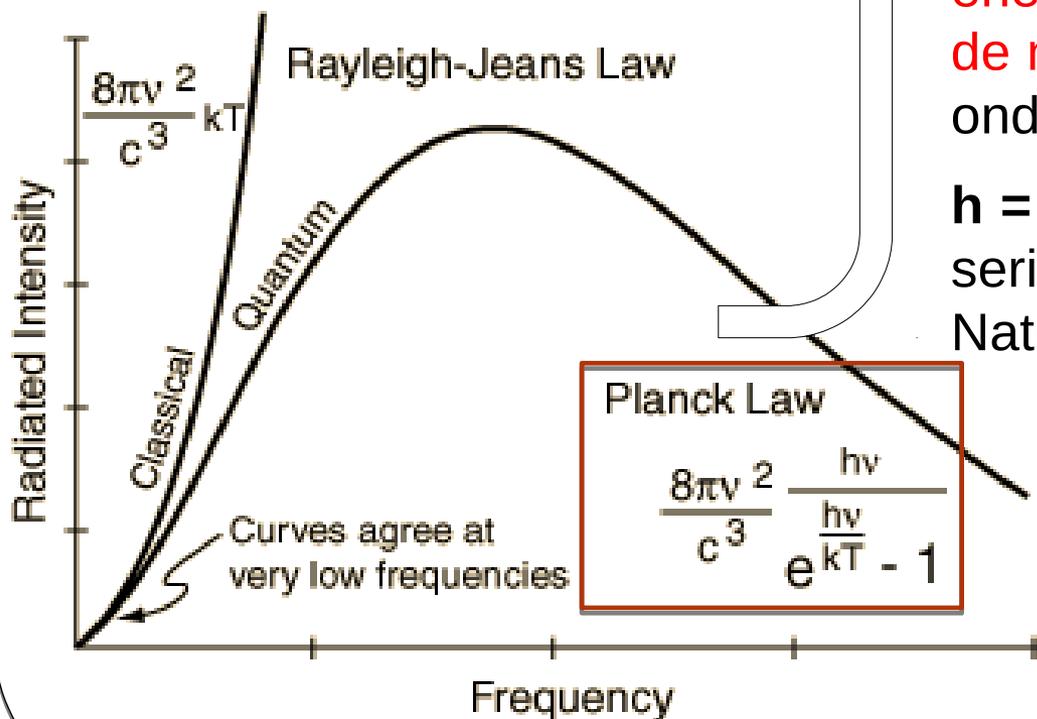


**Problema:** usando as leis conhecidas no fim do séc XIX para o eletromagnetismo e a termodinâmica, cientistas como Lord Rayleigh e James Jeans calcularam que a intensidade da emissão deveria **umentar sem limite** quanto menor fosse  $\lambda$  ! Algo definitivamente não observado!!

# Radiação de corpo negro

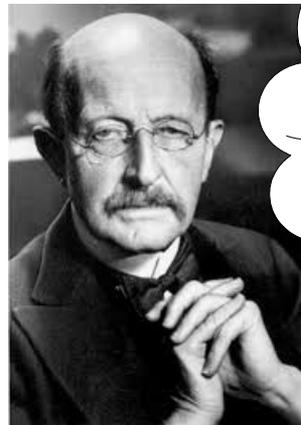


Toward the  
"ultraviolet  
catastrophe"

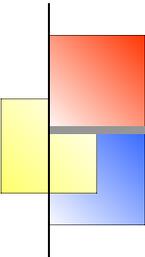


**Solução (?)**: Em 1900, **Planck** obteve uma expressão matemática para a curva correta. partindo de uma suposição esquisita: assumir que, **ao absorver ou emitir luz de freq.  $\nu$ , a energia de um corpo só pode variar de múltiplos inteiros do valor  $E = h\nu$** , onde

**$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$**  seria uma nova constante da Natureza



**Mas de onde vem essa quantização?**  
?



# Conclusão: a Física numa encruzilhada

---

- No começo do séc XX, muitos fenômenos, alguns recém-descobertos, simplesmente não podiam ser explicados pela física “clássica” (Newton + Eletromagnetismo + Termodinâmica)
- Para alguns desses fenômenos (p.ex: espectro do Hidrogênio, espectro de corpo negro) haviam sido encontradas ‘fórmulas’ empíricas que concordavam com os dados experimentais, mas que careciam de qualquer justificativa mais profunda
- Novas tecnologias emergentes forneceram ferramentas que permitiram uma análise mais cuidadosa desses fenômenos, e finalmente (como veremos a seguir) sua elucidação.