

**Aula-8**

**Fótons I**

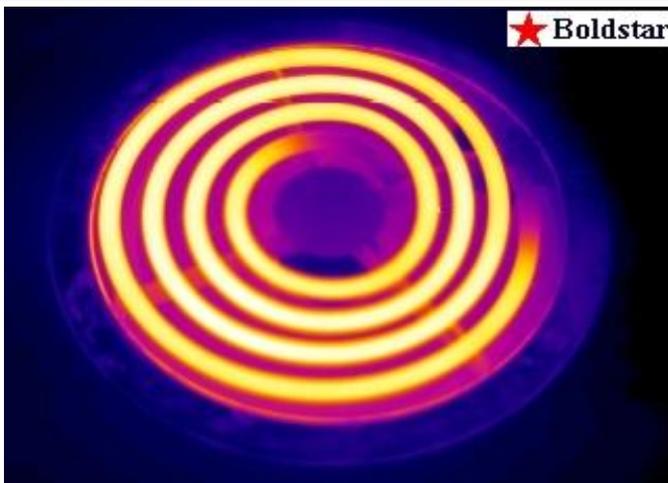
# Radiação do Corpo Negro

# Radiação Térmica

Até agora estudamos fenômenos em que a luz é considerada como **onda**.

Porém, há casos em que a explicação convencional da teoria eletromagnética de Maxwell **não é satisfatória**.

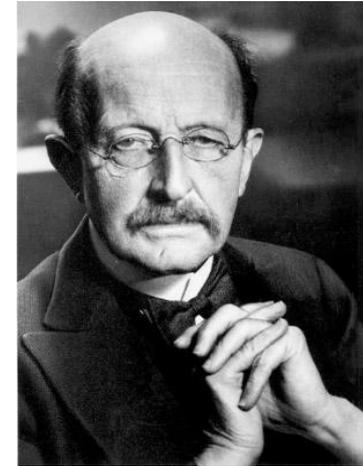
Radiação Térmica emitida por um corpo depende:  
da composição (material) → fenômenos da  
absorção, reflexão, etc.



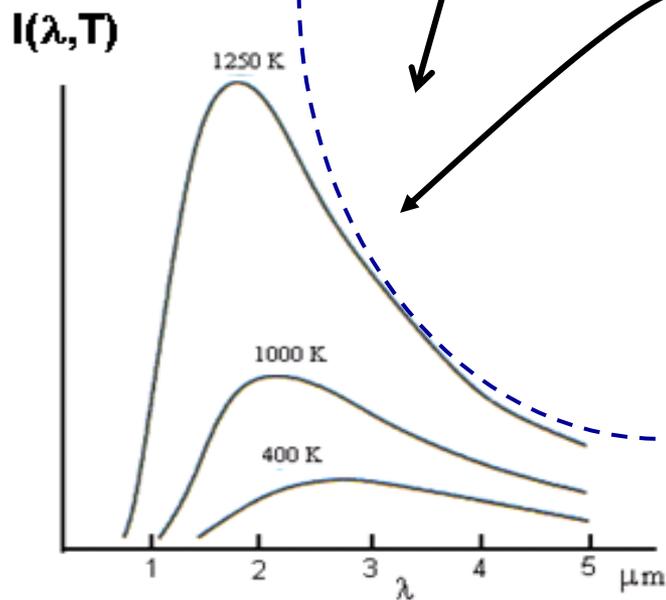
Material aquecido  
emite no visível

# A radiação do corpo negro

• Como varia a radiação emitida por uma **cavidade mantida a temperatura  $T$** , em função da sua **freqüência (ou comprimento de onda)**?



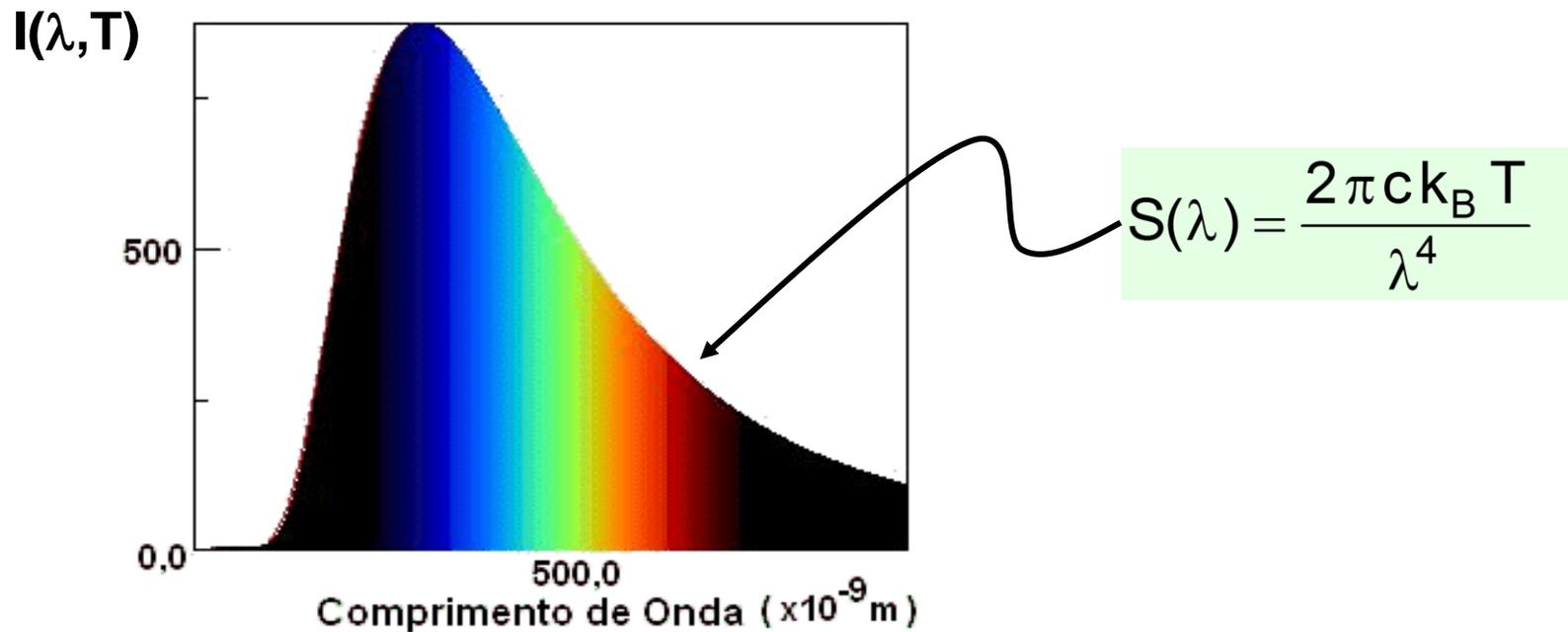
Max Planck



$$S(\lambda) = \frac{2\pi c k_B T}{\lambda^4}$$

• Planck (1900) usou uma expressão que, além de explicar as suas observações, reproduziu o resultado clássico da **radiância espectral (lei de Rayleigh-Jeans)**:

A lei de Rayleigh-Jeans concorda com os resultados experimentais para longos comprimentos de onda.



# A radiação do corpo negro

Planck postulou a expressão (*lei da radiação de Planck*):

$$S_P(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \left( \frac{1}{\exp(hc / \lambda k_B T) - 1} \right)$$

Comparando esta expressão com resultados experimentais para várias temperaturas, Planck determinou o valor de  $h$  como:

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

*(constante de Planck)*

# A radiação do corpo negro

$$S_P(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc / \lambda k_B T) - 1}$$

Dois limites importantes:

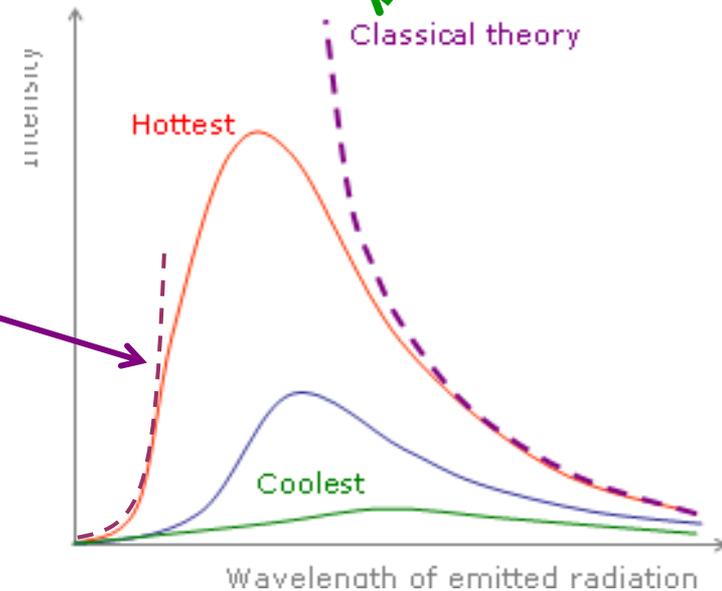
i)  $\frac{hc}{\lambda k_B T} \ll 1 \Rightarrow \exp(hc / \lambda k_B T) \approx 1 + hc / \lambda k_B T$

$$S_P(\lambda) \approx \frac{2\pi k_B c T}{\lambda^4}$$

Lei de Rayleigh-Jeans da radiação.

ii)  $\frac{hc}{\lambda k_B T} \gg 1 \Rightarrow \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) + 1 \approx \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right)$

$$S_P(\lambda) \approx \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda k_B T}\right)$$



$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}$$

### *Lei de Stefan-Boltzmann*

$$\int I(\lambda, T) d\lambda = R_T = \sigma T^4$$

$R_T$  é a radiância

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$$

constante de Stefan-Boltzmann

### *Lei de Deslocamento de Wien*

$$\frac{dI}{d\lambda} = 0$$

$$\lambda_{\max} \cdot T = 0,2898 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$$

- Para obter sua lei de radiação, Planck fez a hipótese de que a **energia armazenada**, em cada modo de oscilação eletromagnética (de frequência  $f$  ), era **discreta** e da forma:

$$E_n = n h f \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

portanto, independente da amplitude do campo.

Isso indicava que o movimento dos elétrons oscilantes nas paredes da cavidade (que geram o campo elétrico) deveria apresentar apenas valores discretos (**quantizados**), não contínuos, como se acreditava.



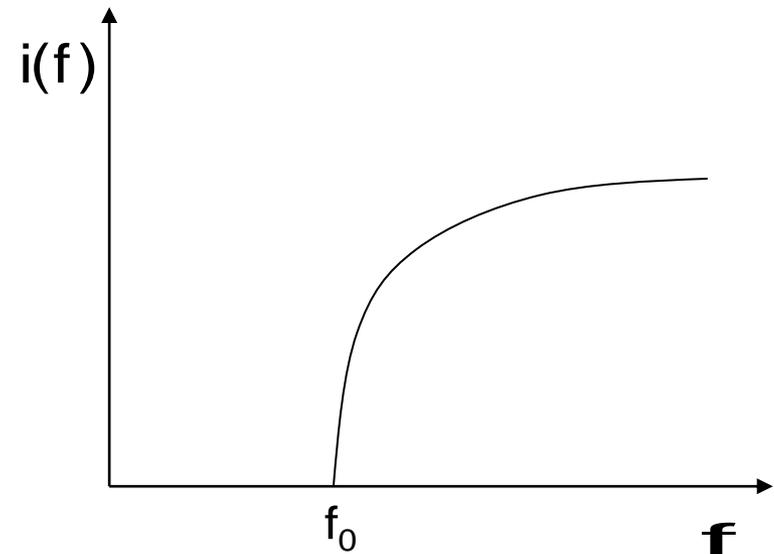
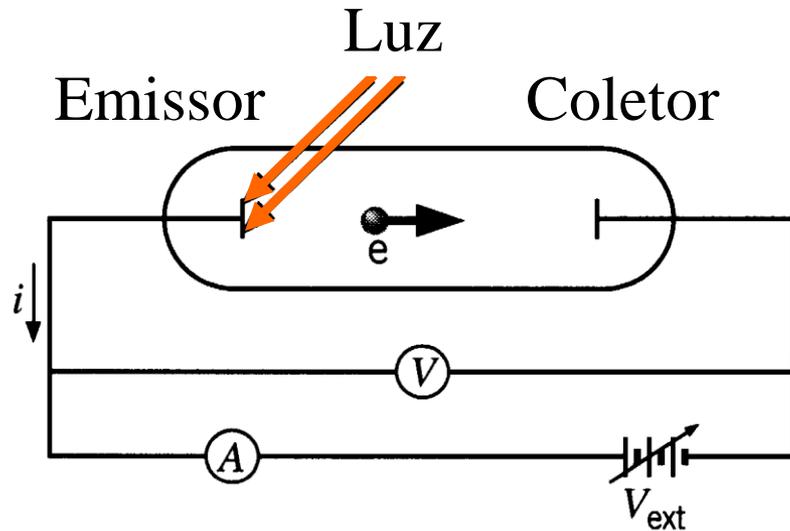
· Planck acreditava que a sua hipótese era apenas um **artifício matemático**, e que o fenômeno de radiação do corpo negro ainda viria a ser explicado de uma outra forma. Ele mesmo tentou obter uma outra explicação, por muitos anos.

**Efeito**

**Fotoelétrico**

# O efeito fotoelétrico

Observado por Hertz (1887) e Hallwachs (1888)



- Ocorre a emissão de elétrons de uma placa metálica, quando iluminada por radiação EM. Os **fotoelétrons** emitidos, e a corrente por eles gerada, só existem acima de um limiar de frequência  $f_0$ , independente da intensidade da radiação.

# O efeito fotoelétrico

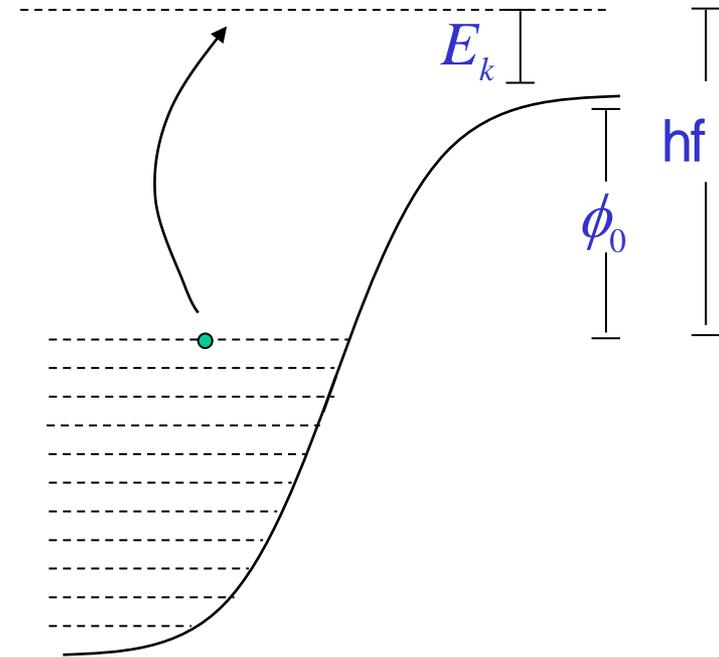
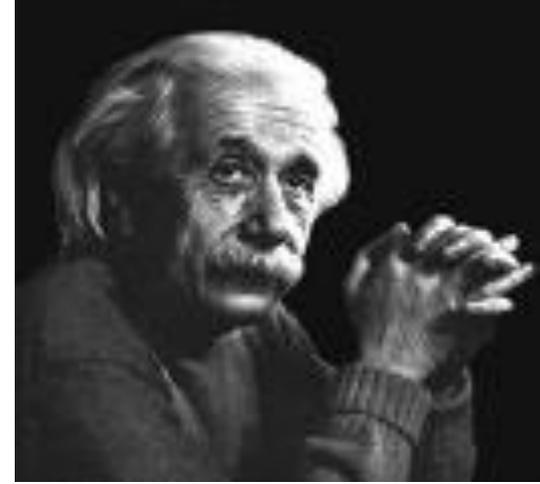
• Cada elétron requer uma **energia mínima  $\phi$**  para sair do metal. Assim, se fornecermos uma energia  **$E$**  o fotoelétron sairá com uma energia cinética:

$$E_k = E - \phi$$

Assumindo que a absorção de energia de **1 elétron** se dê através da absorção de **1 quantum**,  $hf$ , teremos:

$$E_k = hf - \phi$$

Como diferentes elétrons necessitam diferentes energias para sair, vamos definir o mínimo de  $\phi$  como  $\phi_0$ ; a **função trabalho do metal**



# O efeito fotoelétrico



$$E_{k\max} = hf - \phi_0$$

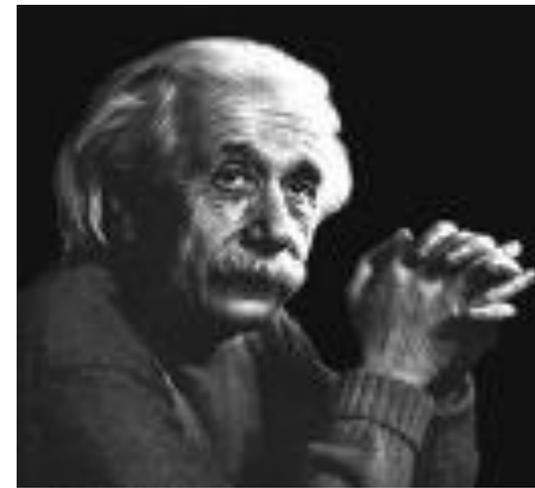


$$E_{k\max} = 0 \Rightarrow hf - \phi_0 = 0$$

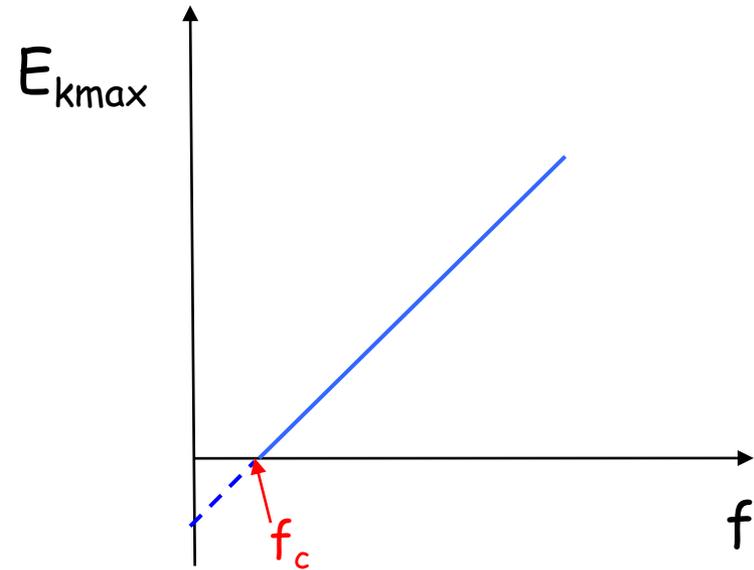
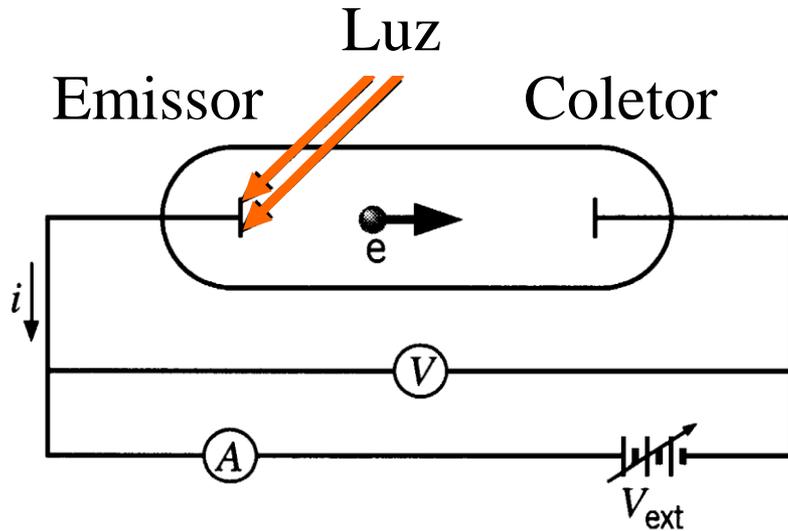


*não há emissão de fotoelétrons  
para frequências abaixo de:*

$$f_0 = \frac{\phi_0}{h}$$



Metal	$\phi_0$ (eV)
Na	2,28
Al	4,08
Cu	4,70
Zn	4,31
Ag	4,73
Pt	6,35
Pb	4,14
Fe	4,50



$E_{k\max}$  pode ser medida pelo circuito acima, pois os elétrons são freiados por  $V$ . Assim, podemos zerar a corrente para um certo valor  $V_0$  (*potencial de corte*):

$$E_{k\max} = eV_0 \Rightarrow eV_0 = h\nu - \phi_0 \Rightarrow V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{\phi_0}{e}$$

# O fóton

• A partir do conceito do quantum de energia,  $hf$ , e da fórmula da energia de uma partícula relativística com massa de repouso  $m_0 = 0$ , podemos escrever:

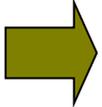
$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 = p^2 c^2$$



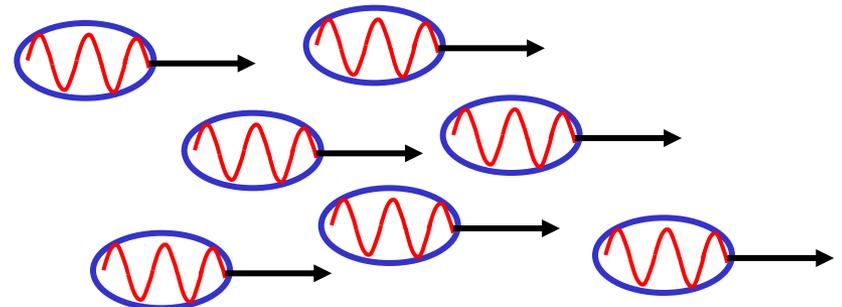
$$E = hf = p c$$

Portanto, o *momento linear* do quantum  $hf$  é :

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{ou} \quad p = \hbar k ; \quad \text{onde} \quad \hbar \equiv \frac{h}{2\pi} \approx 1.05 \times 10^{-34} \text{ Js}$$


$$\begin{cases} \vec{p} = \hbar \vec{k} \\ E = \hbar \omega \end{cases}$$

pictoricamente:



**Numa experiência do efeito fotoelétrico, onde utilizamos luz monocromática e um fotocátodo de sódio, encontramos um potencial de corte de 1,85 V para um comprimento de onda de 3000 Å e de 0,82 V para um comprimento de onda de 4000 Å. Destes dados determine:**

- a) O valor da constante de Planck.**
- b) A função trabalho do sódio.**
- c) O comprimento de onda de corte do sódio.**

## Prob.2:

Numa experiência do efeito fotoelétrico, onde utilizamos luz monocromática e um fotocátodo de sódio, encontramos um potencial de corte de 1,85 V para um comprimento de onda de 3000 Å e de 0,82 V para um comprimento de onda de 4000 Å. Destes dados determine:

- O valor da constante de Planck.
- A função trabalho do sódio.
- O comprimento de onda de corte do sódio.

a) e b)

$$\left. \begin{array}{l} eV_{01} = \frac{hc}{\lambda_1} - \phi_0 \\ eV_{02} = \frac{hc}{\lambda_2} - \phi_0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} e(V_{01} - V_{02}) = hc(\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1}) \rightarrow h = \frac{e(V_{01} - V_{02})}{c(\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1})} \\ h = \frac{1,85 \text{ eV} - 0,82 \text{ eV}}{3 \times 10^8 \times (3^{-1} - 4^{-1}) \times 10^7} = \frac{1,03 \text{ eV}}{3 \times 10^{15} \times (0,083)} \approx 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV s} \\ \phi_0 = \frac{hc}{\lambda_1} - eV_{01} = \frac{4,136 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{3 \times 10^{-7}} - 1,85 \text{ eV} \approx 2,28 \text{ eV} \end{array}$$

c)

$$\nu_0 = \frac{\phi_0}{h} = \frac{c}{\lambda_{\max}} \rightarrow \lambda_{\max} = \frac{hc}{\phi_0} = \frac{4,136 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{2,28} \approx 5,44 \times 10^{-7} \text{ m} = 544 \text{ nm}$$

$\nu_0$  : frequência de corte

$\lambda_{\max}$  : comprimento de onda de corte