

# Capítulo 38 Fótons, Elétrons e Átomos

## RODRIGO ALVES DIAS

Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

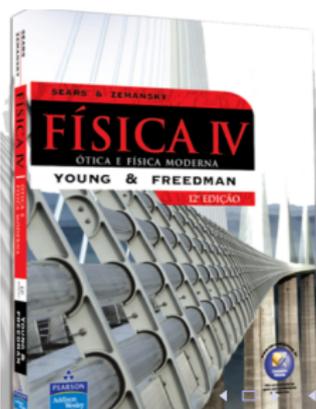
Livro texto: Física 3 - Eletromagnetismo

Autores: Sears e Zemansky

Edição: 12ª

Editora: Pearson - Addison and Wesley

19 de setembro de 2012



## Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como experiências envolvendo espectros de linhas, efeito foto-elétrico e raios X indicaram o caminho para uma re-interpretação radical da natureza da luz.

## Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como experiências envolvendo espectros de linhas, efeito foto-elétrico e raios X indicaram o caminho para uma re-interpretação radical da natureza da luz.
- ▶ De que forma a teoria de Einstein sobre o fóton explica o efeito foto-elétrico.

## Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como experiências envolvendo espectros de linhas, efeito foto-elétrico e raios X indicaram o caminho para uma re-interpretação radical da natureza da luz.
- ▶ De que forma a teoria de Einstein sobre o fóton explica o efeito foto-elétrico.
- ▶ Como o espectro de luz emitido pelo hidrogênio atômico revela a existência de níveis de energia nos átomos.

## Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como experiências envolvendo espectros de linhas, efeito foto-elétrico e raios X indicaram o caminho para uma re-interpretação radical da natureza da luz.
- ▶ De que forma a teoria de Einstein sobre o fóton explica o efeito foto-elétrico.
- ▶ Como o espectro de luz emitido pelo hidrogênio atômico revela a existência de níveis de energia nos átomos.
- ▶ De que maneira os físicos descobriram o núcleo atômico.

## Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como experiências envolvendo espectros de linhas, efeito foto-elétrico e raios X indicaram o caminho para uma re-interpretação radical da natureza da luz.
- ▶ De que forma a teoria de Einstein sobre o fóton explica o efeito foto-elétrico.
- ▶ Como o espectro de luz emitido pelo hidrogênio atômico revela a existência de níveis de energia nos átomos.
- ▶ De que maneira os físicos descobriram o núcleo atômico.
- ▶ Como o modelo de Bohr para as órbitas dos elétrons explicou o espectro dos átomos de hidrogênio e semelhantes ao hidrogênio.

## Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como experiências envolvendo espectros de linhas, efeito foto-elétrico e raios X indicaram o caminho para uma re-interpretação radical da natureza da luz.
- ▶ De que forma a teoria de Einstein sobre o fóton explica o efeito foto-elétrico.
- ▶ Como o espectro de luz emitido pelo hidrogênio atômico revela a existência de níveis de energia nos átomos.
- ▶ De que maneira os físicos descobriram o núcleo atômico.
- ▶ Como o modelo de Bohr para as órbitas dos elétrons explicou o espectro dos átomos de hidrogênio e semelhantes ao hidrogênio.
- ▶ Os princípios de funcionamento de um laser.

## Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como experiências envolvendo espectros de linhas, efeito foto-elétrico e raios X indicaram o caminho para uma re-interpretação radical da natureza da luz.
- ▶ De que forma a teoria de Einstein sobre o fóton explica o efeito foto-elétrico.
- ▶ Como o espectro de luz emitido pelo hidrogênio atômico revela a existência de níveis de energia nos átomos.
- ▶ De que maneira os físicos descobriram o núcleo atômico.
- ▶ Como o modelo de Bohr para as órbitas dos elétrons explicou o espectro dos átomos de hidrogênio e semelhantes ao hidrogênio.
- ▶ Os princípios de funcionamento de um laser.
- ▶ Como experiências com raios X ajudaram a confirmar a teoria do fóton.

## Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como experiências envolvendo espectros de linhas, efeito foto-elétrico e raios X indicaram o caminho para uma re-interpretação radical da natureza da luz.
- ▶ De que forma a teoria de Einstein sobre o fóton explica o efeito foto-elétrico.
- ▶ Como o espectro de luz emitido pelo hidrogênio atômico revela a existência de níveis de energia nos átomos.
- ▶ De que maneira os físicos descobriram o núcleo atômico.
- ▶ Como o modelo de Bohr para as órbitas dos elétrons explicou o espectro dos átomos de hidrogênio e semelhantes ao hidrogênio.
- ▶ Os princípios de funcionamento de um laser.
- ▶ Como experiências com raios X ajudaram a confirmar a teoria do fóton.
- ▶ De que forma a teoria do fóton explica o espectro de luz emitido por um objeto quente, opaco.

## Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ Como experiências envolvendo espectros de linhas, efeito foto-elétrico e raios X indicaram o caminho para uma re-interpretação radical da natureza da luz.
- ▶ De que forma a teoria de Einstein sobre o fóton explica o efeito foto-elétrico.
- ▶ Como o espectro de luz emitido pelo hidrogênio atômico revela a existência de níveis de energia nos átomos.
- ▶ De que maneira os físicos descobriram o núcleo atômico.
- ▶ Como o modelo de Bohr para as órbitas dos elétrons explicou o espectro dos átomos de hidrogênio e semelhantes ao hidrogênio.
- ▶ Os princípios de funcionamento de um laser.
- ▶ Como experiências com raios X ajudaram a confirmar a teoria do fóton.
- ▶ De que forma a teoria do fóton explica o espectro de luz emitido por um objeto quente, opaco.
- ▶ Como podemos conciliar os aspectos da luz como onda e como partícula.





## Introdução

- ▶ Maxwell, Hertz e outros estabeleceram que a luz é uma onda eletromagnética(OE).
- ▶ Fenômenos tais como a interferência, a difração e a polarização, forneceram comprovações da natureza ondulatória da luz.
- ▶ Observando a **emissão**, **absorção** e **espalhamento** das OE, concluiremos que a **energia** de uma OE é, quantizada(fótons ou quanta).



Embora esta nuvem gasosa brilhante chamada Nebulosa Laguna esteja situada a uma distância de 5000 anos-luz da Terra, podemos afirmar que ela é constituída quase completamente de hidrogênio, devido à sua coloração vermelha. Essa luz vermelha tem um comprimento de onda de 656,3 nm e não é emitida por nenhuma outra substância além do hidrogênio. O que acontece dentro de um átomo de hidrogênio para emitir luz com esse comprimento de onda?



## └ Introdução

- ▶ Maxwell, Hertz e outros estabeleceram que a luz é uma onda eletromagnética(OE).
- ▶ Fenômenos tais como a interferência, a difração e a polarização, forneceram comprovações da natureza ondulatória da luz.
- ▶ Observando a emissão, absorção e espalhamento das OE, concluiremos que a energia de uma OE é, quantizada(fótons ou quanta).
- ▶ A energia de um único fóton é proporcional a frequência da radiação, ( $E \sim f$ ).
- ▶ A energia interna de um átomo também é quantizada, somente alguns valores da energia(níveis de energia), são possíveis.



Embora esta nuvem gasosa brilhante chamada Nebulosa Laguna esteja situada a uma distância de 5000 anos-luz da Terra, podemos afirmar que ela é constituída quase completamente de hidrogênio, devido à sua coloração vermelha. Essa luz vermelha tem um comprimento de onda de 656,3 nm e não é emitida por nenhuma outra substância além do hidrogênio. O que acontece dentro de um átomo de hidrogênio para emitir luz com esse comprimento de onda?

## Emissão e Absorção da Luz

Como a luz é produzida?

- ▶ Heinrich Hertz produziu OE usando um circuito ressonante  $L - C$ .

## Emissão e Absorção da Luz

Como a luz é produzida?

- ▶ Heinrich Hertz produziu OE usando um circuito ressonante  $L - C$  .
- ▶ Usou  $f_{cir} \sim 10^8 \text{ Hz}$ , mais  $f_{luz} \sim 10^{15} \text{ Hz} \gg f_{cir}$ .

## Emissão e Absorção da Luz

### Como a luz é produzida?

- ▶ Heinrich Hertz produziu OE usando um circuito ressonante  $L - C$  .
- ▶ Usou  $f_{cir} \sim 10^8 \text{ Hz}$ , mais  $f_{luz} \sim 10^{15} \text{ Hz} \gg f_{cir}$ .
- ▶ No final do século *XIX*, se especulava que ondas com  $f \sim f_{luz}$  poderiam ser produzidas por cargas elétricas oscilando no interior de átomos.

## Emissão e Absorção da Luz

### Como a luz é produzida?

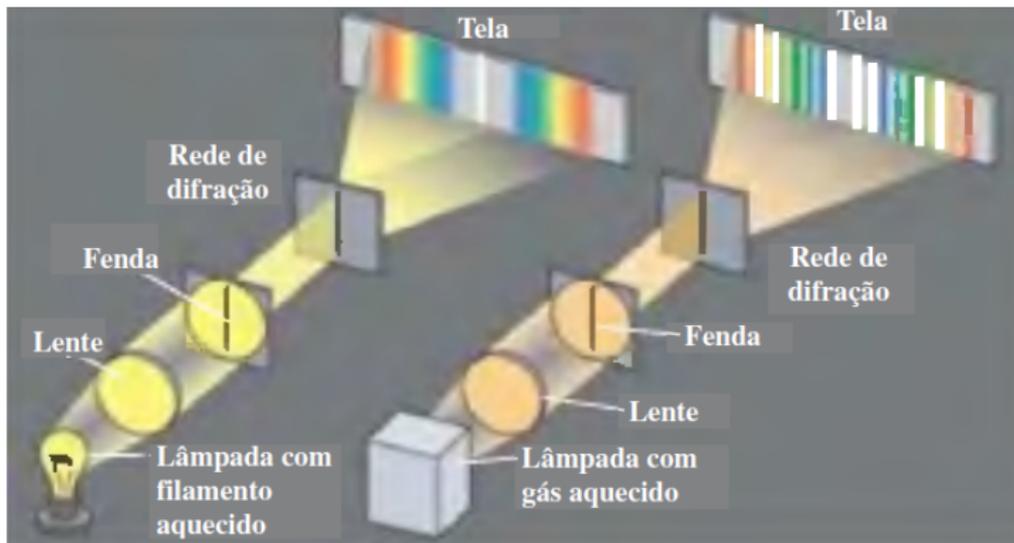
- ▶ Heinrich Hertz produziu OE usando um circuito ressonante  $L - C$  .
- ▶ Usou  $f_{cir} \sim 10^8 \text{ Hz}$ , mais  $f_{luz} \sim 10^{15} \text{ Hz} \gg f_{cir}$ .
- ▶ No final do século *XIX*, se especulava que ondas com  $f \sim f_{luz}$  poderiam ser produzidas por cargas elétricas oscilando no interior de átomos.
- ▶ Tais especulações não explicavam o espectro de linhas, o efeito fotoelétrico, a produção de raios X e outros problemas.

## Espectro de linhas

- ▶ O espectro de um feixe de luz pode ser obtido usando um prisma ou uma rede de difração.

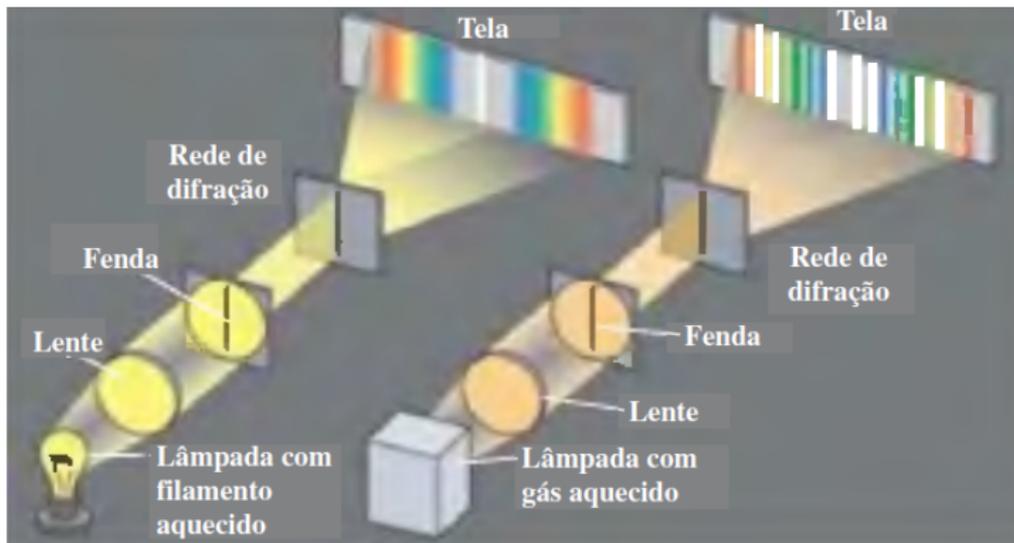
### Espectro de linhas

- ▶ O espectro de um feixe de luz pode ser obtido usando um prisma ou uma rede de difração.
- ▶ De uma fonte luminosa como um sólido aquecido ou um líquido, obtemos um espectro contínuo. (Todos  $\lambda$ 's da luz visível).



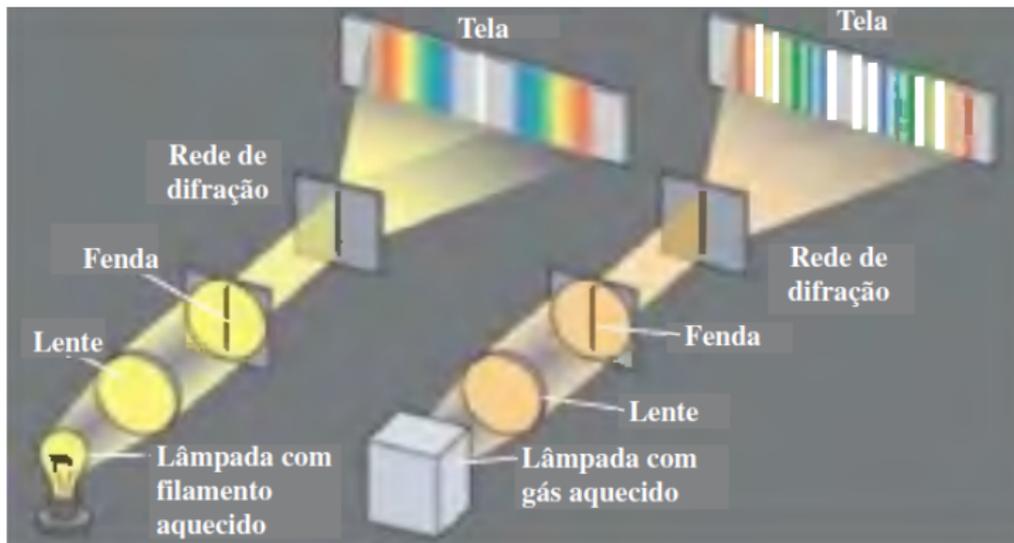
## Espectro de linhas

- ▶ O espectro de um feixe de luz pode ser obtido usando um prisma ou uma rede de difração.
- ▶ De uma fonte luminosa como um sólido aquecido ou um líquido, obtemos um espectro contínuo. (Todos  $\lambda$ 's da luz visível).
- ▶ Quando a fonte é um gás, vemos somente linhas brilhantes paralelas e isoladas.



### Espectro de linhas

- ▶ O espectro de um feixe de luz pode ser obtido usando um prisma ou uma rede de difração.
- ▶ De uma fonte luminosa como um sólido aquecido ou um líquido, obtemos um espectro contínuo. (Todos  $\lambda$ 's da luz visível).
- ▶ Quando a fonte é um gás, vemos somente linhas brilhantes paralelas e isoladas.
- ▶ Esse tipo de espectro é chamado de *espectro de linhas*.



## Espectro de linhas

- ▶ O espectro de um feixe de luz pode ser obtido usando um prisma ou uma rede de difração.
  - ▶ De uma fonte luminosa como um sólido aquecido ou um líquido, obtemos um espectro contínuo. (Todos  $\lambda$ 's da luz visível).
  - ▶ Quando a fonte é um gás, vemos somente linhas brilhantes paralelas e isoladas.
  - ▶ Esse tipo de espectro é chamado de *espectro de linhas*.
- 
- ▶ Cada linha indica um dado comprimento de onda e uma frequência.

## Espectro de linhas

- ▶ O espectro de um feixe de luz pode ser obtido usando um prisma ou uma rede de difração.
  - ▶ De uma fonte luminosa como um sólido aquecido ou um líquido, obtemos um espectro contínuo. (Todos  $\lambda$ 's da luz visível).
  - ▶ Quando a fonte é um gás, vemos somente linhas brilhantes paralelas e isoladas.
  - ▶ Esse tipo de espectro é chamado de *espectro de linhas*.
- 
- ▶ Cada linha indica um dado comprimento de onda e uma frequência.
  - ▶ Cada elemento isolado possui um *espectro de linhas* com um conjunto de  $\lambda$ 's que caracteriza o elemento.

## Espectro de linhas

- ▶ O espectro de um feixe de luz pode ser obtido usando um prisma ou uma rede de difração.
  - ▶ De uma fonte luminosa como um sólido aquecido ou um líquido, obtemos um espectro contínuo. (Todos  $\lambda$ 's da luz visível).
  - ▶ Quando a fonte é um gás, vemos somente linhas brilhantes paralelas e isoladas.
  - ▶ Esse tipo de espectro é chamado de *espectro de linhas*.
- 
- ▶ Cada linha indica um dado comprimento de onda e uma frequência.
  - ▶ Cada elemento isolado possui um *espectro de linhas* com um conjunto de  $\lambda$ 's que caracteriza o elemento.
  - ▶ O espectro característico de um átomo está relacionado a sua estrutura interna.

## Espectro de linhas

- ▶ O espectro de um feixe de luz pode ser obtido usando um prisma ou uma rede de difração.
  - ▶ De uma fonte luminosa como um sólido aquecido ou um líquido, obtemos um espectro contínuo. (Todos  $\lambda$ 's da luz visível).
  - ▶ Quando a fonte é um gás, vemos somente linhas brilhantes paralelas e isoladas.
  - ▶ Esse tipo de espectro é chamado de *espectro de linhas*.
- 
- ▶ Cada linha indica um dado comprimento de onda e uma frequência.
  - ▶ Cada elemento isolado possui um *espectro de linhas* com um conjunto de  $\lambda$ 's que caracteriza o elemento.
  - ▶ O espectro característico de um átomo está relacionado a sua estrutura interna.
  - ▶ As tentativas de explicar esses efeitos com base na *mecânica clássica* e na *eletrodinâmica* **falharam**.

## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

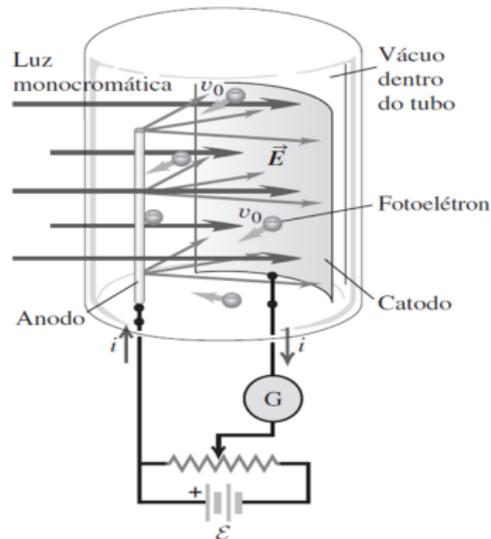
- ▶ Em 1887, quando fazia suas experiências com OE, Hertz descobriu o **EF**.



## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ Em 1887, quando fazia suas experiências com OE, Hertz descobriu o **EF**.
- ▶ Quando a luz incide sobre uma superfície metálica, alguns elétrons próximos a superfície absorvem energia.
- ▶ Se a energia é suficiente para superar a força que os mantém na superfície (*atração dos ions positivos*), estes escapam para o espaço das vizinhanças.

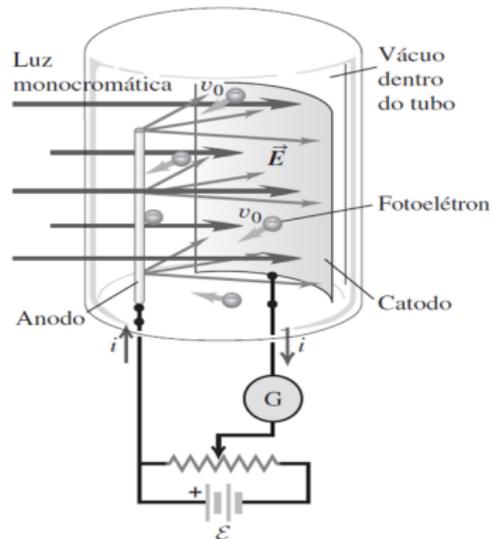
- ▶ Esse efeito é descrito usando um dispositivo, chamado **valvula fotoelétrica**.



## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ Em 1887, quando fazia suas experiências com OE, Hertz descobriu o **EF**.
- ▶ Quando a luz incide sobre uma superfície metálica, alguns elétrons próximos a superfície absorvem energia.
- ▶ Se a energia é suficiente para superar a força que os mantém na superfície (*atração dos ions positivos*), estes escapam para o espaço das vizinhanças.
- ▶ O **EF** consiste na emissão de elétrons quando OE incidem sobre uma superfície.

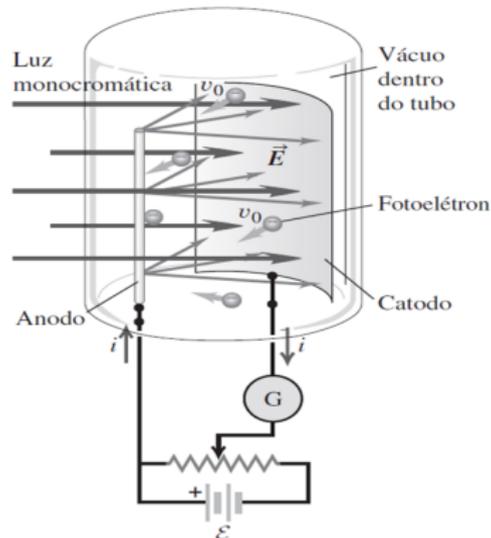
- ▶ Esse efeito é descrito usando um dispositivo, chamado **valvula fotoelétrica**.



## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ Em 1887, quando fazia suas experiências com OE, Hertz descobriu o **EF**.
- ▶ Quando a luz incide sobre uma superfície metálica, alguns elétrons próximos a superfície absorvem energia.
- ▶ Se a energia é suficiente para superar a força que os mantém na superfície (*atração dos ions positivos*), estes escapam para o espaço das vizinhanças.
- ▶ O **EF** consiste na emissão de elétrons quando OE incidem sobre uma superfície.
- ▶ Os elétrons absorvem energia da OE, e podem superar a atração dos ions positivos e se libertar da superfície.

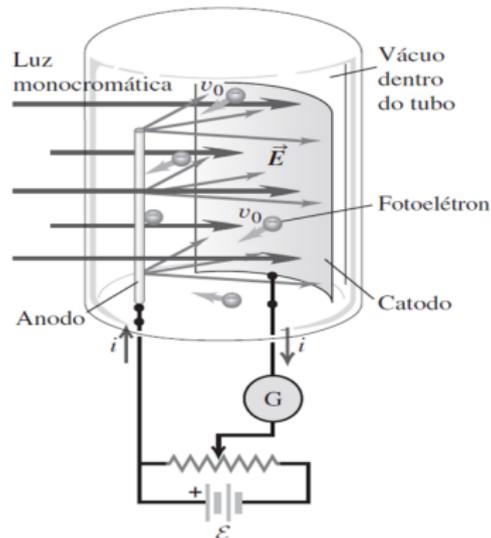
- ▶ Esse efeito é descrito usando um dispositivo, chamado **valvula fotoelétrica**.



## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ Em 1887, quando fazia suas experiências com OE, Hertz descobriu o **EF**.
- ▶ Quando a luz incide sobre uma superfície metálica, alguns elétrons próximos a superfície absorvem energia.
- ▶ Se a energia é suficiente para superar a força que os mantém na superfície (*atração dos ions positivos*), estes escapam para o espaço das vizinhanças.
- ▶ O **EF** consiste na emissão de elétrons quando OE incidem sobre uma superfície.
- ▶ Os elétrons absorvem energia da OE, e podem superar a atração dos ions positivos e se libertar da superfície.
- ▶ A atração produz uma barreira de energia potencial, que mantém os elétrons confinados no material.

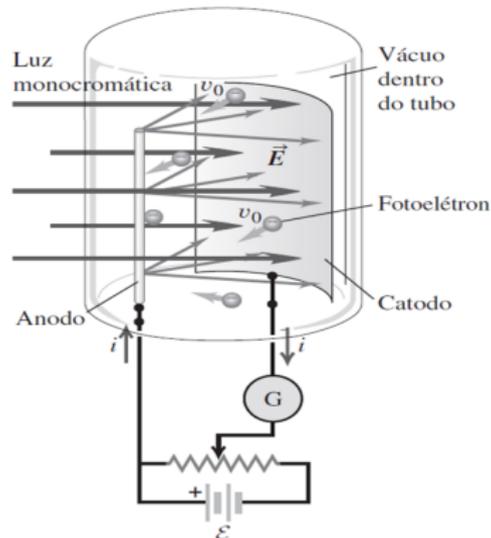
- ▶ Esse efeito é descrito usando um dispositivo, chamado **valvula fotoelétrica**.



## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

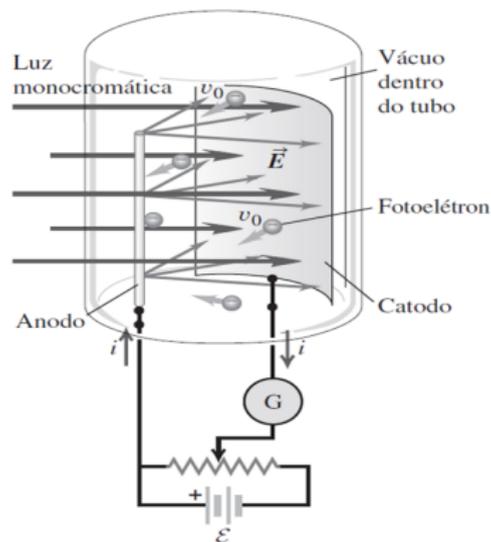
- ▶ Em 1887, quando fazia suas experiências com OE, Hertz descobriu o **EF**.
- ▶ Quando a luz incide sobre uma superfície metálica, alguns elétrons próximos a superfície absorvem energia.
- ▶ Se a energia é suficiente para superar a força que os mantém na superfície (*atração dos ions positivos*), estes escapam para o espaço das vizinhanças.
- ▶ O **EF** consiste na emissão de elétrons quando OE incidem sobre uma superfície.
- ▶ Os elétrons absorvem energia da OE, e podem superar a atração dos ions positivos e se libertar da superfície.
- ▶ A atração produz uma barreira de energia potencial, que mantém os elétrons confinados no material.
- ▶ A quantidade mínima de energia para um elétron escapar é chamada de **função trabalho**,  $\phi$ .

- ▶ Esse efeito é descrito usando um dispositivo, chamado **valvula fotoelétrica**.



## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

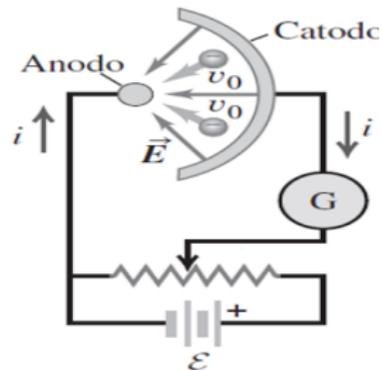
- ▶ A fonte de fem cria um  $\vec{E}$  orientado do ânodo para o catodo.
- ▶ Esse efeito é descrito usando um dispositivo, chamado **valvula fotoelétrica**.





## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ A fonte de fem cria um  $\vec{E}$  orientado do ânodo para o catodo.
- ▶ A OE incidente faz com que os elétrons sejam emitidos do catodo e empurrados por  $\vec{E}$  para o ânodo produzindo  $i$ (medida pelo galvanômetro).

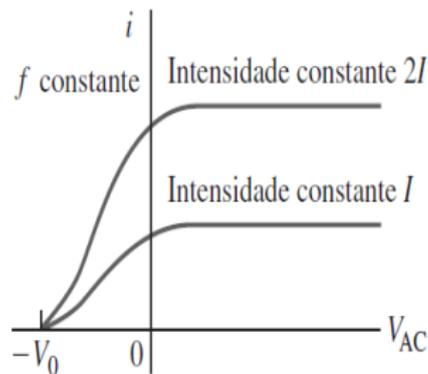
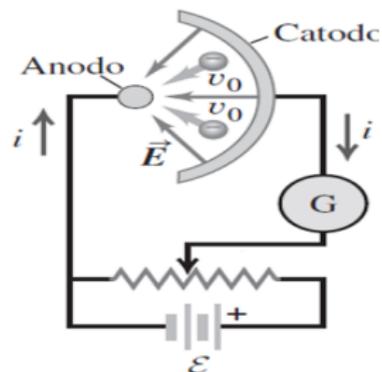






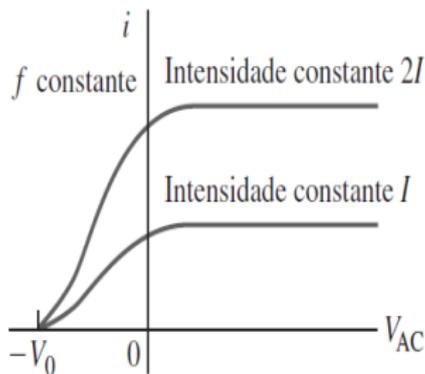
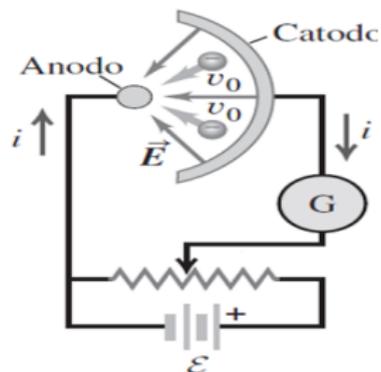
## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ A fonte de fem cria um  $\vec{E}$  orientado do ânodo para o catodo.
- ▶ A OE incidente faz com que os elétrons sejam emitidos do catodo e empurrados por  $\vec{E}$  para o ânodo produzindo  $i$ (medida pelo galvanômetro).
- ▶ Se  $f_{luz} < f_c$ , onde  $f_c$  é a frequência de corte, nenhuma corrente é observada.
- ▶  $f_c$  é uma característica do material do catodo.
- ▶ Se  $f_{luz} > f_c$ , alguns elétrons são emitidos do catodo com **velocidade inicial elevada**.



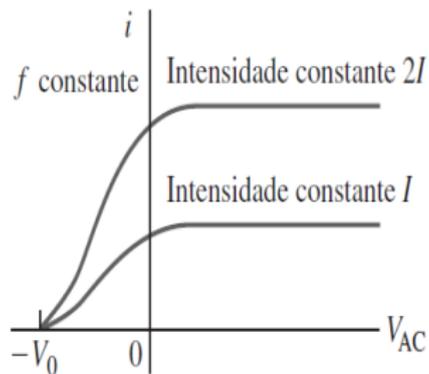
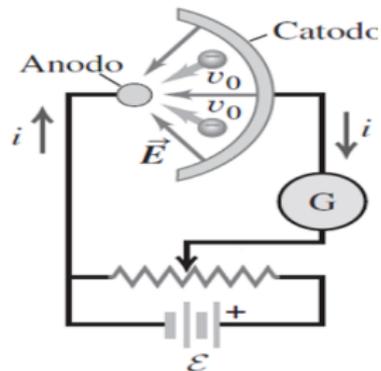
## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ A fonte de fem cria um  $\vec{E}$  orientado do ânodo para o catodo.
- ▶ A OE incidente faz com que os elétrons sejam emitidos do catodo e empurrados por  $\vec{E}$  para o ânodo produzindo  $i$ (medida pelo galvanômetro).
- ▶ Se  $f_{luz} < f_c$ , onde  $f_c$  é a frequência de corte, nenhuma corrente é observada.
- ▶  $f_c$  é uma característica do material do catodo.
- ▶ Se  $f_{luz} > f_c$ , alguns elétrons são emitidos do catodo com **velocidade inicial elevada**.
- ▶ Se o  $|\vec{E}|$  não é grande, os elétrons com velocidades altas continuam a atingir o ânodo e ainda assim existe uma corrente.



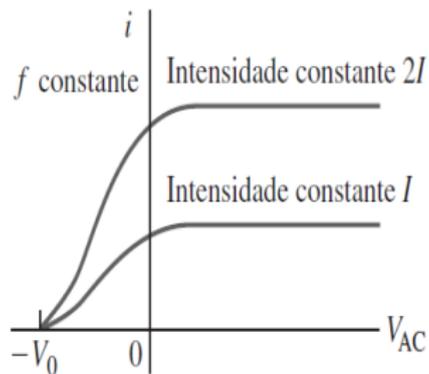
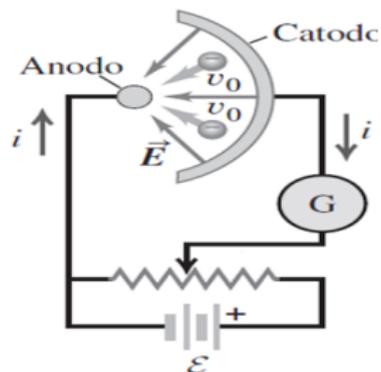
## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ Invertendo a polarizada da bateria, de forma que  $\vec{E}$  se inverta e conseqüentemente  $\vec{F}$ , determinamos  $V_0 = -V_{AC}$ , quando a corrente se anular.



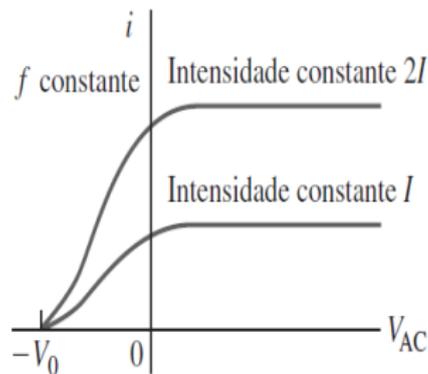
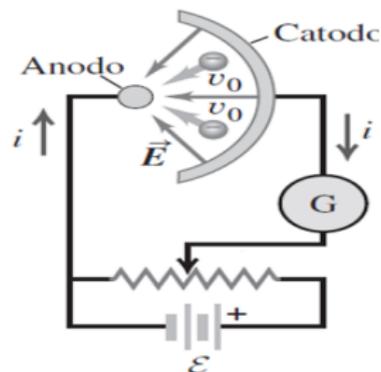
## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ Invertendo a polarizada da bateria, de forma que  $\vec{E}$  se inverta e conseqüentemente  $\vec{F}$ , determinamos  $V_0 = -V_{AC}$ , quando a corrente se anular.
- ▶  $V_0$  é o chamado potencial de corte.



## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ Invertendo a polarizada da bateria, de forma que  $\vec{E}$  se inverta e conseqüentemente  $\vec{F}$ , determinamos  $V_0 = -V_{AC}$ , quando a corrente se anular.
- ▶  $V_0$  é o chamado potencial de corte.
- ▶ O trabalho  $W_{AC} = -eV_0$  é realizado sobre o elétron do catodo para o ânodo.

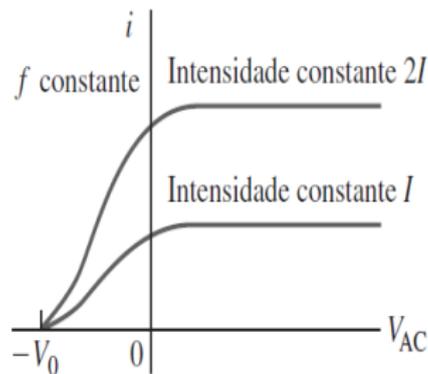
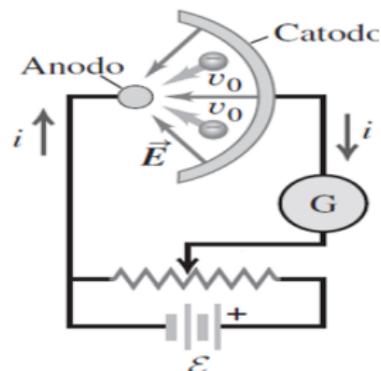


## O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ Invertendo a polarizada da bateria, de forma que  $\vec{E}$  se inverta e conseqüentemente  $\vec{F}$ , determinamos  $V_0 = -V_{AC}$ , quando a corrente se anular.
- ▶  $V_0$  é o chamado potencial de corte.
- ▶ O trabalho  $W_{AC} = -eV_0$  é realizado sobre o elétron do catodo para o ânodo.
- ▶ Os elétrons deixam o catodo com,

$$K_{max}^i = \frac{mV_{max}^2}{2} \text{ e chegam no ânodo com,}$$

$$K_{max}^f = 0.$$



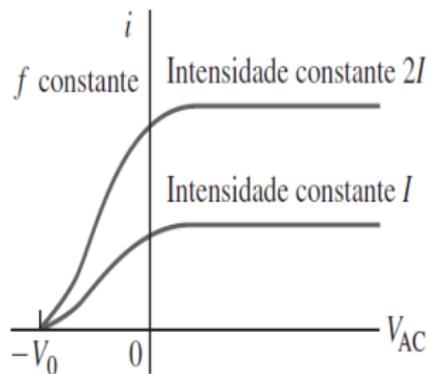
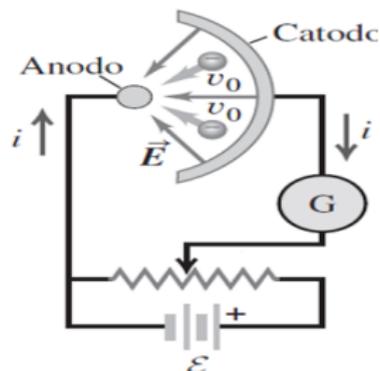
## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ Invertendo a polarizada da bateria, de forma que  $\vec{E}$  se inverta e conseqüentemente  $\vec{F}$ , determinamos  $V_0 = -V_{AC}$ , quando a corrente se anular.

- ▶  $V_0$  é o chamado potencial de corte.
- ▶ O trabalho  $W_{AC} = -eV_0$  é realizado sobre o elétron do catodo para o ânodo.

- ▶ Os elétrons deixam o catodo com,  $K_{max}^i = \frac{mV_{max}^2}{2}$  e chegam no ânodo com,  $K_{max}^f = 0$ .

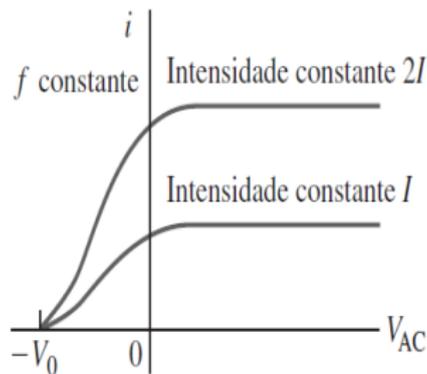
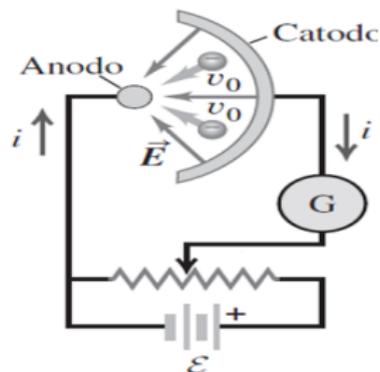
- ▶ Do teorema do trabalho-energia, obtemos



## O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ Invertendo a polarizada da bateria, de forma que  $\vec{E}$  se inverta e conseqüentemente  $\vec{F}$ , determinamos  $V_0 = -V_{AC}$ , quando a corrente se anular.
- ▶  $V_0$  é o chamado potencial de corte.
- ▶ O trabalho  $W_{AC} = -eV_0$  é realizado sobre o elétron do catodo para o ânodo.
- ▶ Os elétrons deixam o catodo com,  $K_{max}^i = \frac{mV_{max}^2}{2}$  e chegam no ânodo com,  $K_{max}^f = 0$ .
- ▶ Do teorema do trabalho-energia, obtemos

$$W_{total} = -eV_0 = \Delta K = 0 - K_{max}$$

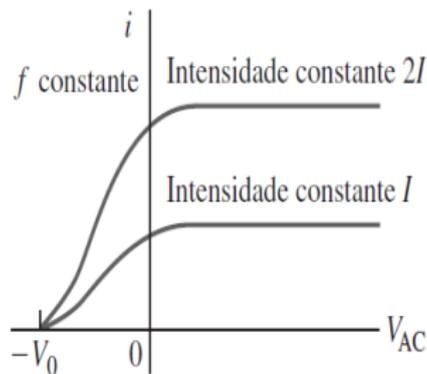
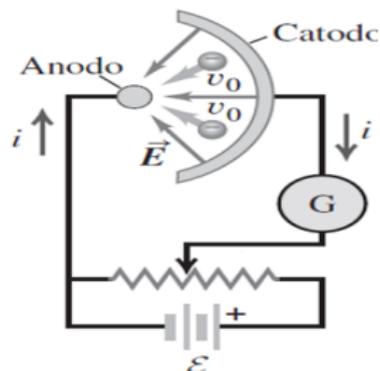


## O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ Invertendo a polarizada da bateria, de forma que  $\vec{E}$  se inverta e conseqüentemente  $\vec{F}$ , determinamos  $V_0 = -V_{AC}$ , quando a corrente se anular.
- ▶  $V_0$  é o chamado potencial de corte.
- ▶ O trabalho  $W_{AC} = -eV_0$  é realizado sobre o elétron do catodo para o ânodo.
- ▶ Os elétrons deixam o catodo com,  $K_{max}^i = \frac{mv_{max}^2}{2}$  e chegam no ânodo com,  $K_{max}^f = 0$ .
- ▶ Do teorema do trabalho-energia, obtemos

$$W_{total} = -eV_0 = \Delta K = 0 - K_{max}$$

$$K_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2} = eV_0$$



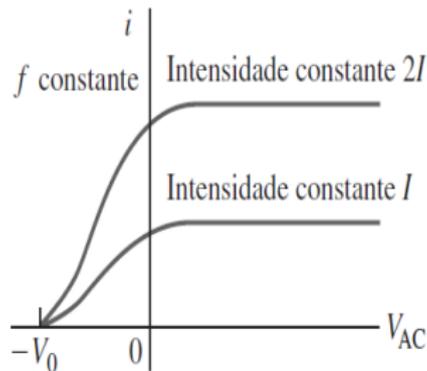
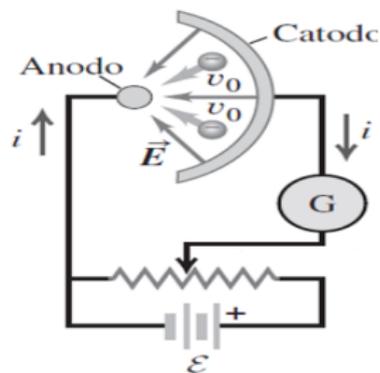
## O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ Invertendo a polarizada da bateria, de forma que  $\vec{E}$  se inverta e conseqüentemente  $\vec{F}$ , determinamos  $V_0 = -V_{AC}$ , quando a corrente se anular.
- ▶  $V_0$  é o chamado potencial de corte.
- ▶ O trabalho  $W_{AC} = -eV_0$  é realizado sobre o elétron do catodo para o ânodo.
- ▶ Os elétrons deixam o catodo com,  $K_{max}^i = \frac{mv_{max}^2}{2}$  e chegam no ânodo com,  $K_{max}^f = 0$ .
- ▶ Do teorema do trabalho-energia, obtemos

$$W_{total} = -eV_0 = \Delta K = 0 - K_{max}$$

$$K_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2} = eV_0$$

- ▶ Se  $V_{ac}$  e suficientemente grande e positivo, as curvas saturam.



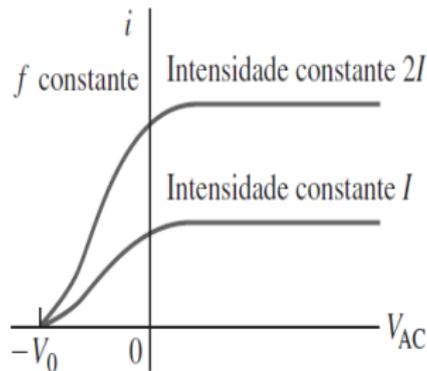
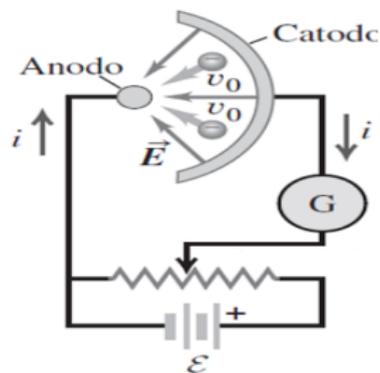
## O Efeito Fotoelétrico(EF)

- ▶ Invertendo a polarizada da bateria, de forma que  $\vec{E}$  se inverta e conseqüentemente  $\vec{F}$ , determinamos  $V_0 = -V_{AC}$ , quando a corrente se anular.
- ▶  $V_0$  é o chamado potencial de corte.
- ▶ O trabalho  $W_{AC} = -eV_0$  é realizado sobre o elétron do catodo para o ânodo.
- ▶ Os elétrons deixam o catodo com,  $K_{max}^i = \frac{mv_{max}^2}{2}$  e chegam no ânodo com,  $K_{max}^f = 0$ .
- ▶ Do teorema do trabalho-energia, obtemos

$$W_{total} = -eV_0 = \Delta K = 0 - K_{max}$$

$$K_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2} = eV_0$$

- ▶ Se  $V_{ac}$  e suficientemente grande e positivo, as curvas saturam.
- ▶ Todos os elétrons emitidos são coletados pelo ânodo.

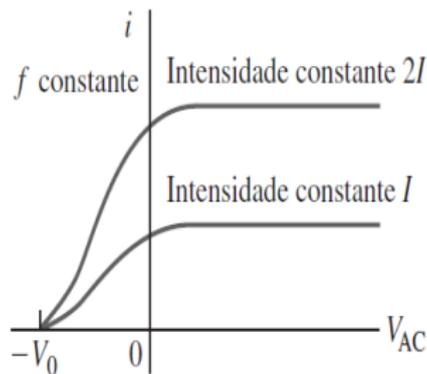
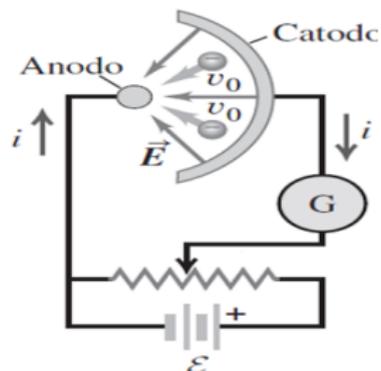


## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

$$W_{total} = -eV_0 = \Delta K = 0 - K_{max}$$

$$K_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2} = eV_0$$

- ▶ Se  $V_{ac}$  é suficientemente grande e positivo, as curvas saturam.
- ▶ Todos os elétrons emitidos são coletados pelo ânodo.
- ▶ Se a  $I \rightarrow 2I$ , mas a  $f = Const.$ , a curva atinge um nível mais elevado proporcional a  $2I$ .

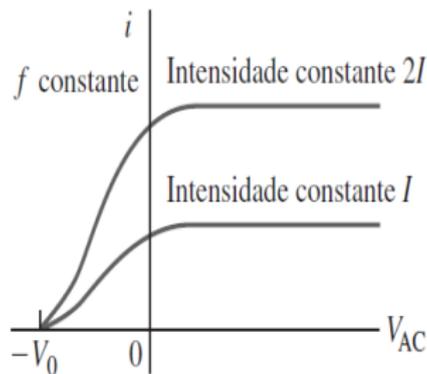
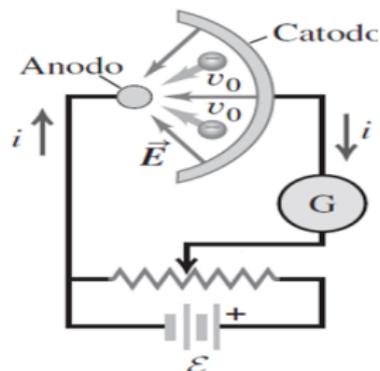


## O Efeito Fotoelétrico(EF)

$$W_{total} = -eV_0 = \Delta K = 0 - K_{max}$$

$$K_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2} = eV_0$$

- ▶ Se  $V_{ac}$  é suficientemente grande e positivo, as curvas saturam.
- ▶ Todos os elétrons emitidos são coletados pelo ânodo.
- ▶ Se a  $I \rightarrow 2I$ , mas a  $f = Const.$ , a curva atinge um nível mais elevado proporcional a  $2I$ .
- ▶ Mostrando que um número maior de elétrons é emitido por unidade de tempo, mas  $V_0 = Const.$

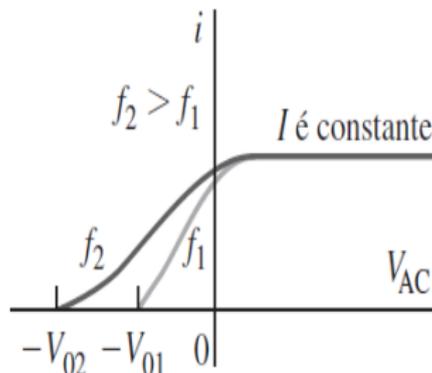
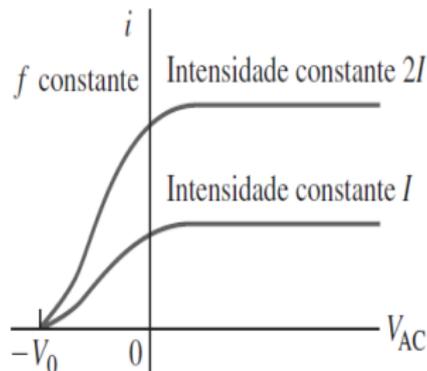


## O Efeito Fotoelétrico(EF)

$$W_{total} = -eV_0 = \Delta K = 0 - K_{max}$$

$$K_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2} = eV_0$$

- ▶ Se  $V_{ac}$  é suficientemente grande e positivo, as curvas saturam.
- ▶ Todos os elétrons emitidos são coletados pelo ânodo.
- ▶ Se a  $I \rightarrow 2I$ , mas a  $f = Const.$ , a curva atinge um nível mais elevado proporcional a  $2I$ .
- ▶ Mostrando que um número maior de elétrons é emitido por unidade de tempo, mas  $V_0 = Const.$
- ▶ Para frequências  $f_2 > f_1$ , vemos que  $V_{02} > V_{01}$ .

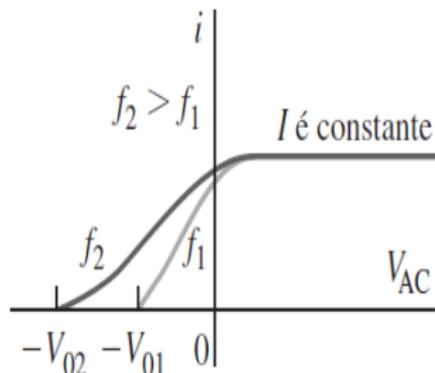
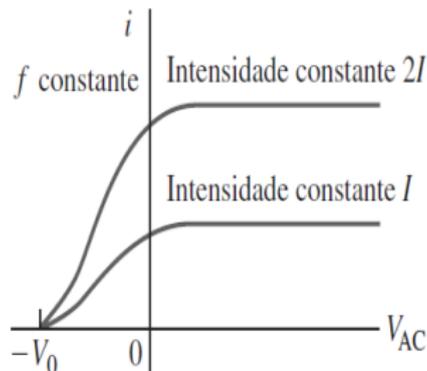


## O Efeito Fotoelétrico(EF)

$$W_{total} = -eV_0 = \Delta K = 0 - K_{max}$$

$$K_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2} = eV_0$$

- ▶ Se  $V_{ac}$  é suficientemente grande e positivo, as curvas saturam.
- ▶ Todos os elétrons emitidos são coletados pelo ânodo.
- ▶ Se a  $I \rightarrow 2I$ , mas a  $f = Const.$ , a curva atinge um nível mais elevado proporcional a  $2I$ .
- ▶ Mostrando que um número maior de elétrons é emitido por unidade de tempo, mas  $V_0 = Const.$
- ▶ Para frequências  $f_2 > f_1$ , vemos que  $V_{02} > V_{01}$ .
- ▶ Verifica-se que  $V_0$  é uma função linear da frequência  $f$ .



## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

### Teoria do fóton proposta por Einstein

- ▶ A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905.

## └ O Efeito Fotoelétrico(EF)

### Teoria do fóton proposta por Einstein

- ▶ A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905.
- ▶ Com base na hipótese de Max Planck (proposta 5 anos antes), postulou que uma OE é constituída por pacotes de energia, **fótons ou quanta**.

## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

### Teoria do fóton proposta por Einstein

- ▶ A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905.
- ▶ Com base na hipótese de Max Planck (proposta 5 anos antes), postulou que uma OE é constituída por pacotes de energia, **fótons ou quanta**.
- ▶ A energia de um fóton é igual a uma constante  $h$  vezes a frequência.  $E = hf$ .

## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

### Teoria do fóton proposta por Einstein

- ▶ A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905.
- ▶ Com base na hipótese de Max Planck (proposta 5 anos antes), postulou que uma OE é constituída por pacotes de energia, **fótons ou quanta**.
- ▶ A energia de um fóton é igual a uma constante  $h$  vezes a freqüência.  $E = hf$ .
- ▶ Como  $f = c/\lambda$  para OE no vácuo, temos  $E = hf = hc/\lambda$ .

### Teoria do fóton proposta por Einstein

- ▶ A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905.
- ▶ Com base na hipótese de Max Planck (proposta 5 anos antes), postulou que uma OE é constituída por pacotes de energia, **fótons ou quanta**.
- ▶ A energia de um fóton é igual a uma constante  $h$  vezes a frequência.  $E = hf$ .
- ▶ Como  $f = c/\lambda$  para OE no vácuo, temos  $E = hf = hc/\lambda$ .
- ▶ Onde  $h$  e uma constante universal chamada de constante de Planck.

### Teoria do fóton proposta por Einstein

- ▶ A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905.
- ▶ Com base na hipótese de Max Planck (proposta 5 anos antes), postulou que uma OE é constituída por pacotes de energia, **fótons ou quanta**.
- ▶ A energia de um fóton é igual a uma constante  $h$  vezes a frequência.  $E = hf$ .
- ▶ Como  $f = c/\lambda$  para OE no vácuo, temos  $E = hf = hc/\lambda$ .
- ▶ Onde  $h$  é uma constante universal chamada de constante de Planck.
- ▶  $h = 6,62 \times 10^{-34} J \cdot s$ .

## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

### Teoria do fóton proposta por Einstein

- ▶ A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905.
- ▶ Com base na hipótese de Max Planck (proposta 5 anos antes), postulou que uma OE é constituída por pacotes de energia, **fótons ou quanta**.
- ▶ A energia de um fóton é igual a uma constante  $h$  vezes a freqüência.  $E = hf$ .
- ▶ Como  $f = c/\lambda$  para OE no vácuo, temos  $E = hf = hc/\lambda$ .
- ▶ Onde  $h$  e uma constante universal chamada de constante de Planck.
- ▶  $h = 6,62 \times 10^{-34} J \cdot s$ .
- ▶ Um fóton que atinge uma superfície e absorvido por um elétron.

## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

### Teoria do fóton proposta por Einstein

- ▶ A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905.
- ▶ Com base na hipótese de Max Planck (proposta 5 anos antes), postulou que uma OE é constituída por pacotes de energia, **fótons ou quanta**.
- ▶ A energia de um fóton é igual a uma constante  $h$  vezes a freqüência.  $E = hf$ .
- ▶ Como  $f = c/\lambda$  para OE no vácuo, temos  $E = hf = hc/\lambda$ .
- ▶ Onde  $h$  e uma constante universal chamada de constante de Planck.
- ▶  $h = 6,62 \times 10^{-34} J \cdot s$ .
- ▶ Um fóton que atinge uma superfície e absorvido por um elétron.
- ▶ A transferência de energia e um processo **tudo ou nada**, ou seja, o elétron ou ganha a energia total do fóton ou não absorve nenhuma energia.

## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

## Teoria do fóton proposta por Einstein

- ▶ A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905.
  - ▶ Com base na hipótese de Max Planck (proposta 5 anos antes), postulou que uma OE é constituída por pacotes de energia, **fótons ou quanta**.
  - ▶ A energia de um fóton é igual a uma constante  $h$  vezes a frequência.  $E = hf$ .
  - ▶ Como  $f = c/\lambda$  para OE no vácuo, temos  $E = hf = hc/\lambda$ .
  - ▶ Onde  $h$  é uma constante universal chamada de constante de Planck.
  - ▶  $h = 6,62 \times 10^{-34} J \cdot s$ .
  - ▶ Um fóton que atinge uma superfície e absorvido por um elétron.
  - ▶ A transferência de energia é um processo **tudo ou nada**, ou seja, o elétron ou ganha a energia total do fóton ou não absorve nenhuma energia.
- ▶  $K_{max}$  de um elétron emitido é igual a diferença  $E_{foton} - \phi$ .

## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

### Teoria do fóton proposta por Einstein

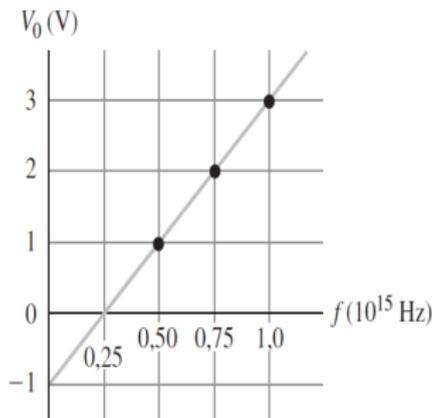
- ▶ A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905.
  - ▶ Com base na hipótese de Max Planck (proposta 5 anos antes), postulou que uma OE é constituída por pacotes de energia, **fótons ou quanta**.
  - ▶ A energia de um fóton é igual a uma constante  $h$  vezes a frequência.  $E = hf$ .
  - ▶ Como  $f = c/\lambda$  para OE no vácuo, temos  $E = hf = hc/\lambda$ .
  - ▶ Onde  $h$  é uma constante universal chamada de constante de Planck.
  - ▶  $h = 6,62 \times 10^{-34} J \cdot s$ .
  - ▶ Um fóton que atinge uma superfície e absorvido por um elétron.
  - ▶ A transferência de energia é um processo **tudo ou nada**, ou seja, o elétron ou ganha a energia total do fóton ou não absorve nenhuma energia.
- ▶  $K_{max}$  de um elétron emitido é igual a diferença  $E_{foton} - \phi$ .
  - ▶  $K_{max} = \frac{m}{2} v_{max}^2 = hf - \phi = eV_0$

## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

### Teoria do fóton proposta por Einstein

- ▶ A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905.
- ▶ Com base na hipótese de Max Planck (proposta 5 anos antes), postulou que uma OE é constituída por pacotes de energia, **fótons ou quanta**.
- ▶ A energia de um fóton é igual a uma constante  $h$  vezes a frequência.  $E = hf$ .
- ▶ Como  $f = c/\lambda$  para OE no vácuo, temos  $E = hf = hc/\lambda$ .
- ▶ Onde  $h$  é uma constante universal chamada de constante de Planck.
- ▶  $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .
- ▶ Um fóton que atinge uma superfície e é absorvido por um elétron.
- ▶ A transferência de energia é um processo **tudo ou nada**, ou seja, o elétron ou ganha a energia total do fóton ou não absorve nenhuma energia.

- ▶  $K_{max}$  de um elétron emitido é igual a diferença  $E_{foton} - \phi$ .
- ▶  $K_{max} = \frac{m}{2} v_{max}^2 = hf - \phi = eV_0$
- ▶ Podemos medir  $V_0$  para diversos valores de  $f$  para um dado material do catodo.

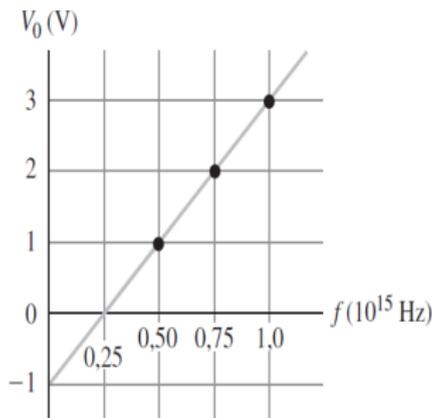


## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

### Teoria do fóton proposta por Einstein

- ▶ A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905.
- ▶ Com base na hipótese de Max Planck (proposta 5 anos antes), postulou que uma OE é constituída por pacotes de energia, **fótons ou quanta**.
- ▶ A energia de um fóton é igual a uma constante  $h$  vezes a frequência.  $E = hf$ .
- ▶ Como  $f = c/\lambda$  para OE no vácuo, temos  $E = hf = hc/\lambda$ .
- ▶ Onde  $h$  é uma constante universal chamada de constante de Planck.
- ▶  $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .
- ▶ Um fóton que atinge uma superfície e é absorvido por um elétron.
- ▶ A transferência de energia é um processo **tudo ou nada**, ou seja, o elétron ou ganha a energia total do fóton ou não absorve nenhuma energia.

- ▶  $K_{max}$  de um elétron emitido é igual a diferença  $E_{foton} - \phi$ .
- ▶  $K_{max} = \frac{m}{2} v_{max}^2 = hf - \phi = eV_0$
- ▶ Podemos medir  $V_0$  para diversos valores de  $f$  para um dado material do catodo.
- ▶ Com,  $hf - \phi = eV_0$ , obtemos  $\phi$  e  $h/e$ .



## ↳ O Efeito Fotoelétrico(EF)

### Momento linear do fóton

- ▶ Um fóton, de qualquer radiação, com frequência  $f$  e comprimento de onda  $\lambda$  possui uma energia  $E = hf = hc/\lambda$

## Momento linear do fóton

- ▶ Um fóton, de qualquer radiação, com frequência  $f$  e comprimento de onda  $\lambda$  possui uma energia  $E = hf = hc/\lambda$
- ▶ Da teoria da relatividade especial, toda partícula que possui energia deve também possuir momenta linear, mesmo quando ela não apresenta massa de repouso.

## Momento linear do fóton

- ▶ Um fóton, de qualquer radiação, com frequência  $f$  e comprimento de onda  $\lambda$  possui uma energia  $E = hf = hc/\lambda$
- ▶ Da teoria da relatividade especial, toda partícula que possui energia deve também possuir momenta linear, mesmo quando ela não apresenta massa de repouso.
- ▶ Os fótons tem massa de repouso igual a zero.

## Momento linear do fóton

- ▶ Um fóton, de qualquer radiação, com frequência  $f$  e comprimento de onda  $\lambda$  possui uma energia  $E = hf = hc/\lambda$
- ▶ Da teoria da relatividade especial, toda partícula que possui energia deve também possuir momenta linear, mesmo quando ela não apresenta massa de repouso.
- ▶ Os fótons tem massa de repouso igual a zero.
- ▶ Um fóton com energia  $E$  possui momenta linear com modulo  $E = pc$ .

## Momento linear do fóton

- ▶ Um fóton, de qualquer radiação, com frequência  $f$  e comprimento de onda  $\lambda$  possui uma energia  $E = hf = hc/\lambda$
- ▶ Da teoria da relatividade especial, toda partícula que possui energia deve também possuir momenta linear, mesmo quando ela não apresenta massa de repouso.
- ▶ Os fótons tem massa de repouso igual a zero.
- ▶ Um fóton com energia  $E$  possui momenta linear com modulo  $E = pc$ .
- ▶ Logo, o comprimento de onda  $\lambda$  e o modulo  $p$  de seu momento linear são relacionados por  $p = E/c = hf/c = h/\lambda$ .

## Momento linear do fóton

- ▶ Um fóton, de qualquer radiação, com frequência  $f$  e comprimento de onda  $\lambda$  possui uma energia  $E = hf = hc/\lambda$
- ▶ Da teoria da relatividade especial, toda partícula que possui energia deve também possuir momenta linear, mesmo quando ela não apresenta massa de repouso.
- ▶ Os fótons tem massa de repouso igual a zero.
- ▶ Um fóton com energia  $E$  possui momenta linear com modulo  $E = pc$ .
- ▶ Logo, o comprimento de onda  $\lambda$  e o modulo  $p$  de seu momento linear são relacionados por  $p = E/c = hf/c = h/\lambda$ .
- ▶ A direção e o sentido do momento linear do fóton sao simplesmente a direção e o sentido da propagação da onda eletromagnética.

## Fótons e níveis de energia

- ▶ Esses fenômenos mostravam que a ótica clássica tinha suas limitações.

## Fótons e níveis de energia

- ▶ Esses fenômenos mostravam que a ótica clássica tinha suas limitações.
- ▶ A radiação eletromagnética, juntamente com sua natureza ondulatória, possui origem quântica com propriedades pertinentes a partículas.

## Fótons e níveis de energia

- ▶ Esses fenômenos mostravam que a ótica clássica tinha suas limitações.
- ▶ A radiação eletromagnética, juntamente com sua natureza ondulatória, possui origem quântica com propriedades pertinentes a partículas.
- ▶ A energia associada as OE é sempre emitida ou absorvida em pacotes chamados de fótons ou quanta, com  $E = hf$ .

## Fótons e níveis de energia

- ▶ Esses fenômenos mostravam que a ótica clássica tinha suas limitações.
- ▶ A radiação eletromagnética, juntamente com sua natureza ondulatória, possui origem quântica com propriedades pertinentes a partículas.
- ▶ A energia associada as OE é sempre emitida ou absorvida em pacotes chamados de fótons ou quanta, com  $E = hf$ .
- ▶ A origem do espectro de linhas, pode ser entendida a partir de dois conceitos básicos:

## Fótons e níveis de energia

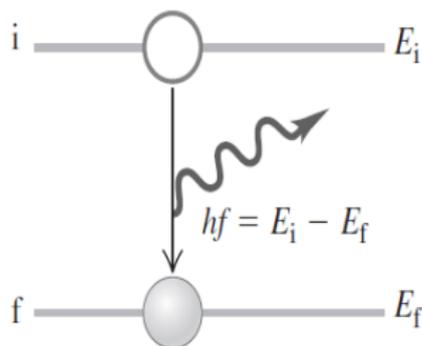
- ▶ Esses fenômenos mostravam que a ótica clássica tinha suas limitações.
- ▶ A radiação eletromagnética, juntamente com sua natureza ondulatória, possui origem quântica com propriedades pertinentes a partículas.
- ▶ A energia associada as OE e sempre emitida ou absorvida em pacotes chamados de fótons ou quanta, com  $E = hf$ .
- ▶ A origem do espectro de linhas, pode ser entendida a partir de dois conceitos básicos:
- ▶ O conceito de fóton e o de níveis de energia de um átomo.

## Fótons e níveis de energia

- ▶ Esses fenômenos mostravam que a ótica clássica tinha suas limitações.
- ▶ A radiação eletromagnética, juntamente com sua natureza ondulatória, possui origem quântica com propriedades pertinentes a partículas.
- ▶ A energia associada as OE e sempre emitida ou absorvida em pacotes chamados de fótons ou quanta, com  $E = hf$ .
- ▶ A origem do espectro de linhas, pode ser entendida a partir de dois conceitos básicos:
- ▶ O conceito de fóton e o de níveis de energia de um átomo.
- ▶ Esses conceitos foram combinados pelo físico Niels Bohr em 1913.

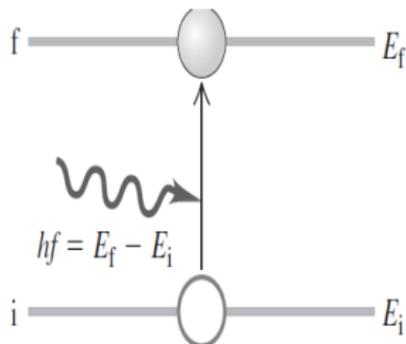
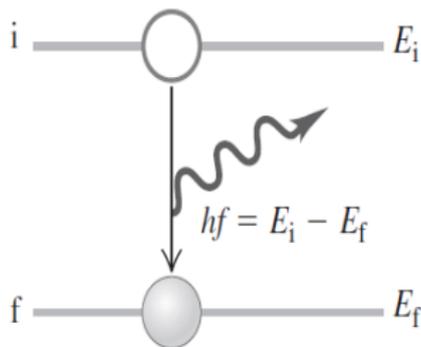
## Fótons e níveis de energia

- ▶ Esses conceitos foram combinados pelo físico Niels Bohr em 1913.
- ▶ Um átomo pode fazer uma transição de um nível de energia inicial para outro mais baixo emitindo um fóton com energia igual à diferença de energia entre os níveis. ( $E_i - E_f = hf = \frac{hc}{\lambda}$ )



## Fótons e níveis de energia

- ▶ Esses conceitos foram combinados pelo físico Niels Bohr em 1913.
- ▶ Um átomo pode fazer uma transição de um nível de energia inicial para outro mais baixo emitindo um fóton com energia igual à diferença de energia entre os níveis. ( $E_i - E_f = hf = \frac{hc}{\lambda}$ )
- ▶ De forma análoga, um átomo pode fazer uma transição de um nível de energia inicial para outro mais alto absorvendo um fóton com energia igual à diferença de energia entre os níveis. ( $E_f - E_i = hf = \frac{hc}{\lambda}$ )



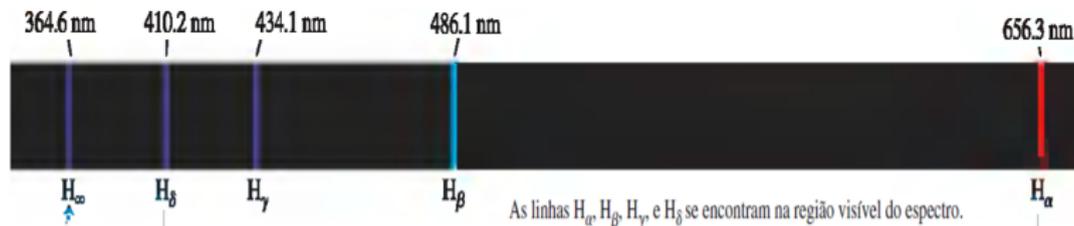
## O espectro do átomo de hidrogênio

- ▶ Por volta de 1913, o espectro do átomo de hidrogênio já havia sido estudado exaustivamente.

## Espectro Atômico de Linhas e Níveis de Energia

## O espectro do átomo de hidrogênio

- ▶ Por volta de 1913, o espectro do átomo de hidrogênio já havia sido estudado exaustivamente.
- ▶ Em um tubo de descarga elétrica, o hidrogênio atômico emite uma serie de linhas.



As linhas H<sub>α</sub>, H<sub>β</sub>, H<sub>γ</sub>, e H<sub>δ</sub> se encontram na região visível do espectro.

Todas as linhas da série de Balmer além de H<sub>δ</sub> se encontram na região ultravioleta do espectro.

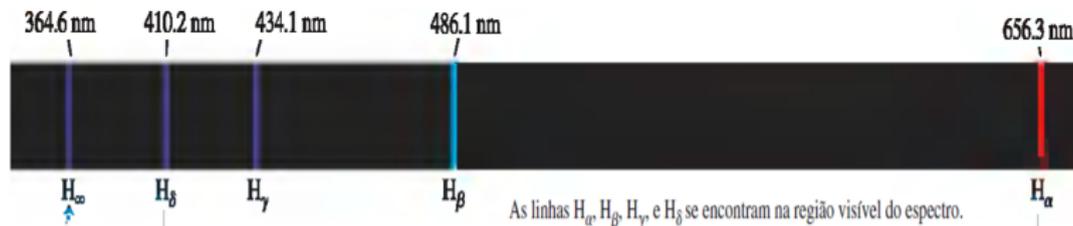
## Espectro Atômico de Linhas e Níveis de Energia

## O espectro do átomo de hidrogênio

- ▶ Por volta de 1913, o espectro do átomo de hidrogênio já havia sido estudado exaustivamente.
- ▶ Em um tubo de descarga elétrica, o hidrogênio atômico emite uma série de linhas.
- ▶ Em 1885, Johann Balmer obteve uma expressão para  $\lambda$ 's dessas linhas, **Série de Balmer**.
- ▶  $R = 1,097 \times 10^7 m^{-1}$ , **Const. de Rydberg**

## Série de Balmer

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$



Todas as linhas da série de Balmer além de  $H_\delta$  se encontram na região ultravioleta do espectro.



## O espectro do átomo de hidrogênio

- ▶ Por volta de 1913, o espectro do átomo de hidrogênio já havia sido estudado exaustivamente.
- ▶ Em um tubo de descarga elétrica, o hidrogênio atômico emite uma série de linhas.
- ▶ Em 1885, Johann Balmer obteve uma expressão para  $\lambda$ 's dessas linhas, **Série de Balmer**.
- ▶  $R = 1,097 \times 10^7 m^{-1}$ , **Const. de Rydberg**
- ▶ A série de Balmer se relaciona com a hipótese de Bohr sobre os níveis de energia.

## Série de Balmer

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$E = \frac{hc}{\lambda} = hcR \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{hcR}{2^2} - \frac{hcR}{n^2}$$

- ▶ As energias dos níveis são negativas, pois  $U(r_{en} = \infty) = 0$ .

## O espectro do átomo de hidrogênio

- ▶ Por volta de 1913, o espectro do átomo de hidrogênio já havia sido estudado exaustivamente.
- ▶ Em um tubo de descarga elétrica, o hidrogênio atômico emite uma série de linhas.
- ▶ Em 1885, Johann Balmer obteve uma expressão para  $\lambda$ 's dessas linhas, **Série de Balmer**.
- ▶  $R = 1,097 \times 10^7 m^{-1}$ , **Const. de Rydberg**
- ▶ A série de Balmer se relaciona com a hipótese de Bohr sobre os níveis de energia.

## Série de Balmer

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$E = \frac{hc}{\lambda} = hcR \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{hcR}{2^2} - \frac{hcR}{n^2}$$

- ▶ As energias dos níveis são negativas, pois  $U(r_{en} = \infty) = 0$ .
- ▶ A série de Balmer sugere que o átomo H possui uma série de **níveis de energia**,

$$E_n = -\frac{hcR}{n^2}, \quad (n = 1, 2, 3, 4, \dots)$$

## O espectro do átomo de hidrogênio

- ▶ Por volta de 1913, o espectro do átomo de hidrogênio já havia sido estudado exaustivamente.
- ▶ Em um tubo de descarga elétrica, o hidrogênio atômico emite uma série de linhas.
- ▶ Em 1885, Johann Balmer obteve uma expressão para  $\lambda$ 's dessas linhas, **Série de Balmer**.
- ▶  $R = 1,097 \times 10^7 m^{-1}$ , **Const. de Rydberg**
- ▶ A série de Balmer se relaciona com a hipótese de Bohr sobre os níveis de energia.

## Série de Balmer

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

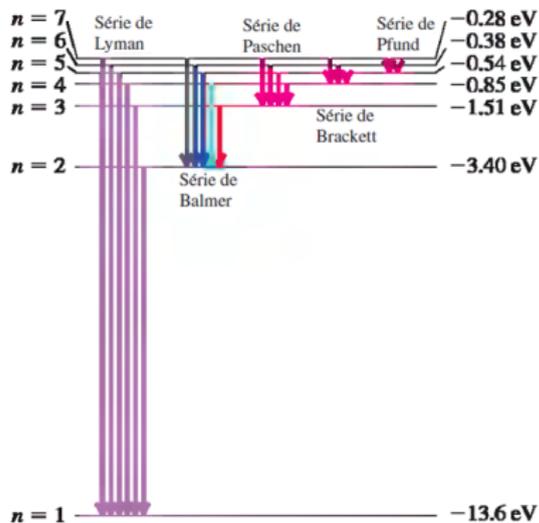
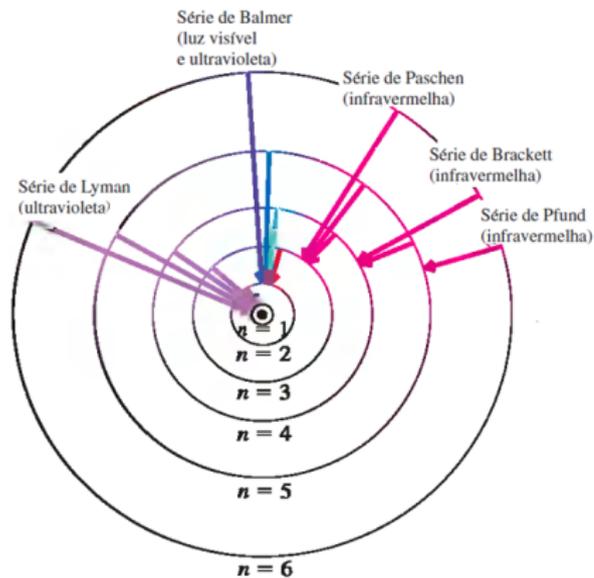
$$E = \frac{hc}{\lambda} = hcR \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{hcR}{2^2} - \frac{hcR}{n^2}$$

- ▶ As energias dos níveis são negativas, pois  $U(r_{en} = \infty) = 0$ .
- ▶ A série de Balmer sugere que o átomo H possui uma série de **níveis de energia**,

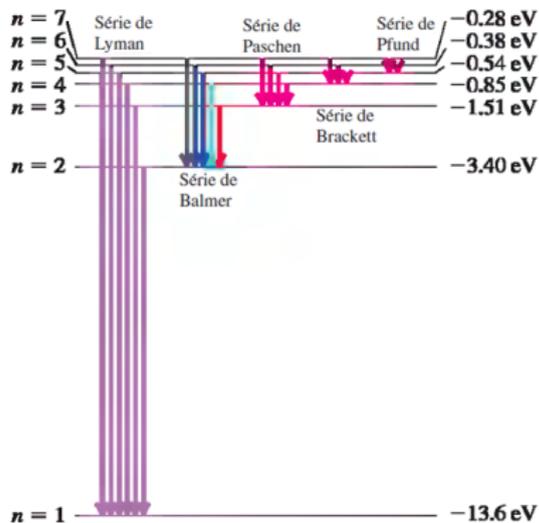
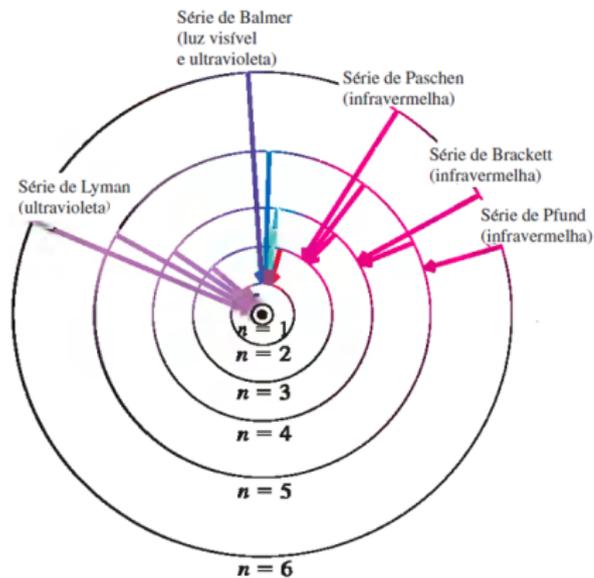
$$E_n = -\frac{hcR}{n^2}, \quad (n = 1, 2, 3, 4, \dots)$$

$$E_n = -13.6\text{eV}, -3.4\text{eV}, -1.51\text{eV}, -0.85\text{eV}$$

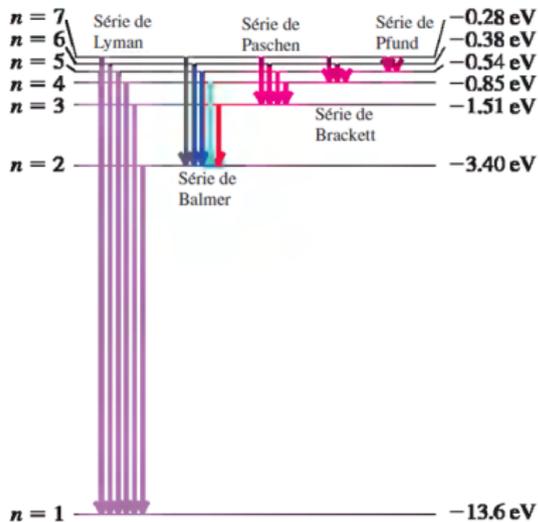
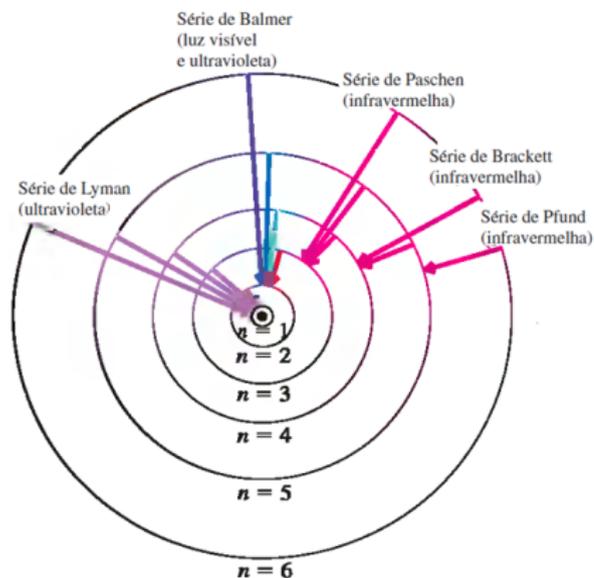
# Espectro Atômico de Linhas e Níveis de Energia



# Espectro Atômico de Linhas e Níveis de Energia



# Espectro Atômico de Linhas e Níveis de Energia



Série de Lyman

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (n = 2, 3, 4, \dots)$$

Série de Paschen

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (n = 4, 5, 6, \dots)$$

Série de Brackett

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (n = 5, 6, 7, \dots)$$

Série de Pfund

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (n = 6, 7, 8, \dots)$$

## O Modelo de Bohr

- ▶ No mesmo ano que estabeleceu a relação  $E_f - E_i = hc/\lambda$ , também propôs um modelo para o átomo H.

## O Modelo de Bohr

- ▶ No mesmo ano que estabeleceu a relação  $E_f - E_i = hc/\lambda$ , também propôs um modelo para o átomo H.
- ▶ O que poderia manter um elétron com  $r \sim 10^{-10}m$  muito maior que o diâmetro do núcleo ( $\sim 10^{-14}m$ ), apesar da mútua atração eletrostática?
- ▶ Rutherford sugeriu que o elétron deveria descrever uma órbita circular em torno do núcleo, como um planeta em torno do Sol.

## O Modelo de Bohr

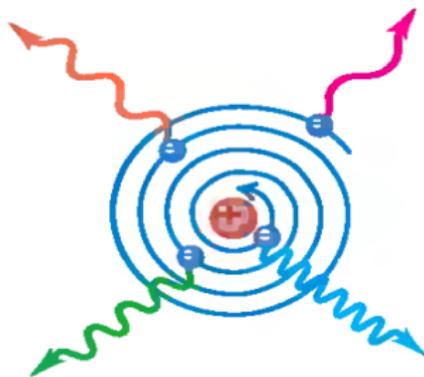
- ▶ No mesmo ano que estabeleceu a relação  $E_f - E_i = hc/\lambda$ , também propôs um modelo para o átomo H.
- ▶ O que poderia manter um elétron com  $r \sim 10^{-10}m$  muito maior que o diâmetro do núcleo ( $\sim 10^{-14}m$ ), apesar da mutua atração eletrostática?
- ▶ Rutherford sugeriu que o elétron deveria descrever uma órbita circular em torno do núcleo, como um planeta em torno do Sol.
- ▶ Da teoria eletromagnética clássica, qualquer carga elétrica acelerada irradia ondas eletromagnéticas.

## O Modelo de Bohr

- ▶ No mesmo ano que estabeleceu a relação  $E_f - E_i = hc/\lambda$ , também propôs um modelo para o átomo H.
- ▶ O que poderia manter um elétron com  $r \sim 10^{-10}m$  muito maior que o diâmetro do núcleo ( $\sim 10^{-14}m$ ), apesar da mútua atração eletrostática?
- ▶ Rutherford sugeriu que o elétron deveria descrever uma órbita circular em torno do núcleo, como um planeta em torno do Sol.
- ▶ Da teoria eletromagnética clássica, qualquer carga elétrica acelerada irradia ondas eletromagnéticas.
- ▶ A energia de um elétron descrevendo uma órbita deveria diminuir continuamente.

## O Modelo de Bohr

- ▶ No mesmo ano que estabeleceu a relação  $E_f - E_i = hc/\lambda$ , também propôs um modelo para o átomo H.
- ▶ O que poderia manter um elétron com  $r \sim 10^{-10}m$  muito maior que o diâmetro do núcleo ( $\sim 10^{-14}m$ ), apesar da mútua atração eletrostática?
- ▶ Rutherford sugeriu que o elétron deveria descrever uma órbita circular em torno do núcleo, como um planeta em torno do Sol.
- ▶ Da teoria eletromagnética clássica, qualquer carga elétrica acelerada irradia ondas eletromagnéticas.
- ▶ A energia de um elétron descrevendo uma órbita deveria diminuir continuamente.
- ▶ O raio de sua órbita deveria tornar-se cada vez menor, descrevendo uma trajetória espiral até cair no núcleo.









## Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.

## Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.

## Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.
- ▶ O átomo só irradia energia ao fazer uma transição de uma órbita para outra.

## Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.
- ▶ O átomo só irradia energia ao fazer uma transição de uma órbita para outra.
- ▶ A energia é irradiada na forma de um fóton com energia e frequência dado por:  
$$E_f = hf = E_i - E_f.$$

## Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.
- ▶ O átomo só irradia energia ao fazer uma transição de uma órbita para outra.
- ▶ A energia é irradiada na forma de um fóton com energia e frequência dado por:  
$$E_f = hf = E_i - E_f.$$
- ▶ Bohr verificou que o módulo do momento angular do elétron é quantizado.

## Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.
- ▶ O átomo só irradia energia ao fazer uma transição de uma órbita para outra.
- ▶ A energia é irradiada na forma de um fóton com energia e frequência dado por:  
 $E_f = hf = E_i - E_f$ .
- ▶ Bohr verificou que o módulo do momento angular do elétron é quantizado.
- ▶ O momento angular do elétron deve ser um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$ .

$$L_n = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$



## └ O Modelo de Bohr

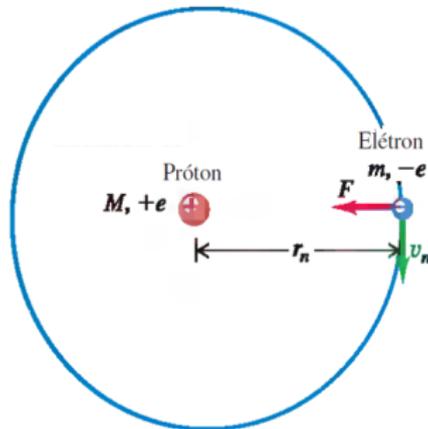
### Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.
- ▶ O átomo só irradia energia ao fazer uma transição de uma órbita para outra.
- ▶ A energia é irradiada na forma de um fóton com energia e frequência dado por:  
 $E_f = hf = E_i - E_f$ .
- ▶ Bohr verificou que o módulo do momento angular do elétron é quantizado.
- ▶ O momento angular do elétron deve ser um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$ .

$$L_n = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2$$



## Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.
- ▶ O átomo só irradia energia ao fazer uma transição de uma órbita para outra.
- ▶ A energia é irradiada na forma de um fóton com energia e frequência dado por:  
 $E_f = hf = E_i - E_f$ .
- ▶ Bohr verificou que o módulo do momento angular do elétron é quantizado.
- ▶ O momento angular do elétron deve ser um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$ .

$$L_n = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2$$

$$a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$$

## Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.
- ▶ O átomo só irradia energia ao fazer uma transição de uma órbita para outra.
- ▶ A energia é irradiada na forma de um fóton com energia e frequência dado por:  
 $E_f = hf = E_i - E_f$ .
- ▶ Bohr verificou que o módulo do momento angular do elétron é quantizado.
- ▶ O momento angular do elétron deve ser um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$ .

$$L_n = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2$$

$$a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$$

$$r_n = a_0 n^2$$

## Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.
- ▶ O átomo só irradia energia ao fazer uma transição de uma órbita para outra.
- ▶ A energia é irradiada na forma de um fóton com energia e frequência dado por:  
 $E_f = hf = E_i - E_f$ .
- ▶ Bohr verificou que o módulo do momento angular do elétron é quantizado.
- ▶ O momento angular do elétron deve ser um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$ .

$$L_n = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2$$

$$a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$$

$$r_n = a_0 n^2$$

$$v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n}$$

## Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.
- ▶ O átomo só irradia energia ao fazer uma transição de uma órbita para outra.
- ▶ A energia é irradiada na forma de um fóton com energia e frequência dado por:  
 $E_f = hf = E_i - E_f$ .
- ▶ Bohr verificou que o módulo do momento angular do elétron é quantizado.
- ▶ O momento angular do elétron deve ser um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$ .

$$L_n = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2$$

$$a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$$

$$r_n = a_0 n^2$$

$$v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n}$$

$$K_n = \frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

## ↳ O Modelo de Bohr

### Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.
- ▶ O átomo só irradia energia ao fazer uma transição de uma órbita para outra.
- ▶ A energia é irradiada na forma de um fóton com energia e frequência dado por:  
 $E_f = hf = E_i - E_f$ .
- ▶ Bohr verificou que o módulo do momento angular do elétron é quantizado.
- ▶ O momento angular do elétron deve ser um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$ .

$$L_n = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2$$

$$a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$$

$$r_n = a_0 n^2$$

$$v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n}$$

$$K_n = \frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

$$U_n = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_n} = -\frac{m_e e^4}{4\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

## Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.
- ▶ O átomo só irradia energia ao fazer uma transição de uma órbita para outra.
- ▶ A energia é irradiada na forma de um fóton com energia e frequência dado por:  
 $E_f = hf = E_i - E_f$ .
- ▶ Bohr verificou que o módulo do momento angular do elétron é quantizado.
- ▶ O momento angular do elétron deve ser um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$ .

$$L_n = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2$$

$$a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$$

$$r_n = a_0 n^2$$

$$v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n}$$

$$K_n = \frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

$$U_n = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_n} = -\frac{m_e e^4}{4\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

$$E_n = K_n + U_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

## ↳ O Modelo de Bohr

### Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.
- ▶ O átomo só irradia energia ao fazer uma transição de uma órbita para outra.
- ▶ A energia é irradiada na forma de um fóton com energia e frequência dado por:  
 $E_f = hf = E_i - E_f$ .
- ▶ Bohr verificou que o módulo do momento angular do elétron é quantizado.
- ▶ O momento angular do elétron deve ser um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$ .

$$E_n = -\frac{hcR}{n^2} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}$$

$$L_n = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2$$

$$a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$$

$$r_n = a_0 n^2$$

$$v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n}$$

$$K_n = \frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

$$U_n = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_n} = -\frac{m_e e^4}{4\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

$$E_n = K_n + U_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

## ↳ O Modelo de Bohr

### Órbitas estacionárias

- ▶ Um elétron em um átomo pode circular em torno do núcleo descrevendo órbitas estacionárias, **sem emitir nenhuma radiação**.
- ▶ Existe uma energia definida associada a cada órbita estacionária.
- ▶ O átomo só irradia energia ao fazer uma transição de uma órbita para outra.
- ▶ A energia é irradiada na forma de um fóton com energia e frequência dado por:  
 $E_f = hf = E_i - E_f$ .
- ▶ Bohr verificou que o módulo do momento angular do elétron é quantizado.
- ▶ O momento angular do elétron deve ser um múltiplo inteiro de  $h/2\pi$ .

$$E_n = -\frac{hcR}{n^2} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}$$

$$hcR = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \Rightarrow R = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c}$$

$$L_n = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2$$

$$a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$$

$$r_n = a_0 n^2$$

$$v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n}$$

$$K_n = \frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

$$U_n = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_n} = -\frac{m_e e^4}{4\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

$$E_n = K_n + U_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

## Movimento do núcleo e massa reduzida de um átomo

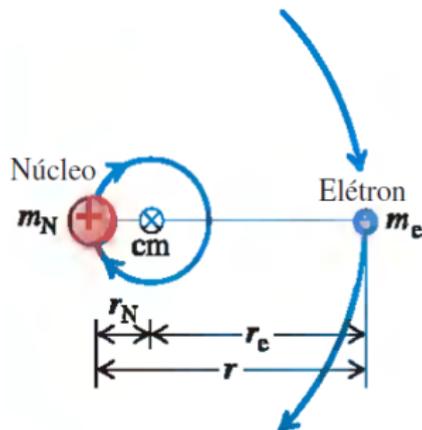
- ▶ A constante de Rydberg e da energia dos níveis no modelo de Bohr apresentam erro  $\sim 0.1\%$  .

## Movimento do núcleo e massa reduzida de um átomo

- ▶ A constante de Rydberg e da energia dos níveis no modelo de Bohr apresentam erro  $\sim 0.1\%$ .
- ▶ A concordância seria maior se não tivéssemos considerado o núcleo em repouso.

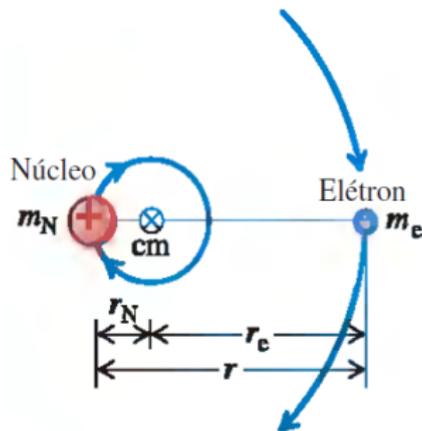
### Movimento do núcleo e massa reduzida de um átomo

- ▶ A constante de Rydberg e da energia dos níveis no modelo de Bohr apresentam erro  $\sim 0.1\%$ .
- ▶ A concordância seria maior se não tivéssemos considerado o núcleo em repouso.
- ▶ O próton descreve juntamente com o elétron um movimento circular em torno do centro de massa do sistema.



## Movimento do núcleo e massa reduzida de um átomo

- ▶ A constante de Rydberg e da energia dos níveis no modelo de Bohr apresentam erro  $\sim 0.1\%$ .
- ▶ A concordância seria maior se não tivéssemos considerado o núcleo em repouso.
- ▶ O próton descreve juntamente com o elétron um movimento circular em torno do centro de massa do sistema.
- ▶ Usando as equações do modelo de Bohr, trocando  $m_e \rightarrow m_r$  (**massa reduzida**), temos uma melhor concordância.

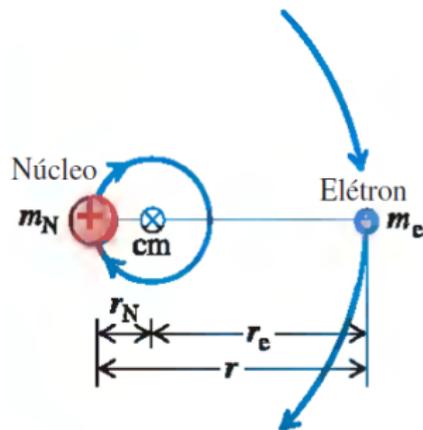




## └ O Modelo de Bohr

### Movimento do núcleo e massa reduzida de um átomo

- ▶ A constante de Rydberg e da energia dos níveis no modelo de Bohr apresentam erro  $\sim 0.1\%$ .
- ▶ A concordância seria maior se não tivéssemos considerado o núcleo em repouso.
- ▶ O próton descreve juntamente com o elétron um movimento circular em torno do centro de massa do sistema.
- ▶ Usando as equações do modelo de Bohr, trocando  $m_e \rightarrow m_r$  (**massa reduzida**), temos uma melhor concordância.



$$m_r = \frac{m_p m_e}{m_p + m_e}$$

$$m_r = \frac{1836,2 m_e m_e}{1836,2 m_e + m_e} = 0,99946 m_e$$

## Átomos semelhantes ao átomo de hidrogênio

- ▶ O modelo de Bohr pode ser estendido para outros átomos com um único elétron.

## Átomos semelhantes ao átomo de hidrogênio

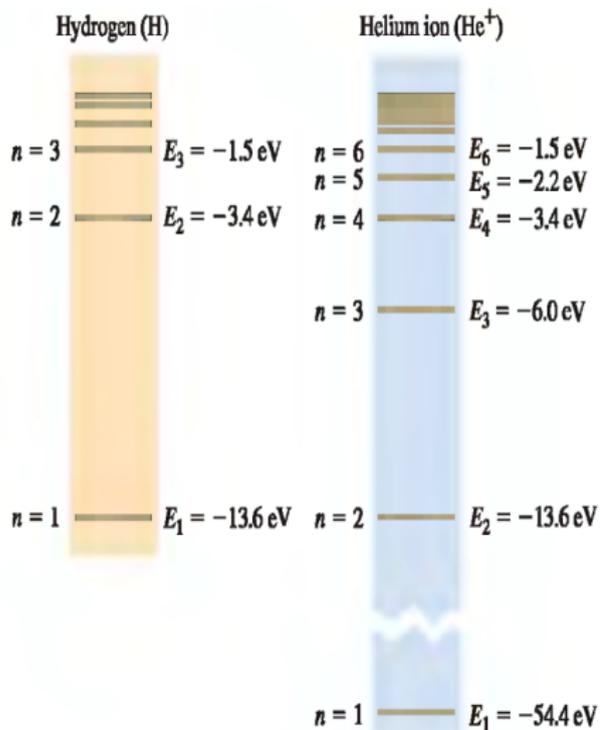
- ▶ O modelo de Bohr pode ser estendido para outros átomos com um único elétron.
- ▶ Ex.: o átomo de hélio ionizado ( $He^+$ ), o Lítio duplamente ionizado ( $Li^{2+}$ ),...

## O Modelo de Bohr

### Átomos semelhantes ao átomo de hidrogênio

- ▶ O modelo de Bohr pode ser estendido para outros átomos com um único elétron.
- ▶ Ex.: o átomo de hélio ionizado ( $He^+$ ), o Lítio duplamente ionizado ( $Li^{2+}$ ),...
- ▶ Nesses átomos, a carga do núcleo muda de  $Q = +e$  para  $Q = +Ze$ .

(1)

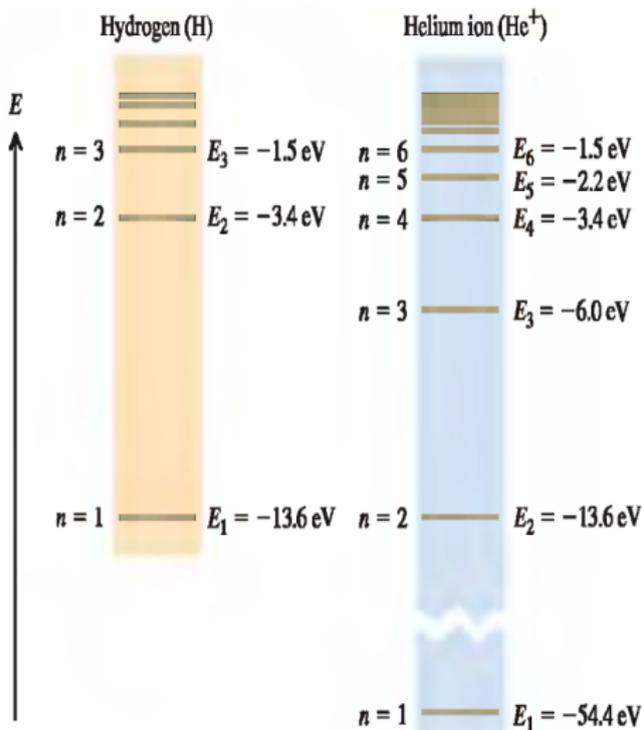


## O Modelo de Bohr

## Átomos semelhantes ao átomo de hidrogênio

- ▶ O modelo de Bohr pode ser estendido para outros átomos com um único elétron.
- ▶ Ex.: o átomo de hélio ionizado ( $He^+$ ), o Lítio duplamente ionizado ( $Li^{2+}$ ),...
- ▶ Nesses átomos, a carga do núcleo muda de  $Q = +e$  para  $Q = +Ze$ .

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} \frac{n^2}{Z}$$



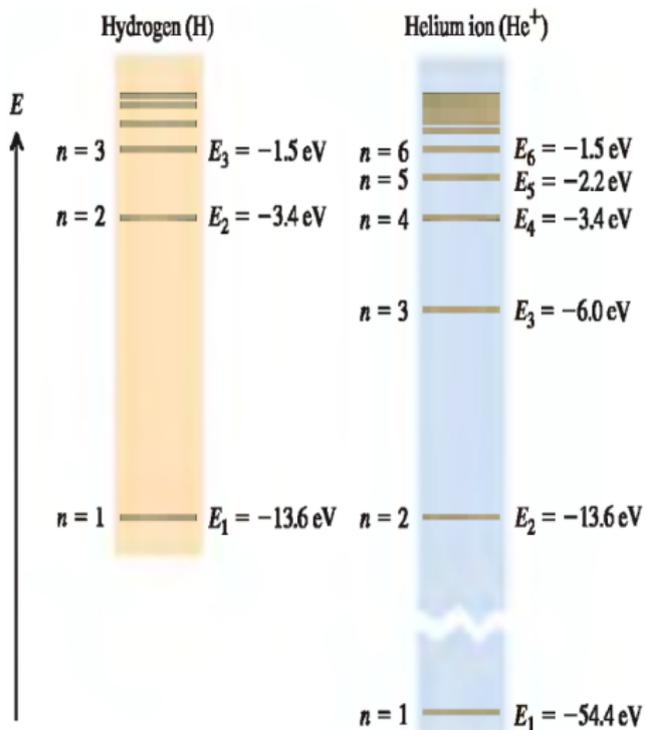
## O Modelo de Bohr

## Átomos semelhantes ao átomo de hidrogênio

- ▶ O modelo de Bohr pode ser estendido para outros átomos com um único elétron.
- ▶ Ex.: o átomo de hélio ionizado ( $He^+$ ), o Lítio duplamente ionizado ( $Li^{2+}$ ),...
- ▶ Nesses átomos, a carga do núcleo muda de  $Q = +e$  para  $Q = +Ze$ .

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} \frac{n^2}{Z}$$

$$v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n} Z$$



## O Modelo de Bohr

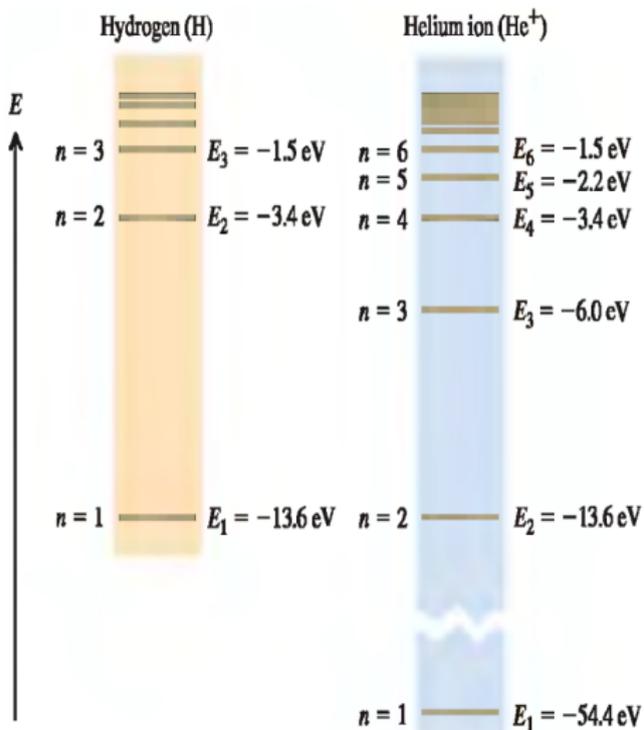
## Átomos semelhantes ao átomo de hidrogênio

- ▶ O modelo de Bohr pode ser estendido para outros átomos com um único elétron.
- ▶ Ex.: o átomo de hélio ionizado ( $He^+$ ), o Lítio duplamente ionizado ( $Li^{2+}$ ),...
- ▶ Nesses átomos, a carga do núcleo muda de  $Q = +e$  para  $Q = +Ze$ .

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} \frac{n^2}{Z}$$

$$v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n} Z$$

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} Z^2$$



- ▶ É um feixe de luz **altamente coerente** e quase **totalmente monocromático** em virtude da **emissão cooperativa** de diversos átomos.

- ▶ É um feixe de luz **altamente coerente** e quase **totalmente monocromático** em virtude da **emissão cooperativa** de diversos átomos.
- ▶ A palavra **laser** deriva de **light amplification by stimulated emission of radiation**.

## ↳ O Laser

- ▶ É um feixe de luz **altamente coerente** e quase **totalmente monocromático** em virtude da **emissão cooperativa** de diversos átomos.
- ▶ A palavra **laser** deriva de **light amplification by stimulated emission of radiation**.

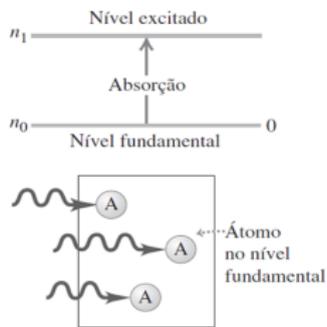
### Emissão espontânea

- ▶ Se um átomo possui um nível de energia acima do nível fundamental, ele pode absorver um fóton.

- ▶ É um feixe de luz **altamente coerente** e quase **totalmente monocromático** em virtude da **emissão cooperativa** de diversos átomos.
- ▶ A palavra **laser** deriva de **light amplification by stimulated emission of radiation**.

### Emissão espontânea

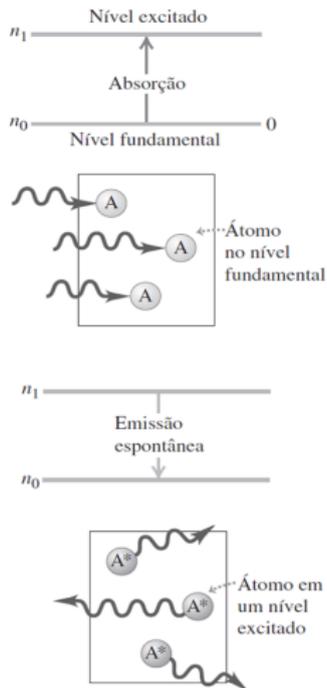
- ▶ Se um átomo possui um nível de energia acima do nível fundamental, ele pode absorver um fóton.
- ▶ Considere um gás em um recipiente transparente com  $N$  átomos.



- ▶ É um feixe de luz **altamente coerente** e quase **totalmente monocromático** em virtude da **emissão cooperativa** de diversos átomos.
- ▶ A palavra **laser** deriva de **light amplification by stimulated emission of radiation**.

### Emissão espontânea

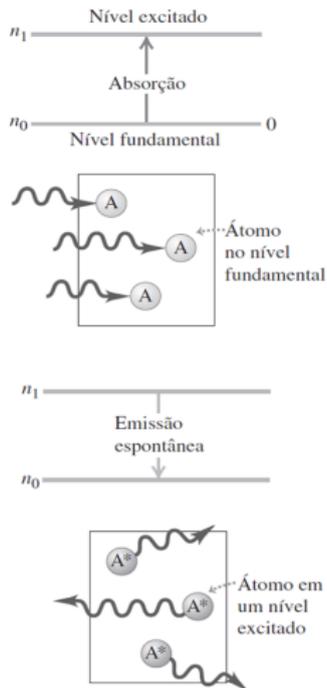
- ▶ Se um átomo possui um nível de energia acima do nível fundamental, ele pode absorver um fóton.
- ▶ Considere um gás em um recipiente transparente com  $N$  átomos.
- ▶ Cada um dos átomos no estado  $A$  absorve um fóton, indo para um nível excitado  $A^*$ .



- ▶ É um feixe de luz **altamente coerente** e quase **totalmente monocromático** em virtude da **emissão cooperativa** de diversos átomos.
- ▶ A palavra **laser** deriva de **light amplification by stimulated emission of radiation**.

### Emissão espontânea

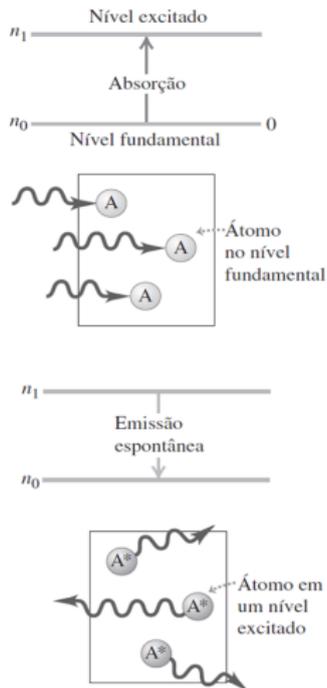
- ▶ Se um átomo possui um nível de energia acima do nível fundamental, ele pode absorver um fóton.
- ▶ Considere um gás em um recipiente transparente com  $N$  átomos.
- ▶ Cada um dos átomos no estado  $A$  absorve um fóton, indo para um nível excitado  $A^*$ .
- ▶ Algum tempo depois, cada átomo excitado retorna ao nível fundamental emitindo um fóton com a mesma freqüência do fóton inicial.



- ▶ É um feixe de luz **altamente coerente** e quase **totalmente monocromático** em virtude da **emissão cooperativa** de diversos átomos.
- ▶ A palavra **laser** deriva de **light amplification by stimulated emission of radiation**.

### Emissão espontânea

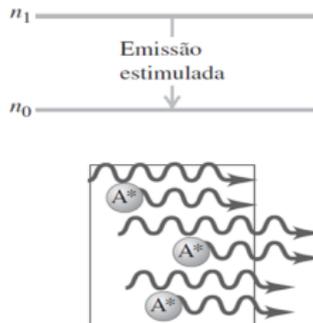
- ▶ Se um átomo possui um nível de energia acima do nível fundamental, ele pode absorver um fóton.
- ▶ Considere um gás em um recipiente transparente com  $N$  átomos.
- ▶ Cada um dos átomos no estado  $A$  absorve um fóton, indo para um nível excitado  $A^*$ .
- ▶ Algum tempo depois, cada átomo excitado retorna ao nível fundamental emitindo um fóton com a mesma freqüência do fóton inicial.
- ▶ Esse processo é chamado de emissão espontânea; as direções e as fases dos fótons emitidos são aleatórias



- ▶ É um feixe de luz **altamente coerente** e quase **totalmente monocromático** em virtude da **emissão cooperativa** de diversos átomos.
- ▶ A palavra **laser** deriva de **light amplification by stimulated emission of radiation**.

### Emissão estimulada

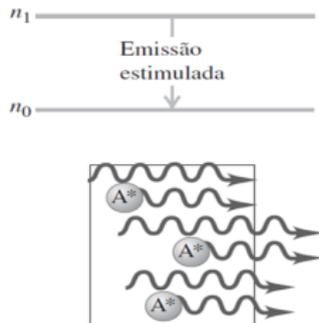
- ▶ Cada fóton incidente encontra um átomo previamente excitado.



- ▶ É um feixe de luz **altamente coerente** e quase **totalmente monocromático** em virtude da **emissão cooperativa** de diversos átomos.
- ▶ A palavra **laser** deriva de **light amplification by stimulated emission of radiation**.

### Emissão estimulada

- ▶ Cada fóton incidente encontra um átomo previamente excitado.
- ▶ Uma efeito de ressonância induz cada átomo a emitir um segundo fóton.



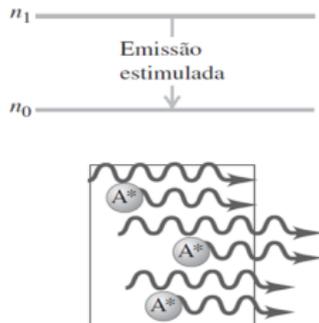




- ▶ É um feixe de luz **altamente coerente** e quase **totalmente monocromático** em virtude da **emissão cooperativa** de diversos átomos.
- ▶ A palavra **laser** deriva de **light amplification by stimulated emission of radiation**.

### Emissão estimulada

- ▶ Cada fóton incidente encontra um átomo previamente excitado.
- ▶ Uma efeito de ressonância induz cada átomo a emitir um segundo fóton.
- ▶ O fóton emitido possui a mesma direção, frequência, fase e polarização do fóton incidente, que não se altera no processo.
- ▶ Para cada átomo existe um fóton antes do processo e dois fótons depois do processo; daí deriva a expressão amplificação da luz.
- ▶ Como os dois fótons possuem a mesma fase, eles emergem simultaneamente como radiação coerente.



## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Precisamos saber como os átomos se comportam em cada um dos diferentes níveis de energia.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Precisamos saber como os átomos se comportam em cada um dos diferentes níveis de energia.
- ▶ Qual a diferença entre os termos nível de energia e estado de energia?

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Precisamos saber como os átomos se comportam em cada um dos diferentes níveis de energia.
- ▶ Qual a diferença entre os termos nível de energia e estado de energia?
- ▶ Um sistema pode ter diversas maneiras de atingir um dado nível de energia.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Precisamos saber como os átomos se comportam em cada um dos diferentes níveis de energia.
- ▶ Qual a diferença entre os termos nível de energia e estado de energia?
- ▶ Um sistema pode ter diversas maneiras de atingir um dado nível de energia.
- ▶ Cada maneira diferente caracteriza um estado diferente.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Precisamos saber como os átomos se comportam em cada um dos diferentes níveis de energia.
- ▶ Qual a diferença entre os termos nível de energia e estado de energia?
- ▶ Um sistema pode ter diversas maneiras de atingir um dado nível de energia.
- ▶ Cada maneira diferente caracteriza um estado diferente.
- ▶ No modelo de Bohr cada nível de energia possui apenas um estado.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Precisamos saber como os átomos se comportam em cada um dos diferentes níveis de energia.
- ▶ Qual a diferença entre os termos nível de energia e estado de energia?
- ▶ Um sistema pode ter diversas maneiras de atingir um dado nível de energia.
- ▶ Cada maneira diferente caracteriza um estado diferente.
- ▶ No modelo de Bohr cada nível de energia possui apenas um estado.
- ▶ Na verdade, possui 2 em  $E_1 = -13.6eV$ , 8 estados em  $E_2 = -3.4eV$  e assim por diante.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Precisamos saber como os átomos se comportam em cada um dos diferentes níveis de energia.
- ▶ Qual a diferença entre os termos nível de energia e estado de energia?
- ▶ Um sistema pode ter diversas maneiras de atingir um dado nível de energia.
- ▶ Cada maneira diferente caracteriza um estado diferente.
- ▶ No modelo de Bohr cada nível de energia possui apenas um estado.
- ▶ Na verdade, possui 2 em  $E_1 = -13.6eV$ , 8 estados em  $E_2 = -3.4eV$  e assim por diante.
- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Precisamos saber como os átomos se comportam em cada um dos diferentes níveis de energia.
- ▶ Qual a diferença entre os termos nível de energia e estado de energia?
- ▶ Um sistema pode ter diversas maneiras de atingir um dado nível de energia.
- ▶ Cada maneira diferente caracteriza um estado diferente.
- ▶ No modelo de Bohr cada nível de energia possui apenas um estado.
- ▶ Na verdade, possui 2 em  $E_1 = -13.6\text{eV}$ , 8 estados em  $E_2 = -3.4\text{eV}$  e assim por diante.
- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.
- ▶ Um gás em equilíbrio em uma temperatura  $T$ , o número de átomos no estado com energia  $E_i$  é  $n_i = Ae^{-E_i/k_bT}$ .
- ▶  $k_b$  é a constante de Boltzmann.
- ▶  $A$  é uma constante de normalização.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Precisamos saber como os átomos se comportam em cada um dos diferentes níveis de energia.
- ▶ Qual a diferença entre os termos nível de energia e estado de energia?
- ▶ Um sistema pode ter diversas maneiras de atingir um dado nível de energia.
- ▶ Cada maneira diferente caracteriza um estado diferente.
- ▶ No modelo de Bohr cada nível de energia possui apenas um estado.
- ▶ Na verdade, possui 2 em  $E_1 = -13.6\text{eV}$ , 8 estados em  $E_2 = -3.4\text{eV}$  e assim por diante.
- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.
- ▶ Um gás em equilíbrio em uma temperatura  $T$ , o número de átomos no estado com energia  $E_i$  é  $n_i = Ae^{-E_i/k_bT}$ .
- ▶  $k_b$  é a constante de Boltzmann.
- ▶  $A$  é uma constante de normalização.
- ▶ Se  $E_g$  e  $E_{ex}$  são as energias do estado fundamental e excitado, então:

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = \frac{Ae^{-E_{ex}/k_bT}}{Ae^{-E_g/k_bT}} = e^{-(E_{ex}-E_g)/k_bT}$$

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Precisamos saber como os átomos se comportam em cada um dos diferentes níveis de energia.
- ▶ Qual a diferença entre os termos nível de energia e estado de energia?
- ▶ Um sistema pode ter diversas maneiras de atingir um dado nível de energia.
- ▶ Cada maneira diferente caracteriza um estado diferente.
- ▶ No modelo de Bohr cada nível de energia possui apenas um estado.
- ▶ Na verdade, possui 2 em  $E_1 = -13.6\text{eV}$ , 8 estados em  $E_2 = -3.4\text{eV}$  e assim por diante.
- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.
- ▶ Um gás em equilíbrio em uma temperatura  $T$ , o número de átomos no estado com energia  $E_i$  é  $n_i = Ae^{-E_i/k_bT}$ .
- ▶  $k_b$  é a constante de Boltzmann.
- ▶  $A$  é uma constante de normalização.
- ▶ Se  $E_g$  e  $E_{ex}$  são as energias do estado fundamental e excitado, então:
 
$$\frac{n_{ex}}{n_g} = \frac{Ae^{-E_{ex}/k_bT}}{Ae^{-E_g/k_bT}} = e^{-(E_{ex}-E_g)/k_bT}$$

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = 0.00044$$
- ▶ Para  $T = 3000\text{K}$ , ( $\lambda_{luz} = 620\text{nm}$ )  
 $E_{ex} - E_g = 2\text{eV} = 3.2 \times 10^{-19}\text{J}$ .

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Precisamos saber como os átomos se comportam em cada um dos diferentes níveis de energia.
- ▶ Qual a diferença entre os termos nível de energia e estado de energia?
- ▶ Um sistema pode ter diversas maneiras de atingir um dado nível de energia.
- ▶ Cada maneira diferente caracteriza um estado diferente.
- ▶ No modelo de Bohr cada nível de energia possui apenas um estado.
- ▶ Na verdade, possui 2 em  $E_1 = -13.6\text{eV}$ , 8 estados em  $E_2 = -3.4\text{eV}$  e assim por diante.
- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.
- ▶ Um gás em equilíbrio em uma temperatura  $T$ , o número de átomos no estado com energia  $E_i$  é  $n_i = Ae^{-E_i/k_bT}$ .
- ▶  $k_b$  é a constante de Boltzmann.
- ▶  $A$  é uma constante de normalização.
- ▶ Se  $E_g$  e  $E_{ex}$  são as energias do estado fundamental e excitado, então:
 
$$\frac{n_{ex}}{n_g} = \frac{Ae^{-E_{ex}/k_bT}}{Ae^{-E_g/k_bT}} = e^{-(E_{ex}-E_g)/k_bT}$$

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = 0.00044$$
- ▶ Para  $T = 3000\text{K}$ , ( $\lambda_{luz} = 620\text{nm}$ )  
 $E_{ex} - E_g = 2\text{eV} = 3.2 \times 10^{-19}\text{J}$ .

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Precisamos saber como os átomos se comportam em cada um dos diferentes níveis de energia.
- ▶ Qual a diferença entre os termos nível de energia e estado de energia?
- ▶ Um sistema pode ter diversas maneiras de atingir um dado nível de energia.
- ▶ Cada maneira diferente caracteriza um estado diferente.
- ▶ No modelo de Bohr cada nível de energia possui apenas um estado.
- ▶ Na verdade, possui 2 em  $E_1 = -13.6\text{eV}$ , 8 estados em  $E_2 = -3.4\text{eV}$  e assim por diante.
- ▶ Para qualquer  $T$  razoável, não existe um número de átomos nos estados excitados suficiente para que ocorra uma emissão estimulada.
- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.
- ▶ Um gás em equilíbrio em uma temperatura  $T$ , o número de átomos no estado com energia  $E_i$  é  $n_i = Ae^{-E_i/k_bT}$ .
- ▶  $k_b$  é a constante de Boltzmann.
- ▶  $A$  é uma constante de normalização.
- ▶ Se  $E_g$  e  $E_{ex}$  são as energias do estado fundamental e excitado, então:
 
$$\frac{n_{ex}}{n_g} = \frac{Ae^{-E_{ex}/k_bT}}{Ae^{-E_g/k_bT}} = e^{-(E_{ex}-E_g)/k_bT}$$

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = 0.00044$$
- ▶ Para  $T = 3000\text{K}$ , ( $\lambda_{luz} = 620\text{nm}$ )  
 $E_{ex} - E_g = 2\text{eV} = 3.2 \times 10^{-19}\text{J}$ .

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Precisamos saber como os átomos se comportam em cada um dos diferentes níveis de energia.
- ▶ Qual a diferença entre os termos nível de energia e estado de energia?
- ▶ Um sistema pode ter diversas maneiras de atingir um dado nível de energia.
- ▶ Cada maneira diferente caracteriza um estado diferente.
- ▶ No modelo de Bohr cada nível de energia possui apenas um estado.
- ▶ Na verdade, possui 2 em  $E_1 = -13.6\text{eV}$ , 8 estados em  $E_2 = -3.4\text{eV}$  e assim por diante.
- ▶ Para qualquer  $T$  razoável, não existe um número de átomos nos estados excitados suficiente para que ocorra uma emissão estimulada.
- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.
- ▶ Um gás em equilíbrio em uma temperatura  $T$ , o número de átomos no estado com energia  $E_i$  é  $n_i = Ae^{-E_i/k_bT}$ .
- ▶  $k_b$  é a constante de Boltzmann.
- ▶  $A$  é uma constante de normalização.
- ▶ Se  $E_g$  e  $E_{ex}$  são as energias do estado fundamental e excitado, então:
 
$$\frac{n_{ex}}{n_g} = \frac{Ae^{-E_{ex}/k_bT}}{Ae^{-E_g/k_bT}} = e^{-(E_{ex}-E_g)/k_bT}$$

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = 0.00044$$
- ▶ Para  $T = 3000\text{K}$ , ( $\lambda_{luz} = 620\text{nm}$ )  
 $E_{ex} - E_g = 2\text{eV} = 3.2 \times 10^{-19}\text{J}$ .
- ▶ A absorção é muito mais provável.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Podemos tentar aumentar o  $n_{ex}$  submetendo o gás a um feixe de radiação com  $f = (E_{ex} - E_g)/h$ .
- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.
- ▶ Um gás em equilíbrio em uma temperatura  $T$ , o número de átomos no estado com energia  $E_i$  é  $n_i = Ae^{-E_i/k_bT}$ .
- ▶  $k_b$  é a constante de Boltzmann.
- ▶  $A$  é uma constante de normalização.
- ▶ Se  $E_g$  e  $E_{ex}$  são as energias do estado fundamental e excitado, então:

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = \frac{Ae^{-E_{ex}/k_bT}}{Ae^{-E_g/k_bT}} = e^{-(E_{ex}-E_g)/k_bT}$$

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = 0.00044$$

- ▶ Para  $T = 3000K$ , ( $\lambda_{luz} = 620nm$ )  
 $E_{ex} - E_g = 2eV = 3.2 \times 10^{-19} J$ .
- ▶ A absorção é muito mais provável.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Podemos tentar aumentar o  $n_{ex}$  submetendo o gás a um feixe de radiação com  $f = (E_{ex} - E_g)/h$ .
- ▶ Como  $n_{ex} \ll n_g$ , seria necessário um feixe de luz com intensidade elevada para  $n_{ex}/n_g \simeq 1$ .

- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.
- ▶ Um gás em equilíbrio em uma temperatura  $T$ , o número de átomos no estado com energia  $E_i$  é  $n_i = Ae^{-E_i/k_bT}$ .
- ▶  $k_b$  é a constante de Boltzmann.
- ▶  $A$  é uma constante de normalização.
- ▶ Se  $E_g$  e  $E_{ex}$  são as energias do estado fundamental e excitado, então:

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = \frac{Ae^{-E_{ex}/k_bT}}{Ae^{-E_g/k_bT}} = e^{-(E_{ex}-E_g)/k_bT}$$

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = 0.00044$$

- ▶ Para  $T = 3000K$ , ( $\lambda_{luz} = 620nm$ )  
 $E_{ex} - E_g = 2eV = 3.2 \times 10^{-19} J$ .
- ▶ A absorção é muito mais provável.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Podemos tentar aumentar o  $n_{ex}$  submetendo o gás a um feixe de radiação com  $f = (E_{ex} - E_g)/h$ .
- ▶ Como  $n_{ex} \ll n_g$ , seria necessário um feixe de luz com intensidade elevada para  $n_{ex}/n_g \simeq 1$ .
- ▶ A taxa que a energia é absorvida do feixe pelos  $n_g$  átomos compensaria com larga margem a taxa que a energia é adicionada ao feixe pela emissão estimulada pelos raros  $n_{ex}$  átomos.
- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.
- ▶ Um gás em equilíbrio em uma temperatura  $T$ , o número de átomos no estado com energia  $E_i$  é  $n_i = Ae^{-E_i/k_bT}$ .
- ▶  $k_b$  é a constante de Boltzmann.
- ▶  $A$  é uma constante de normalização.
- ▶ Se  $E_g$  e  $E_{ex}$  são as energias do estado fundamental e excitado, então:

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = \frac{Ae^{-E_{ex}/k_bT}}{Ae^{-E_g/k_bT}} = e^{-(E_{ex}-E_g)/k_bT}$$

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = 0.00044$$

- ▶ Para  $T = 3000K$ , ( $\lambda_{luz} = 620nm$ )  
 $E_{ex} - E_g = 2eV = 3.2 \times 10^{-19} J$ .
- ▶ A absorção é muito mais provável.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Podemos tentar aumentar o  $n_{ex}$  submetendo o gás a um feixe de radiação com  $f = (E_{ex} - E_g)/h$ .
- ▶ Como  $n_{ex} \ll n_g$ , seria necessário um feixe de luz com intensidade elevada para  $n_{ex}/n_g \simeq 1$ .
- ▶ A taxa que a energia é absorvida do feixe pelos  $n_g$  átomos compensaria com larga margem a taxa que a energia é adicionada ao feixe pela emissão estimulada pelos raros  $n_{ex}$  átomos.
- ▶ É preciso criar uma situação de não-equilíbrio, onde o  $n_{ex} \gg n_g$ .

- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.
- ▶ Um gás em equilíbrio em uma temperatura  $T$ , o número de átomos no estado com energia  $E_i$  é  $n_i = Ae^{-E_i/k_bT}$ .
- ▶  $k_b$  é a constante de Boltzmann.
- ▶  $A$  é uma constante de normalização.
- ▶ Se  $E_g$  e  $E_{ex}$  são as energias do estado fundamental e excitado, então:

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = \frac{Ae^{-E_{ex}/k_bT}}{Ae^{-E_g/k_bT}} = e^{-(E_{ex}-E_g)/k_bT}$$

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = 0.00044$$

- ▶ Para  $T = 3000K$ , ( $\lambda_{luz} = 620nm$ )  
 $E_{ex} - E_g = 2eV = 3.2 \times 10^{-19} J$ .
- ▶ A absorção é muito mais provável.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Podemos tentar aumentar o  $n_{ex}$  submetendo o gás a um feixe de radiação com  $f = (E_{ex} - E_g)/h$ .
- ▶ Como  $n_{ex} \ll n_g$ , seria necessário um feixe de luz com intensidade elevada para  $n_{ex}/n_g \simeq 1$ .
- ▶ A taxa que a energia é absorvida do feixe pelos  $n_g$  átomos compensaria com larga margem a taxa que a energia é adicionada ao feixe pela emissão estimulada pelos raros  $n_{ex}$  átomos.
- ▶ É preciso criar uma situação de não-equilíbrio, onde o  $n_{ex} \gg n_g$ .
- ▶ Essa situação é a **inversão da população**.
- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.
- ▶ Um gás em equilíbrio em uma temperatura  $T$ , o número de átomos no estado com energia  $E_i$  é  $n_i = Ae^{-E_i/k_bT}$ .
- ▶  $k_b$  é a constante de Boltzmann.
- ▶  $A$  é uma constante de normalização.
- ▶ Se  $E_g$  e  $E_{ex}$  são as energias do estado fundamental e excitado, então:

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = \frac{Ae^{-E_{ex}/k_bT}}{Ae^{-E_g/k_bT}} = e^{-(E_{ex}-E_g)/k_bT}$$

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = 0.00044$$

- ▶ Para  $T = 3000K$ , ( $\lambda_{luz} = 620nm$ )  
 $E_{ex} - E_g = 2eV = 3.2 \times 10^{-19} J$ .
- ▶ A absorção é muito mais provável.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

- ▶ Podemos tentar aumentar o  $n_{ex}$  submetendo o gás a um feixe de radiação com  $f = (E_{ex} - E_g)/h$ .
- ▶ Como  $n_{ex} \ll n_g$ , seria necessário um feixe de luz com intensidade elevada para  $n_{ex}/n_g \simeq 1$ .
- ▶ A taxa que a energia é absorvida do feixe pelos  $n_g$  átomos compensaria com larga margem a taxa que a energia é adicionada ao feixe pela emissão estimulada pelos raros  $n_{ex}$  átomos.
- ▶ É preciso criar uma situação de não-equilíbrio, onde o  $n_{ex} \gg n_g$ .
- ▶ Essa situação é a **inversão da população**.
- ▶ A taxa de energia irradiada pela emissão estimulada supera a taxa de energia absorvida.

- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.
- ▶ Um gás em equilíbrio em uma temperatura  $T$ , o número de átomos no estado com energia  $E_i$  é  $n_i = Ae^{-E_i/k_bT}$ .
- ▶  $k_b$  é a constante de Boltzmann.
- ▶  $A$  é uma constante de normalização.
- ▶ Se  $E_g$  e  $E_{ex}$  são as energias do estado fundamental e excitado, então:

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = \frac{Ae^{-E_{ex}/k_bT}}{Ae^{-E_g/k_bT}} = e^{-(E_{ex}-E_g)/k_bT}$$

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = 0.00044$$

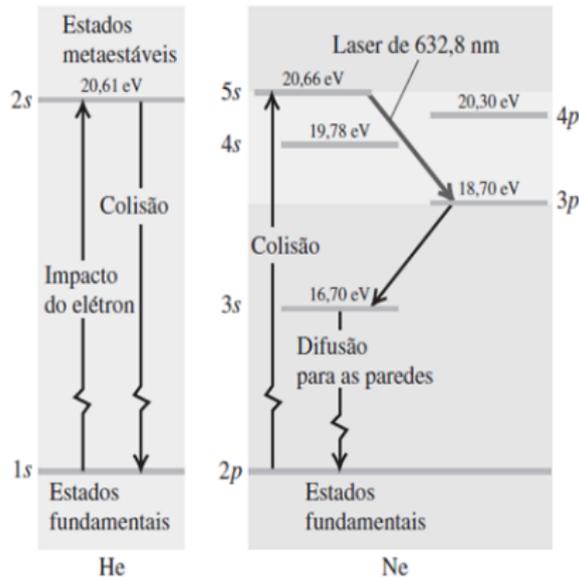
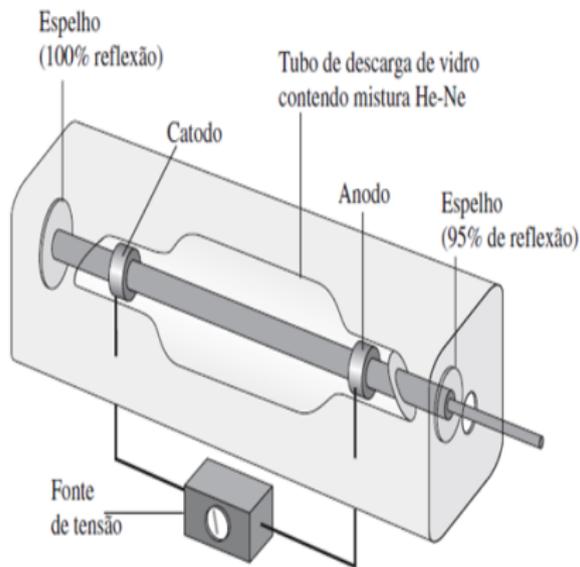
- ▶ Para  $T = 3000K$ , ( $\lambda_{luz} = 620nm$ )  
 $E_{ex} - E_g = 2eV = 3.2 \times 10^{-19} J$ .
- ▶ A absorção é muito mais provável.

## Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

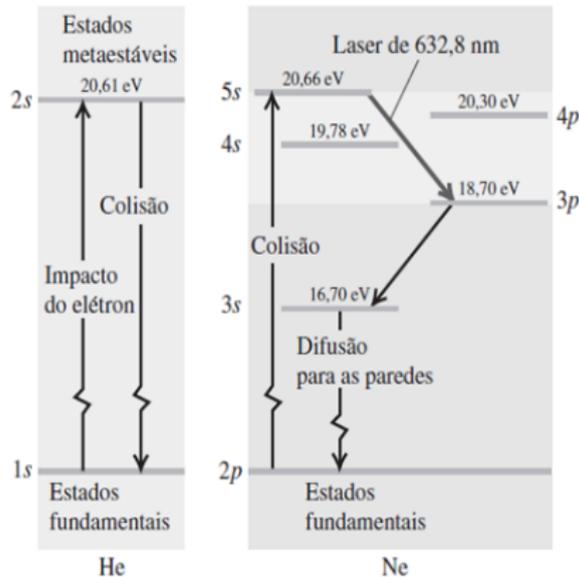
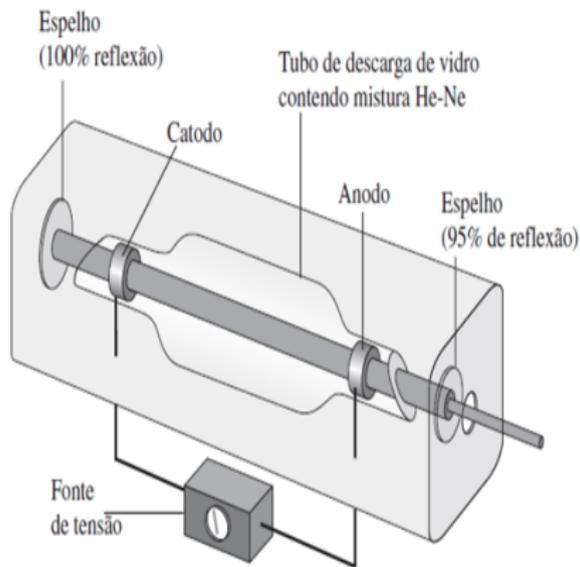
- ▶ Podemos tentar aumentar o  $n_{ex}$  submetendo o gás a um feixe de radiação com  $f = (E_{ex} - E_g)/h$ .
- ▶ Como  $n_{ex} \ll n_g$ , seria necessário um feixe de luz com intensidade elevada para  $n_{ex}/n_g \simeq 1$ .
- ▶ A taxa que a energia é absorvida do feixe pelos  $n_g$  átomos compensaria com larga margem a taxa que a energia é adicionada ao feixe pela emissão estimulada pelos raros  $n_{ex}$  átomos.
- ▶ É preciso criar uma situação de não-equilíbrio, onde o  $n_{ex} \gg n_g$ .
- ▶ Essa situação é a **inversão da população**.
- ▶ A taxa de energia irradiada pela emissão estimulada supera a taxa de energia absorvida.
- ▶ O sistema vira uma fonte de fótons com a mesma frequência, fase, polarização e direção de propagação.
- ▶ A função de distribuição de Maxwell-Boltzmann determina o número de átomos em um dado estado do gás.
- ▶ Um gás em equilíbrio em uma temperatura  $T$ , o número de átomos no estado com energia  $E_i$  é  $n_i = Ae^{-E_i/k_bT}$ .
- ▶  $k_b$  é a constante de Boltzmann.
- ▶  $A$  é uma constante de normalização.
- ▶ Se  $E_g$  e  $E_{ex}$  são as energias do estado fundamental e excitado, então:
 
$$\frac{n_{ex}}{n_g} = \frac{Ae^{-E_{ex}/k_bT}}{Ae^{-E_g/k_bT}} = e^{-(E_{ex}-E_g)/k_bT}$$

$$\frac{n_{ex}}{n_g} = 0.00044$$
- ▶ Para  $T = 3000K$ , ( $\lambda_{luz} = 620nm$ )  
 $E_{ex} - E_g = 2eV = 3.2 \times 10^{-19} J$ .
- ▶ **A absorção é muito mais provável.**

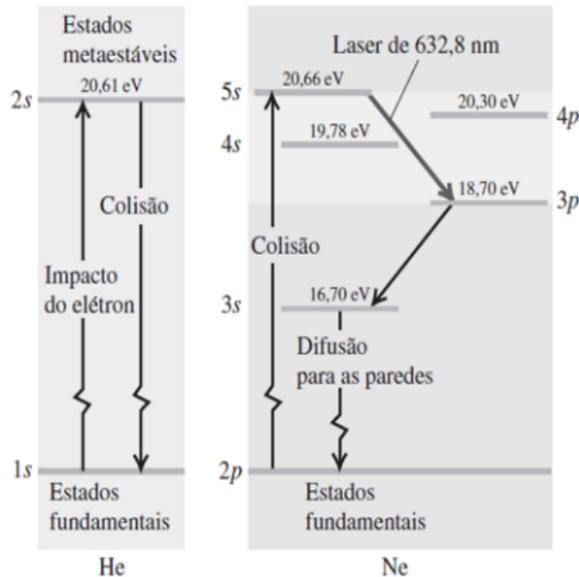
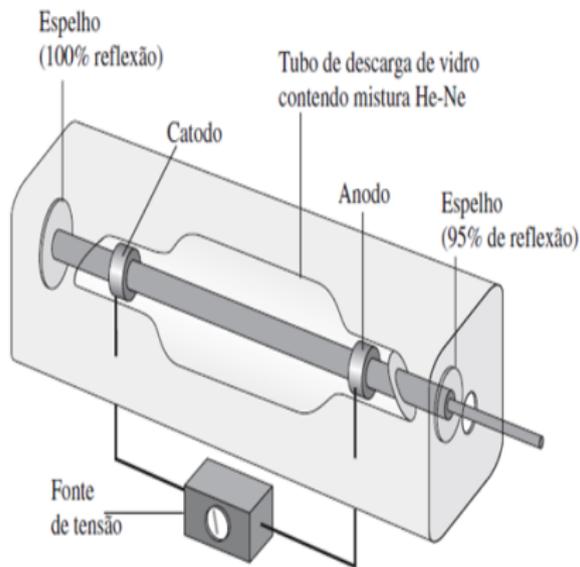
Aumentando a emissão estimulada: inversão de população



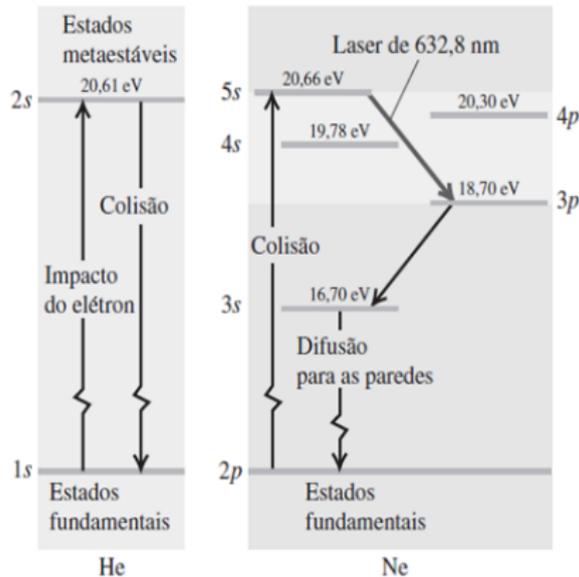
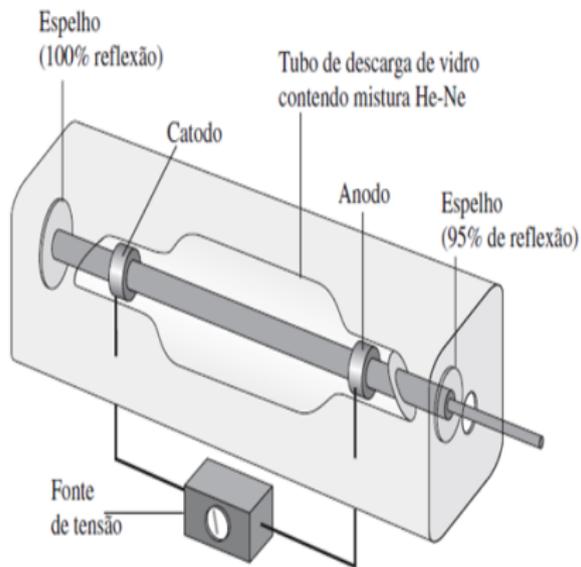
Aumentando a emissão estimulada: inversão de população



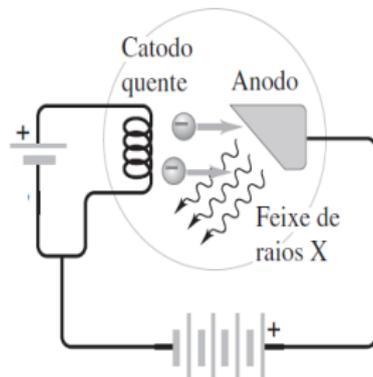
Aumentando a emissão estimulada: inversão de população



Aumentando a emissão estimulada: inversão de população

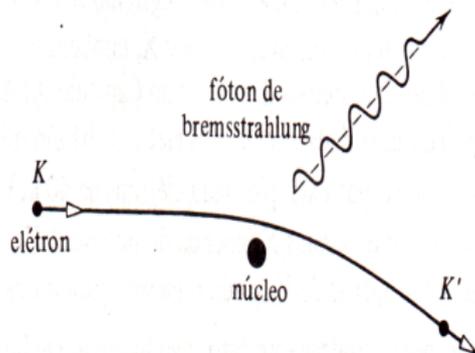
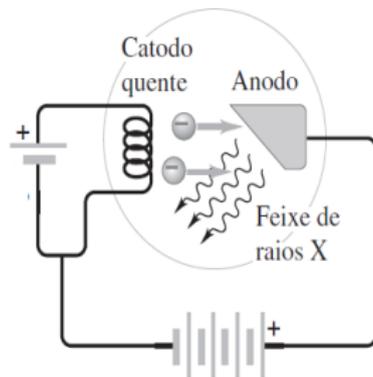


- ▶ Os raios X são produzidos quando elétrons com velocidades elevadas são acelerados por potenciais da ordem de  $10^3 V$  a  $10^6 V$  colidem com um alvo metálico.



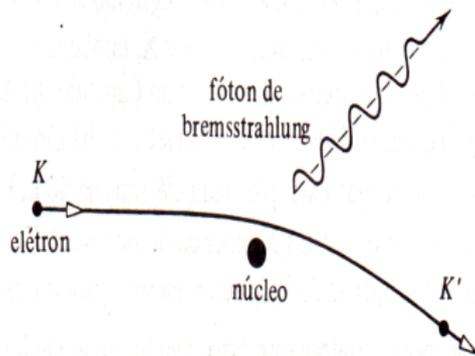
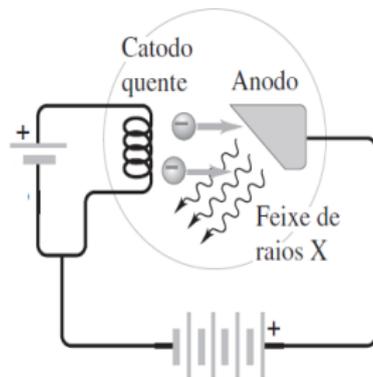
## ↳ Espalhamento e Produção de Raios X

- ▶ Os raios X são produzidos quando elétrons com velocidades elevadas são acelerados por potenciais da ordem de  $10^3 V$  a  $10^6 V$  colidem com um alvo metálico.
- ▶ Sendo emitidos por cargas aceleradas, fica claro que os raios X são OE e os fótons de raios X devem satisfazer  $E = hf = hc/\lambda$ .



## ↳ Espalhamento e Produção de Raios X

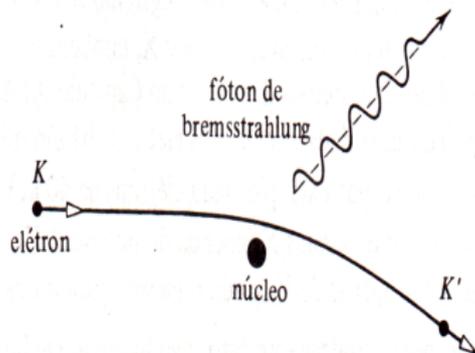
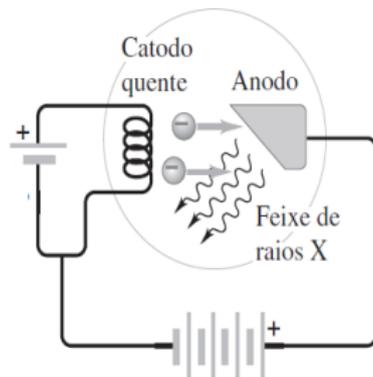
- ▶ Os raios X são produzidos quando elétrons com velocidades elevadas são acelerados por potenciais da ordem de  $10^3 V$  a  $10^6 V$  colidem com um alvo metálico.
- ▶ Sendo emitidos por cargas aceleradas, fica claro que os raios X são OE e os fótons de raios X devem satisfazer  $E = hf = hc/\lambda$ .
- ▶ A emissão de raios X é um fenômeno inverso a emissão que ocorre no efeito fotoelétrico.



## ↳ Espalhamento e Produção de Raios X

- ▶ Os raios X são produzidos quando elétrons com velocidades elevadas são acelerados por potenciais da ordem de  $10^3 V$  a  $10^6 V$  colidem com um alvo metálico.
- ▶ Sendo emitidos por cargas aceleradas, fica claro que os raios X são OE e os fótons de raios X devem satisfazer  $E = hf = hc/\lambda$ .
- ▶ A emissão de raios X é um fenômeno inverso a emissão que ocorre no efeito fotoelétrico.
- ▶ Na produção dos raios X ocorre a transformação da energia cinética de um elétron na energia de um fóton.

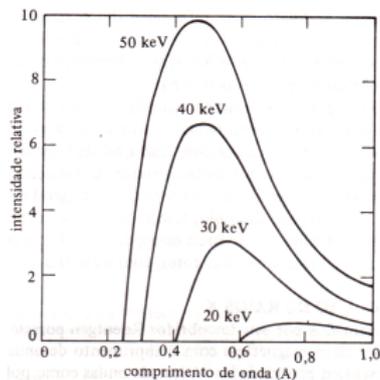
$$K - K' = hf$$



## Espalhamento e Produção de Raios X

- ▶ Os raios X são produzidos quando elétrons com velocidades elevadas são acelerados por potenciais da ordem de  $10^3 V$  a  $10^6 V$  colidem com um alvo metálico.
- ▶ Sendo emitidos por cargas aceleradas, fica claro que os raios X são OE e os fótons de raios X devem satisfazer  $E = hf = hc/\lambda$ .
- ▶ A emissão de raios X é um fenômeno inverso a emissão que ocorre no efeito fotoelétrico.
- ▶ Na produção dos raios X ocorre a transformação da energia cinética de um elétron na energia de um fóton.

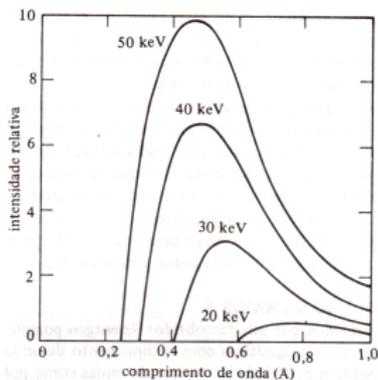
$$K - K' = hf$$



## Espalhamento e Produção de Raios X

- ▶ Os raios X são produzidos quando elétrons com velocidades elevadas são acelerados por potenciais da ordem de  $10^3 V$  a  $10^6 V$  colidem com um alvo metálico.
- ▶ Sendo emitidos por cargas aceleradas, fica claro que os raios X são OE e os fótons de raios X devem satisfazer  $E = hf = hc/\lambda$ .
- ▶ A emissão de raios X é um fenômeno inverso a emissão que ocorre no efeito fotoelétrico.
- ▶ Na produção dos raios X ocorre a transformação da energia cinética de um elétron na energia de um fóton.

$$K - K' = hf$$



- ▶ Na maior perda  $K' = 0$  e  $K = eV_{AC}$ .

$$eV_{AC} = hf_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}}$$

## Espalhamento Compton

- ▶ Fornece uma confirmação direta da natureza quântica dos raios X

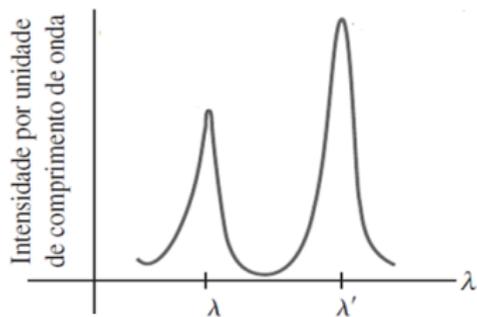
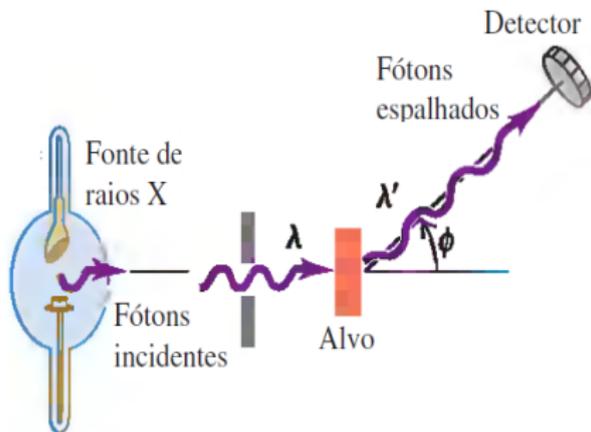
## Espalhamento Compton

- ▶ Fornece uma confirmação direta da natureza quântica dos raios X
- ▶ Quando os raios X colidem com a matéria, uma parte da radiação é espalhada de forma difusa.

## ↳ Espalhamento e Produção de Raios X

▶ **Fornecer uma confirmação direta da natureza quântica dos raios X**

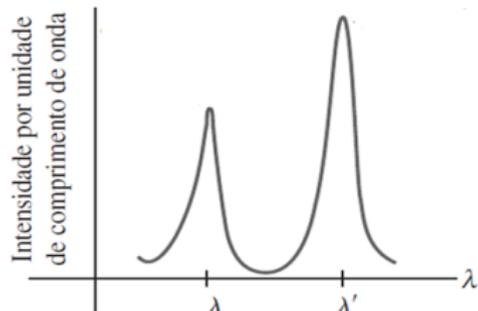
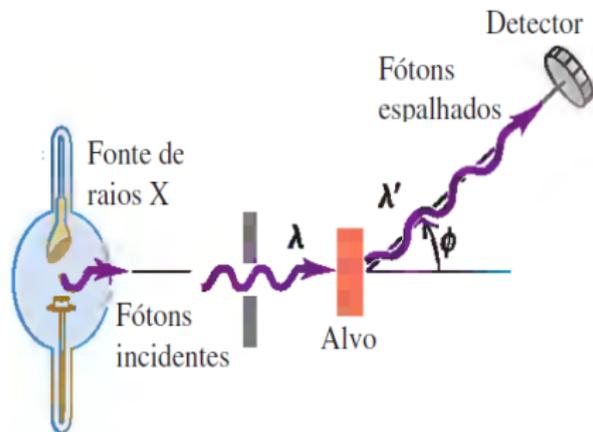
- ▶ Quando os raios X colidem com a matéria, uma parte da radiação é espalhada de forma difusa.
- ▶ Compton descobriram que uma parte da radiação espalhada possuía  $\lambda' > \lambda$ .



## ↳ Espalhamento e Produção de Raios X

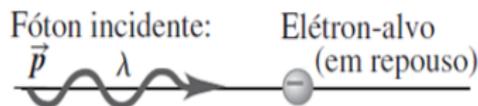
▶ **Espalhamento Compton** fornece uma confirmação direta da natureza quântica dos raios X

- ▶ Quando os raios X colidem com a matéria, uma parte da radiação é espalhada de forma difusa.
- ▶ Compton descobriram que uma parte da radiação espalhada possuía  $\lambda' > \lambda$ .
- ▶ A diferença de comprimento de onda dependia do ângulo de espalhamento,  $\lambda' - \lambda \sim f(\phi)$ .



## Espalhamento Compton

- ▶ Fornece uma confirmação direta da natureza quântica dos raios X
- ▶ Quando os raios X colidem com a matéria, uma parte da radiação é espalhada de forma difusa.
- ▶ Compton descobriram que uma parte da radiação espalhada possuía  $\lambda' > \lambda$ .
- ▶ A diferença de comprimento de onda dependia do ângulo de espalhamento,  $\lambda' - \lambda \sim f(\phi)$ .
- ▶ Considere o espalhamento de um fóton incidente em um elétron em repouso.

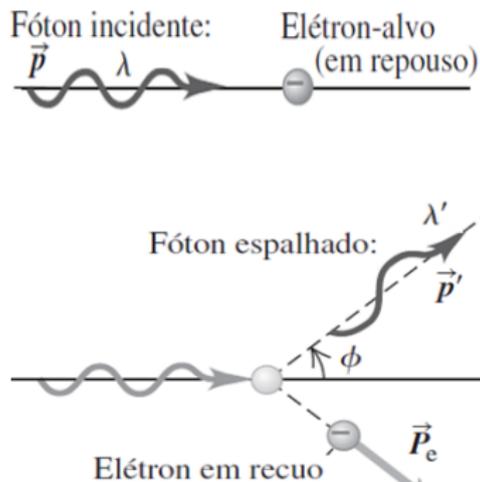


## Espalhamento Compton

- ▶ Fornece uma confirmação direta da natureza quântica dos raios X
- ▶ Quando os raios X colidem com a matéria, uma parte da radiação é espalhada de forma difusa.
- ▶ Compton descobriram que uma parte da radiação espalhada possuía  $\lambda' > \lambda$ .
- ▶ A diferença de comprimento de onda dependia do ângulo de espalhamento,  $\lambda' - \lambda \sim f(\phi)$ .
- ▶ Considere o espalhamento de um fóton incidente em um elétron em repouso.
- ▶ Da conservação da energia e momento temos:

$$E^{\text{antes}} = E^{\text{depois}}$$

$$\vec{p}_T^{\text{antes}} = \vec{p}_T^{\text{depois}}$$

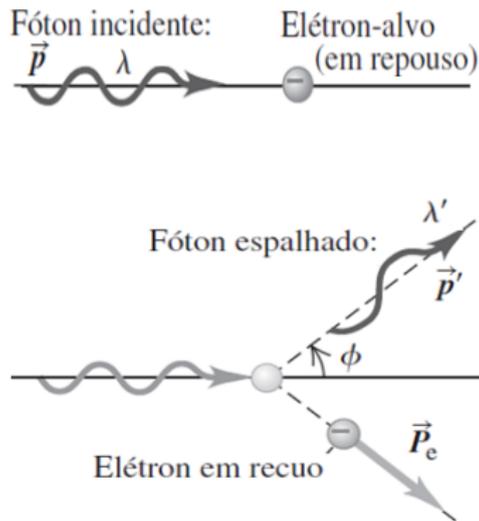


## Espalhamento e Produção de Raios X

## Espalhamento Compton

- ▶ Fornece uma confirmação direta da natureza quântica dos raios X
- ▶ Quando os raios X colidem com a matéria, uma parte da radiação é espalhada de forma difusa.
- ▶ Compton descobriram que uma parte da radiação espalhada possuía  $\lambda' > \lambda$ .
- ▶ A diferença de comprimento de onda dependia do ângulo de espalhamento,  $\lambda' - \lambda \sim f(\phi)$ .
- ▶ Considere o espalhamento de um fóton incidente em um elétron em repouso.
- ▶ Da conservação da energia e momento temos:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{antes}} &= E_{\text{depois}} \\
 \vec{p}_{\text{T}}^{\text{antes}} &= \vec{p}_{\text{T}}^{\text{depois}} \\
 pc + m_e c^2 &= p' c + E_e \\
 \vec{p} &= \vec{p}' + \vec{P}_e
 \end{aligned}$$



## Espalhamento e Produção de Raios X

## Espalhamento Compton

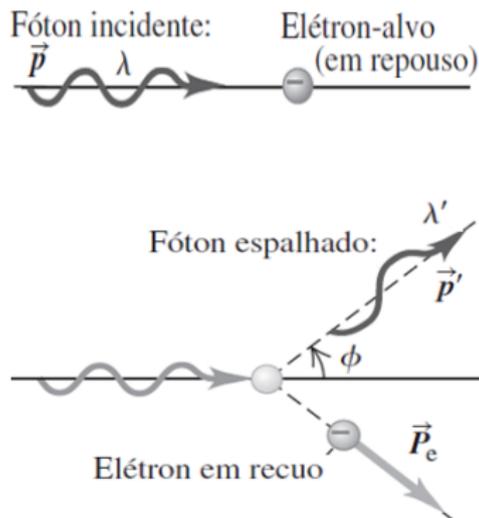
- ▶ Fornece uma confirmação direta da natureza quântica dos raios X
- ▶ Quando os raios X colidem com a matéria, uma parte da radiação é espalhada de forma difusa.
- ▶ Compton descobriram que uma parte da radiação espalhada possuía  $\lambda' > \lambda$ .
- ▶ A diferença de comprimento de onda dependia do ângulo de espalhamento,  $\lambda' - \lambda \sim f(\phi)$ .
- ▶ Considere o espalhamento de um fóton incidente em um elétron em repouso.
- ▶ Da conservação da energia e momento temos:

$$pc + m_e c^2 = p' c + E_e$$

$$\vec{p} = \vec{p}' + \vec{P}_e$$

$$E_e^2 = (pc - p' c + m_e c^2)^2 = (m_e c^2)^2 + (P_e c)^2$$

$$P_e^2 = \vec{p}' \cdot \vec{p} = p'^2 + p^2 - 2pp' \cos \phi$$



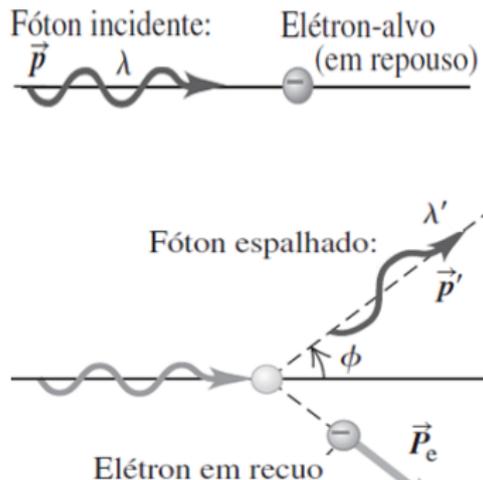
↳ **Espalhamento e Produção de Raios X**
**Espalhamento Compton**

- ▶ Fornece uma confirmação direta da natureza quântica dos raios X
- ▶ Quando os raios X colidem com a matéria, uma parte da radiação é espalhada de forma difusa.
- ▶ Compton descobriram que uma parte da radiação espalhada possuía  $\lambda' > \lambda$ .
- ▶ A diferença de comprimento de onda dependia do ângulo de espalhamento,  $\lambda' - \lambda \sim f(\phi)$ .
- ▶ Considere o espalhamento de um fóton incidente em um elétron em repouso.
- ▶ Da conservação da energia e momento temos:

$$E_e^2 = (pc - p'c + m_e c^2)^2 = (m_e c^2)^2 + (P_e c)^2$$

$$P_e^2 = \vec{p}' \cdot \vec{p} = p'^2 + p^2 - 2pp' \cos \phi$$

$$(p - p' + m_e c)^2 - m_e^2 c^2 = p'^2 + p^2 - 2pp' \cos \phi$$

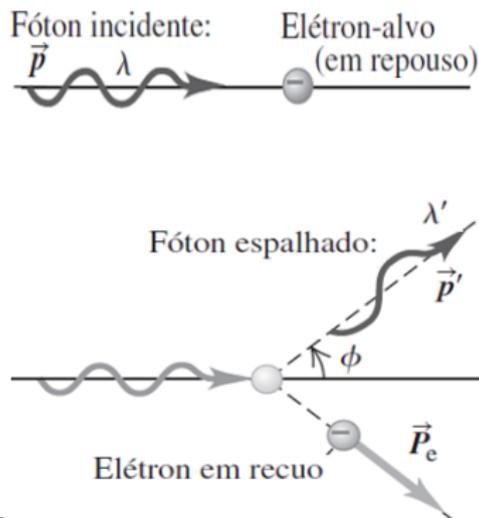


**Espalhamento Compton**

- ▶ Fornece uma confirmação direta da natureza quântica dos raios X
- ▶ Quando os raios X colidem com a matéria, uma parte da radiação é espalhada de forma difusa.
- ▶ Compton descobriram que uma parte da radiação espalhada possuía  $\lambda' > \lambda$ .
- ▶ A diferença de comprimento de onda dependia do ângulo de espalhamento,  $\lambda' - \lambda \sim f(\phi)$ .
- ▶ Considere o espalhamento de um fóton incidente em um elétron em repouso.
- ▶ Da conservação da energia e momento temos:

$$(p - p' + m_e c)^2 - m_e^2 c^2 = p'^2 + p^2 - 2pp' \cos \psi$$

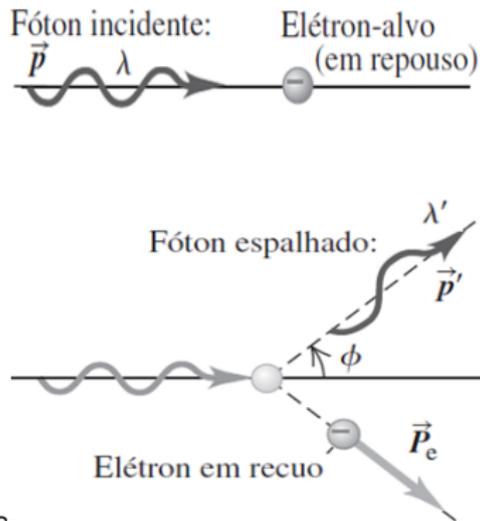
$$p^2 + p'^2 - 2pp' - 2(p - p')m_e c = p'^2 + p^2 - 2pp' \cos \phi$$



## Espalhamento Compton

- ▶ Fornece uma confirmação direta da natureza quântica dos raios X
- ▶ Quando os raios X colidem com a matéria, uma parte da radiação é espalhada de forma difusa.
- ▶ Compton descobriram que uma parte da radiação espalhada possuía  $\lambda' > \lambda$ .
- ▶ A diferença de comprimento de onda dependia do ângulo de espalhamento,  $\lambda' - \lambda \sim f(\phi)$ .
- ▶ Considere o espalhamento de um fóton incidente em um elétron em repouso.
- ▶ Da conservação da energia e momento temos:

$$\begin{aligned} (p - p' + m_e c)^2 - m_e^2 c^2 &= p'^2 + p^2 - 2pp' \cos \psi \\ p^2 + p'^2 - 2pp' - 2(p - p')m_e c &= p'^2 + p^2 - 2pp' \cos \phi \\ \left(\frac{1}{p'} - \frac{1}{p}\right) &= \frac{1}{m_e c} (1 - \cos \phi) \end{aligned}$$



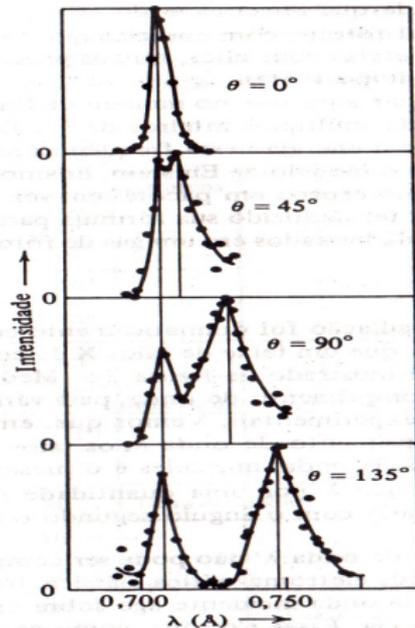
## ↳ Espalhamento e Produção de Raios X

▶ **Forneca uma confirmação direta da natureza quântica dos raios X**

- ▶ Quando os raios X colidem com a matéria, uma parte da radiação é espalhada de forma difusa.
- ▶ Compton descobriram que uma parte da radiação espalhada possuía  $\lambda' > \lambda$ .
- ▶ A diferença de comprimento de onda dependia do ângulo de espalhamento,  $\lambda' - \lambda \sim f(\phi)$ .
- ▶ Considere o espalhamento de um fóton incidente em um elétron em repouso.
- ▶ Da conservação da energia e momento temos:

$$\begin{aligned}
 (p - p' + m_e c)^2 - m_e^2 c^2 &= p'^2 + p^2 - 2pp' \cos \phi \\
 p^2 + p'^2 - 2pp' - 2(p - p')m_e c &= p'^2 + p^2 - 2pp' \cos \phi \\
 \left(\frac{1}{p'} - \frac{1}{p}\right) &= \frac{1}{m_e c} (1 - \cos \phi)
 \end{aligned}$$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \phi)$$



## ↳ Espectro Contínuo

- ▶ A matéria quente no estado condensado emite luz cujo espectro e uma distribuição contínua de comprimentos de onda em vez de um espectro de linhas.

## ↳ Espectro Contínuo

- ▶ A matéria quente no estado condensado emite luz cujo espectro e uma distribuição contínua de comprimentos de onda em vez de um espectro de linhas.
- ▶ Uma superfície ideal que absorve todos os  $\lambda$ 's da OE incidente também é o melhor emissor de OE.

- ▶ A matéria quente no estado condensado emite luz cujo espectro e uma distribuição contínua de comprimentos de onda em vez de um espectro de linhas.
- ▶ Uma superfície ideal que absorve todos os  $\lambda$ 's da OE incidente também é o melhor emissor de OE.
- ▶ Essa superfície ideal é chamada de **corpo negro**.

## ↳ Espectro Contínuo

- ▶ A matéria quente no estado condensado emite luz cujo espectro e uma distribuição contínua de comprimentos de onda em vez de um espectro de linhas.
- ▶ Uma superfície ideal que absorve todos os  $\lambda$ 's da OE incidente também é o melhor emissor de OE.
- ▶ Essa superfície ideal é chamada de **corpo negro**.
- ▶ As OE com espectro contínuo emitida por ela denomina-se radiação do corpo negro.

- ▶ A matéria quente no estado condensado emite luz cujo espectro e uma distribuição contínua de comprimentos de onda em vez de um espectro de linhas.
- ▶ Uma superfície ideal que absorve todos os  $\lambda$ 's da OE incidente também é o melhor emissor de OE.
- ▶ Essa superfície ideal é chamada de **corpo negro**.
- ▶ As OE com espectro contínuo emitida por ela denomina-se radiação do corpo negro.
- ▶ A intensidade  $I$  emitida por um corpo negro com  $T$  e dada pela **lei de Stefan-Boltzmann**:

$$I = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

## └ Espectro Contínuo

- ▶ A matéria quente no estado condensado emite luz cujo espectro e uma distribuição contínua de comprimentos de onda em vez de um espectro de linhas.
- ▶ Uma superfície ideal que absorve todos os  $\lambda$ 's da OE incidente também é o melhor emissor de OE.
- ▶ Essa superfície ideal é chamada de **corpo negro**.
- ▶ As OE com espectro contínuo emitida por ela denomina-se radiação do corpo negro.
- ▶ A intensidade  $I$  emitida por um corpo negro com  $T$  e dada pela **lei de Stefan-Boltzmann**:

$$I = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

- ▶ Observa se que  $I$  não e distribuída uniformemente ao longo de todos os  $\lambda$ 's.

## Espectro Contínuo

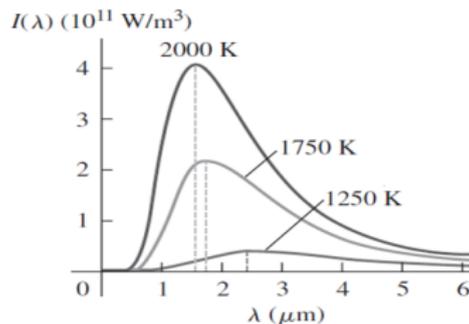
- ▶ A matéria quente no estado condensado emite luz cujo espectro e uma distribuição contínua de comprimentos de onda em vez de um espectro de linhas.
- ▶ Uma superfície ideal que absorve todos os  $\lambda$ 's da OE incidente também é o melhor emissor de OE.
- ▶ Essa superfície ideal é chamada de **corpo negro**.
- ▶ As OE com espectro contínuo emitida por ela denomina-se radiação do corpo negro.
- ▶ A intensidade  $I$  emitida por um corpo negro com  $T$  e dada pela **lei de Stefan-Boltzmann**:

$$I = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

- ▶ Observa se que  $I$  não e distribuída uniformemente ao longo de todos os  $\lambda$ 's.

- ▶  $I(\lambda)$  é a **emitância espectral** e  $I(\lambda)d\lambda$  corresponde a intensidades no intervalo entre  $\lambda$  e  $\lambda + d\lambda$ .



## Espectro Contínuo

- ▶ A matéria quente no estado condensado emite luz cujo espectro e uma distribuição contínua de comprimentos de onda em vez de um espectro de linhas.
- ▶ Uma superfície ideal que absorve todos os  $\lambda$ 's da OE incidente também é o melhor emissor de OE.
- ▶ Essa superfície ideal é chamada de **corpo negro**.
- ▶ As OE com espectro contínuo emitida por ela denomina-se radiação do corpo negro.
- ▶ A intensidade  $I$  emitida por um corpo negro com  $T$  e dada pela **lei de Stefan-Boltzmann**:

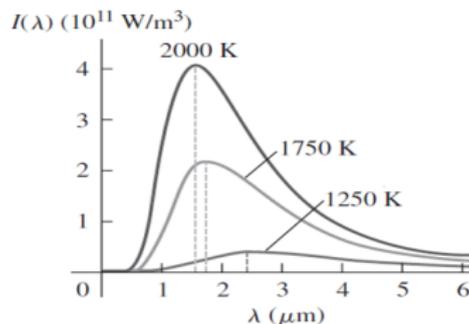
$$I = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

- ▶ Observa se que  $I$  não e distribuída uniformemente ao longo de todos os  $\lambda$ 's.

- ▶  $I(\lambda)$  é a **emitância espectral** e  $I(\lambda)d\lambda$  corresponde a intensidades no intervalo entre  $\lambda$  e  $\lambda + d\lambda$ .
- ▶ A intensidade total  $I$  será,

$$I = \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda$$



## Espectro Contínuo

- ▶ A matéria quente no estado condensado emite luz cujo espectro é uma distribuição contínua de comprimentos de onda em vez de um espectro de linhas.
- ▶ Uma superfície ideal que absorve todos os  $\lambda$ 's da OE incidente também é o melhor emissor de OE.
- ▶ Essa superfície ideal é chamada de **corpo negro**.
- ▶ As OE com espectro contínuo emitida por ela denomina-se radiação do corpo negro.
- ▶ A intensidade  $I$  emitida por um corpo negro com  $T$  e dada pela **lei de Stefan-Boltzmann**:

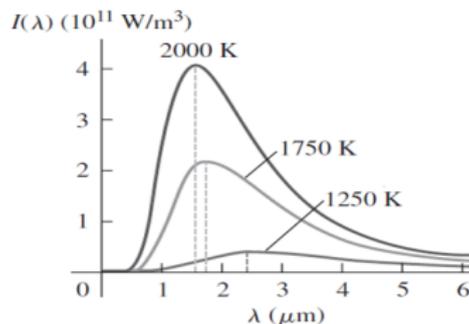
$$I = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

- ▶ Observa-se que  $I$  não é distribuída uniformemente ao longo de todos os  $\lambda$ 's.

- ▶  $I(\lambda)$  é a **emitância espectral** e  $I(\lambda)d\lambda$  corresponde a intensidades no intervalo entre  $\lambda$  e  $\lambda + d\lambda$ .
- ▶ A intensidade total  $I$  será,

$$I = \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda$$



- ▶ Para um dado  $T$  vemos um comprimento de onda de pico  $\lambda_m$ .

## Espectro Contínuo

- ▶ A matéria quente no estado condensado emite luz cujo espectro e uma distribuição contínua de comprimentos de onda em vez de um espectro de linhas.
- ▶ Uma superfície ideal que absorve todos os  $\lambda$ 's da OE incidente também é o melhor emissor de OE.
- ▶ Essa superfície ideal é chamada de **corpo negro**.
- ▶ As OE com espectro contínuo emitida por ela denomina-se radiação do corpo negro.
- ▶ A intensidade  $I$  emitida por um corpo negro com  $T$  e dada pela **lei de Stefan-Boltzmann**:

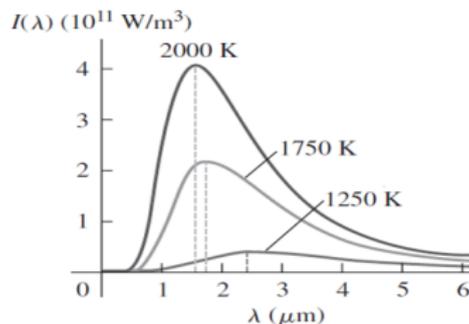
$$I = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

- ▶ Observa se que  $I$  não e distribuída uniformemente ao longo de todos os  $\lambda$ 's.

- ▶  $I(\lambda)$  é a **emitância espectral** e  $I(\lambda)d\lambda$  corresponde a intensidades no intervalo entre  $\lambda$  e  $\lambda + d\lambda$ .
- ▶ A intensidade total  $I$  será,

$$I = \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda$$



- ▶ Para um dado  $T$  vemos um comprimento de onda de pico  $\lambda_m$ .
- ▶  $\lambda_m$  é inversamente proporcional a  $T$ .

## Espectro Contínuo

- ▶ A matéria quente no estado condensado emite luz cujo espectro e uma distribuição contínua de comprimentos de onda em vez de um espectro de linhas.
- ▶ Uma superfície ideal que absorve todos os  $\lambda$ 's da OE incidente também é o melhor emissor de OE.
- ▶ Essa superfície ideal é chamada de **corpo negro**.
- ▶ As OE com espectro contínuo emitida por ela denomina-se radiação do corpo negro.
- ▶ A intensidade  $I$  emitida por um corpo negro com  $T$  e dada pela **lei de Stefan-Boltzmann**:

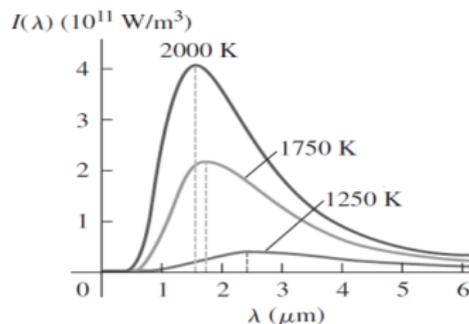
$$I = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

- ▶ Observa se que  $I$  não e distribuída uniformemente ao longo de todos os  $\lambda$ 's.

- ▶  $I(\lambda)$  é a **emitância espectral** e  $I(\lambda)d\lambda$  corresponde a intensidades no intervalo entre  $\lambda$  e  $\lambda + d\lambda$ .
- ▶ A intensidade total  $I$  será,

$$I = \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda$$



- ▶ Para um dado  $T$  vemos um comprimento de onda de pico  $\lambda_m$ .
- ▶  $\lambda_m$  é inversamente proporcional a  $T$ .
- ▶ **Lei do deslocamento de Wien.**

$$\lambda_m T = 2,9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

## Rayleigh e a “catástrofe ultravioleta”

- ▶ Considerando as energias do campo elétrico e magnético, supôs que a energia total de cada modo normal deveria ser igual a  $k_b T$ .

## Rayleigh e a “catástrofe ultravioleta”

- ▶ Considerando as energias do campo elétrico e magnético, supôs que a energia total de cada modo normal deveria ser igual a  $k_b T$ .
- ▶ Contando o número de modos normais em um intervalo  $d\lambda$  obteve que,



## Planck e a hipótese do quantum

- ▶ Planck supôs que os osciladores eletromagnéticos (elétrons) nas paredes da caixa de Rayleigh, vibrando com uma frequência  $f$ , poderiam possuir somente certos valores da energia iguais a  $nhf$  ( $n = 0, 1, 2, 3\dots$ )

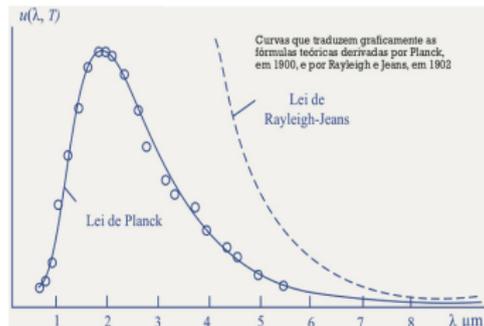
## Planck e a hipótese do quantum

- ▶ Planck supôs que os osciladores eletromagnéticos (elétrons) nas paredes da caixa de Rayleigh, vibrando com uma frequência  $f$ , poderiam possuir somente certos valores da energia iguais a  $nhf$  ( $n = 0, 1, 2, 3\dots$ )
- ▶ Planck não tinha muita certeza sobre sua hipótese de quantização ele imaginava que ela fosse apenas um artifício de calculo.

## Planck e a hipótese do quantum

- ▶ Planck supôs que os osciladores eletromagnéticos (elétrons) nas paredes da caixa de Rayleigh, vibrando com uma frequência  $f$ , poderiam possuir somente certos valores da energia iguais a  $nhf$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ )
- ▶ Planck não tinha muita certeza sobre sua hipótese de quantização ele imaginava que ela fosse apenas um artifício de cálculo.
- ▶ A dedução feita por Planck da distribuição de intensidades,  $I(\lambda)$  é,

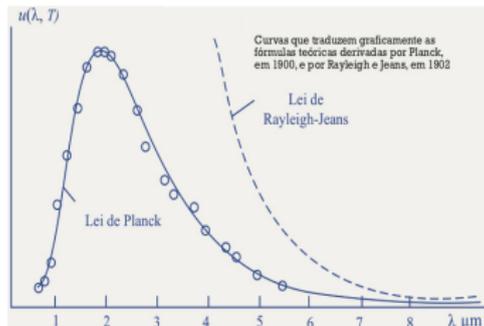
$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_b T} - 1)}$$



## Planck e a hipótese do quantum

- ▶ Planck supôs que os osciladores eletromagnéticos (elétrons) nas paredes da caixa de Rayleigh, vibrando com uma frequência  $f$ , poderiam possuir somente certos valores da energia iguais a  $nhf$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ )
- ▶ Planck não tinha muita certeza sobre sua hipótese de quantização ele imaginava que ela fosse apenas um artifício de cálculo.
- ▶ A dedução feita por Planck da distribuição de intensidades,  $I(\lambda)$  é,

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_b T} - 1)}$$



$$\left. \frac{dI(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_m} = 0$$

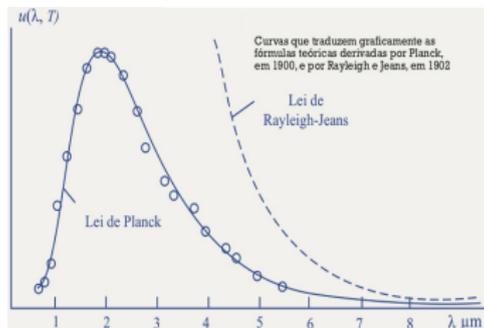
$$\lambda_m = \frac{hc}{4,965k_b T}$$

## Planck e a hipótese do quantum

- ▶ Planck supôs que os osciladores eletromagnéticos (elétrons) nas paredes da caixa de Rayleigh, vibrando com uma frequência  $f$ , poderiam possuir somente certos valores da energia iguais a  $nhf$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ )
- ▶ Planck não tinha muita certeza sobre sua hipótese de quantização ele imaginava que ela fosse apenas um artifício de calculo.
- ▶ A dedução feita por Planck da distribuição de intensidades,  $I(\lambda)$  é,

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_b T} - 1)}$$

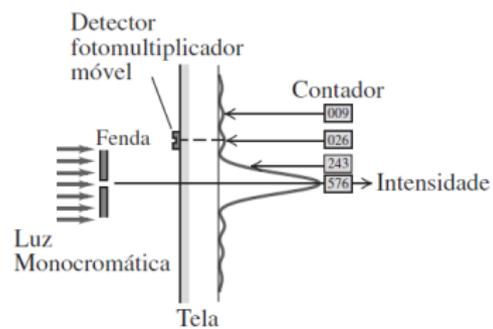
$$I = \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$$



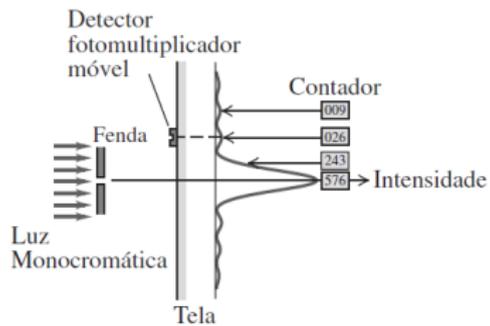
$$\left. \frac{dI(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_m} = 0$$

$$\lambda_m = \frac{hc}{4,965 k_b T}$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}$$



# A Dualidade Onda-Partícula



Após 21 fótons atingirem a tela



Após 1000 fótons atingirem a tela



Após 10000 fótons atingirem a tela

