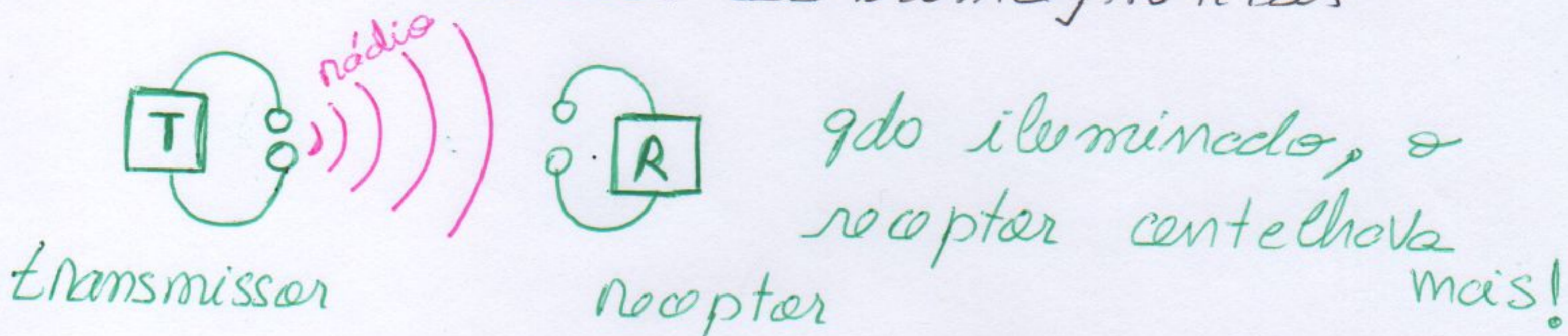


# Efeito Fotoelétrico

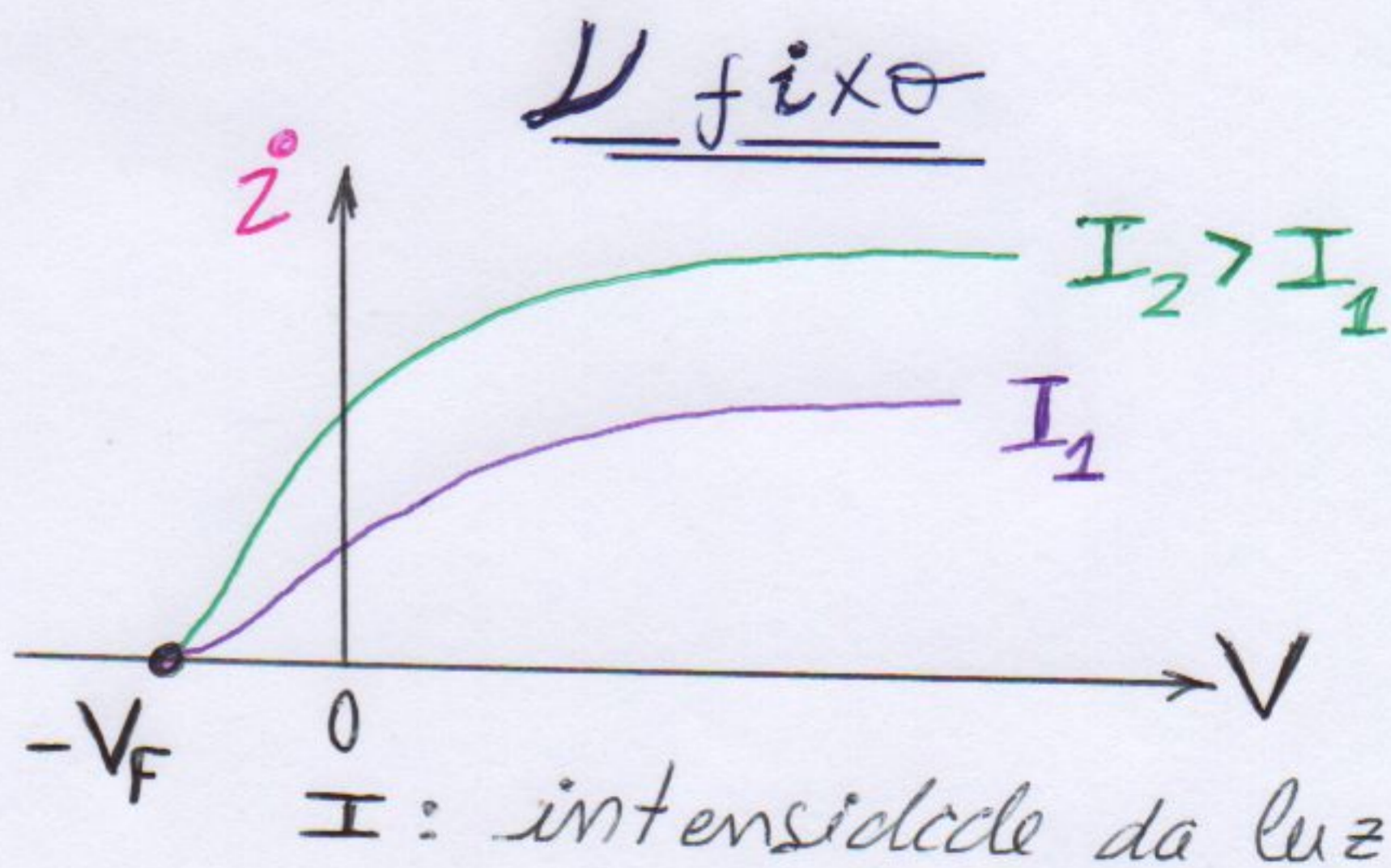
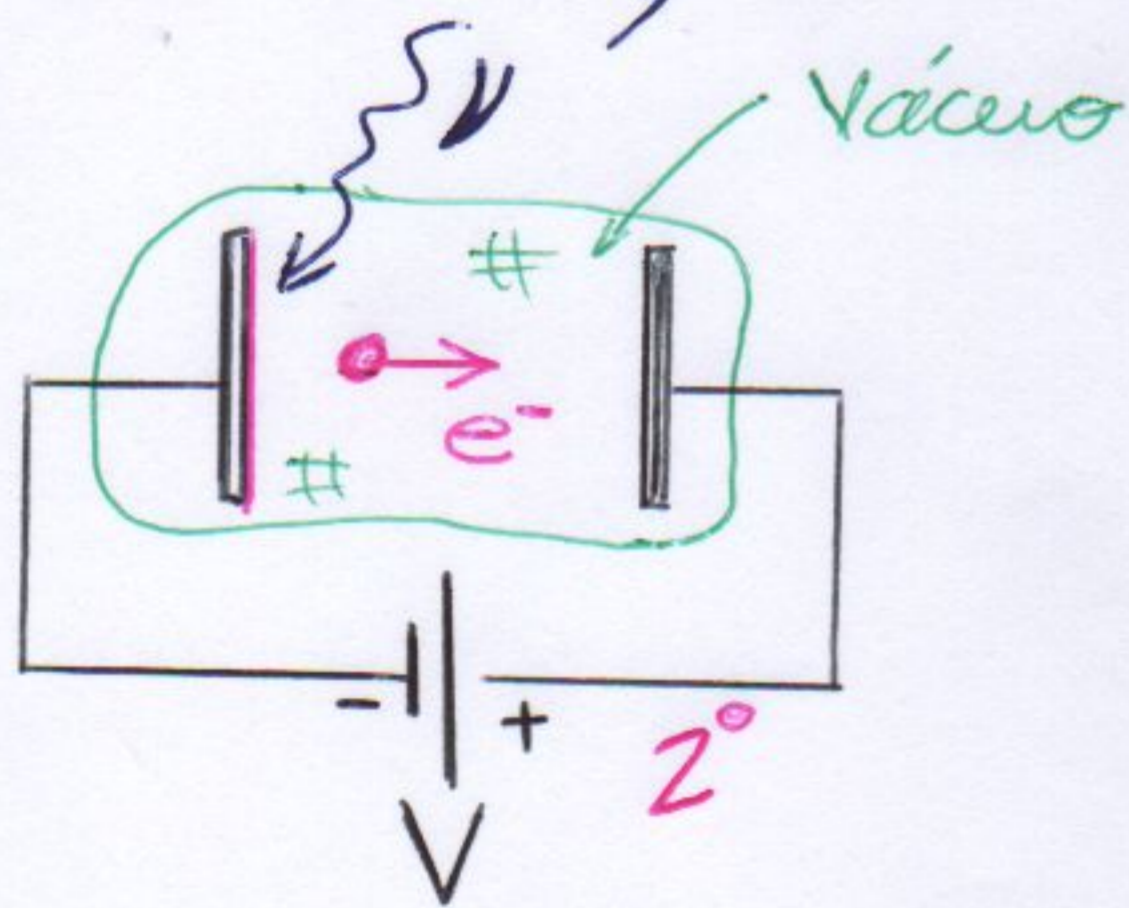
Lembrando: Planck e Einstein  $\Rightarrow$   $E = h\nu$   
-1900-

Hertz, 1887, produziu e detectou ondas eletromagnéticas



Razão: luz  $\rightarrow$  elétrons arrancados pela luz + facilitavam o centelhaamento!

Lenard, 1900:

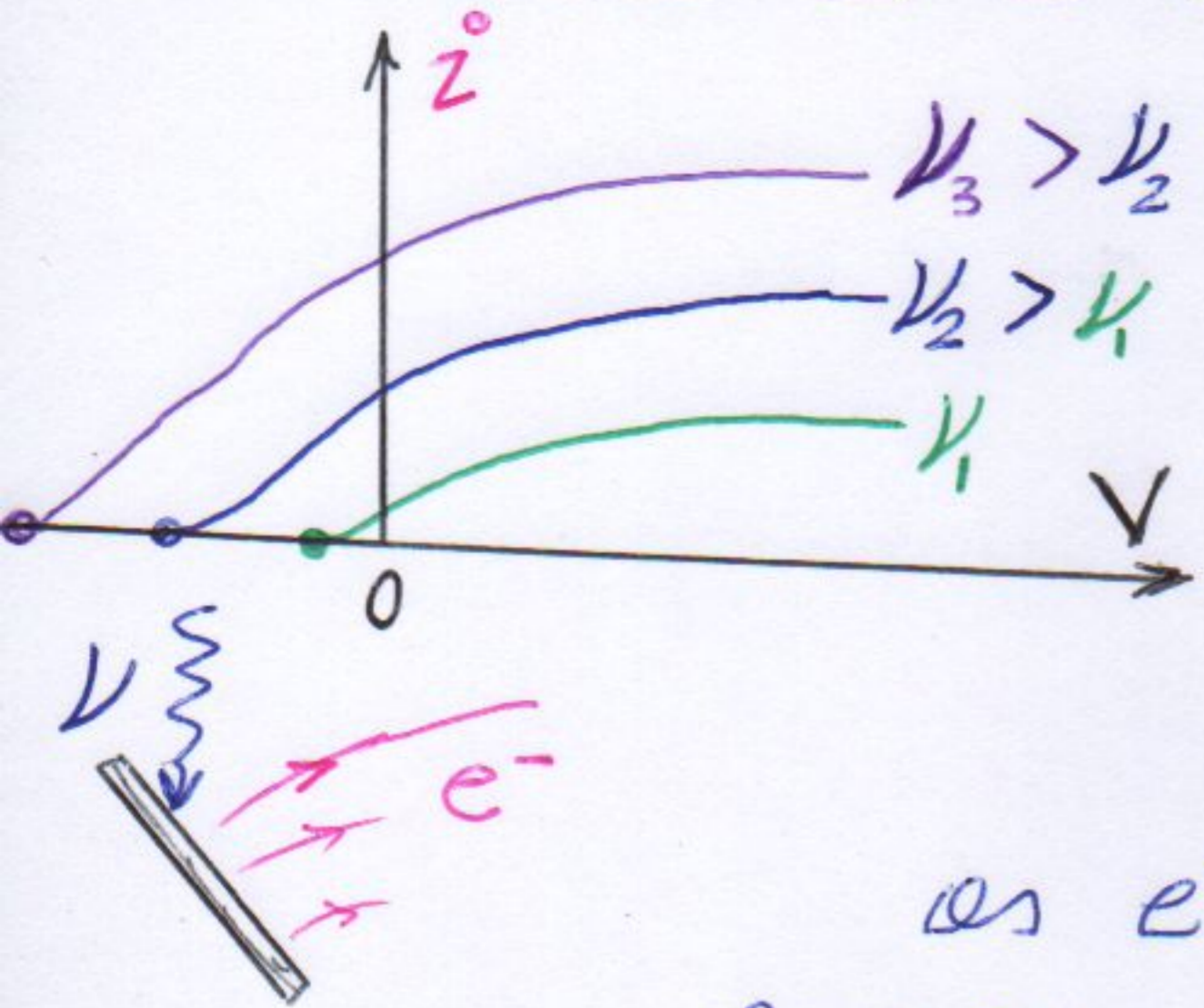


Dado  $I$  e  $V$  os  $e^-$  são coletados no anodo  
p/  $V > -V_f$

$V_f$  tensão de frenamento  $\Rightarrow i = 0$

$V_f$   $\bar{m}$  depende de  $I$

Fixando  $I$  e Variando  $V$ :

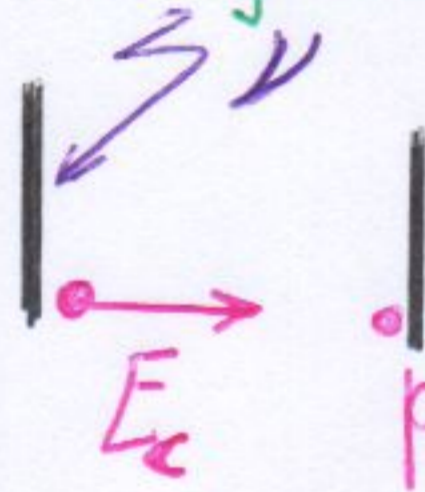


$\Rightarrow V_F$  depende de  $\nu$

### Explicação

as  $e^-$  saem com diversos valores de energia cinética  $E_c$ , uma vez que no alvo elas estão ligadas com diferentes energias (banda).

"A luz gasta energia para arrancar e dar energia cinética ao elétron".



Para frear um  $e^-$  que sai com  $E_c$  basta aplicar tensão  $-V$

$$E_c = eV$$

Para ter  $i=0$ , isto é, frear todos os  $e^-$ , temos que aplicar tensão que freie até os mais velozes:

$$\underline{E_c^{max} = eV_F} \quad \Rightarrow \quad i=0$$

Então, por conservação de energia,

$$E^{max} = E - W$$

$$\text{ou } \underline{eV_F = E - W}$$

energia entregue pela luz

energia gasta p/ o  $e^-$  sair

- função trabalho -

Classicamente teríamos:

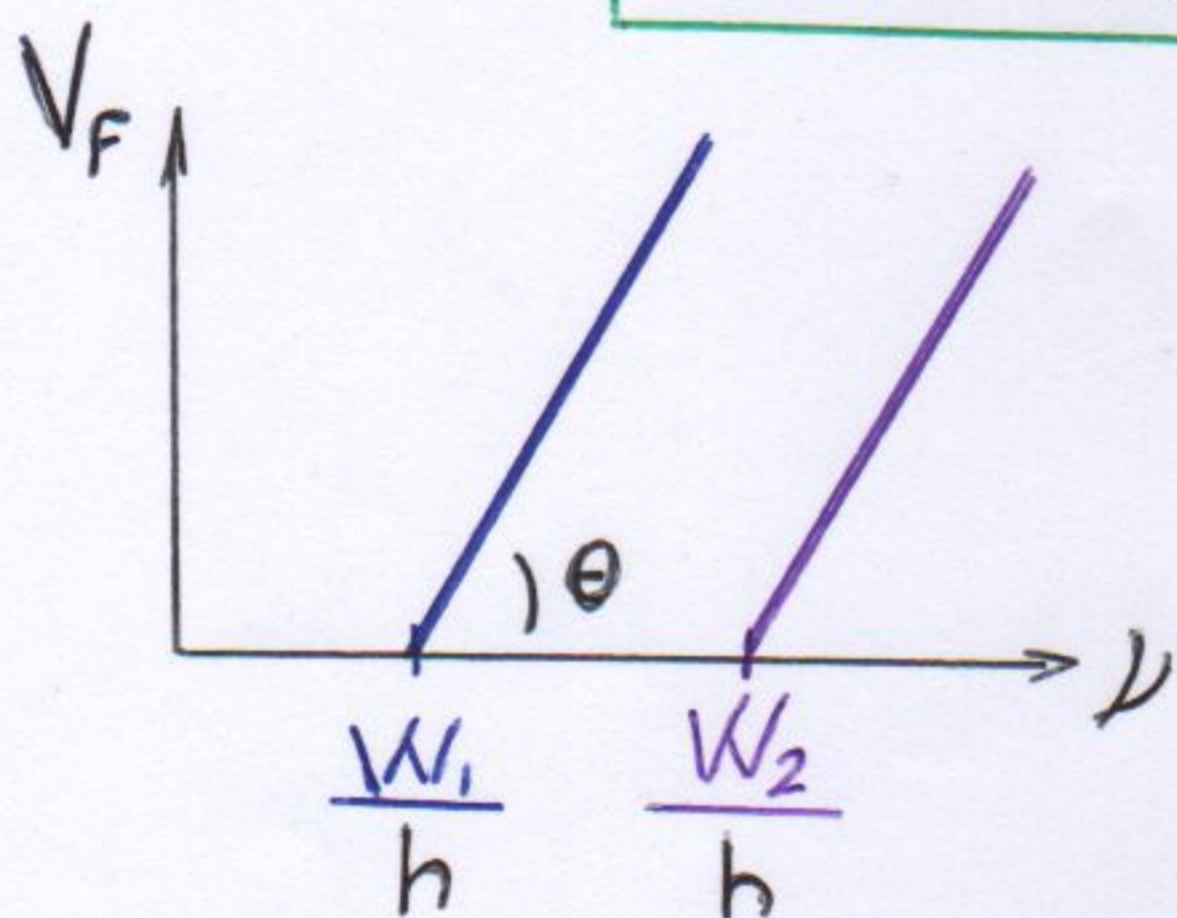
onda transporta energia  $E \sim I \sim A^2$

$\Rightarrow V_F \propto I$  Mas isso não ocorre!

Einstein, 1905:  $E = h\nu$

"um quantum de luz transfere toda sua energia aos  $e^-$ "

$$eV_F = h\nu - W$$



$$V_F = \frac{h}{e} \nu - \frac{W}{e}$$

$$\text{tg } \theta = \frac{h}{e}$$

cte

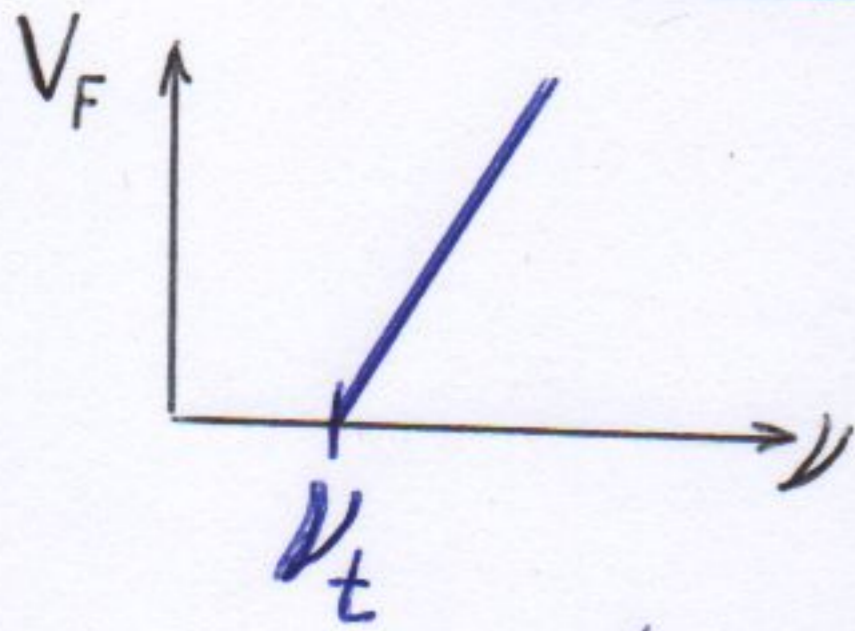
depende do material

Nessa época ninguém imaginava que a cte  $h$  tivesse algo a ver com o efeito fotoelétrico. Tão pouco era evidente que  $V_F \times \nu$  fosse linear.

Millikan não acreditava nessa linearidade; por 10 anos tentou medidas que a negasse. Já em 1915 era evidente sua validade.

Lewis, 1926, cunha o nome fóton por  $h\nu$

# Limiar de fotoemissõ

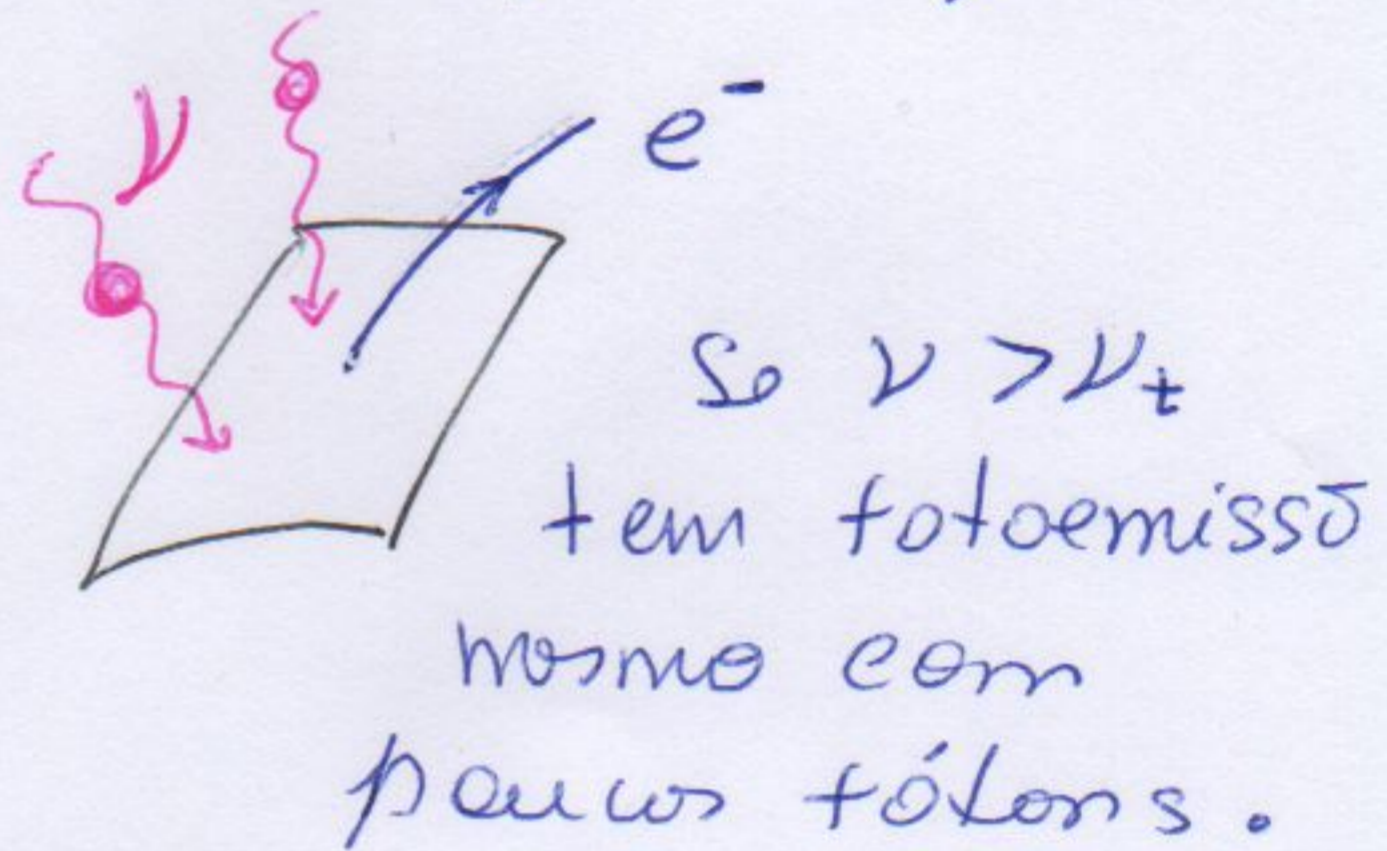
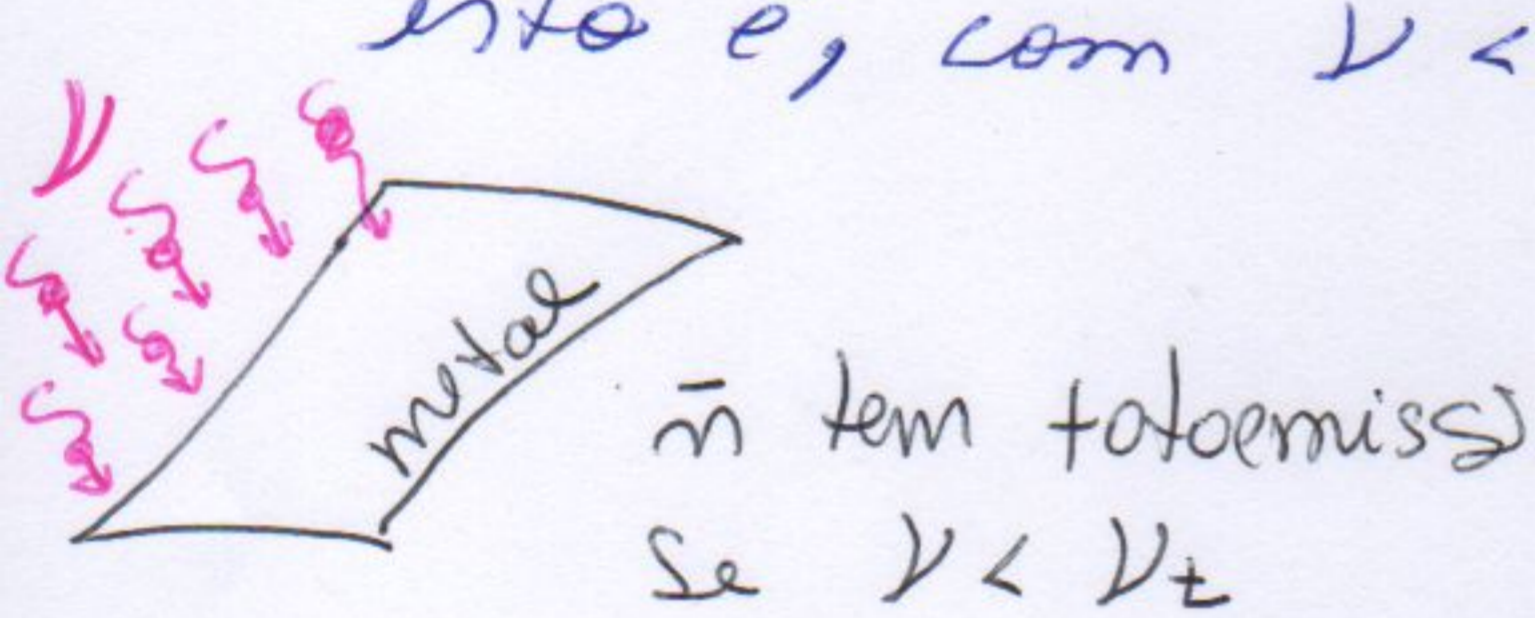


$$h\nu = eV_F + W$$

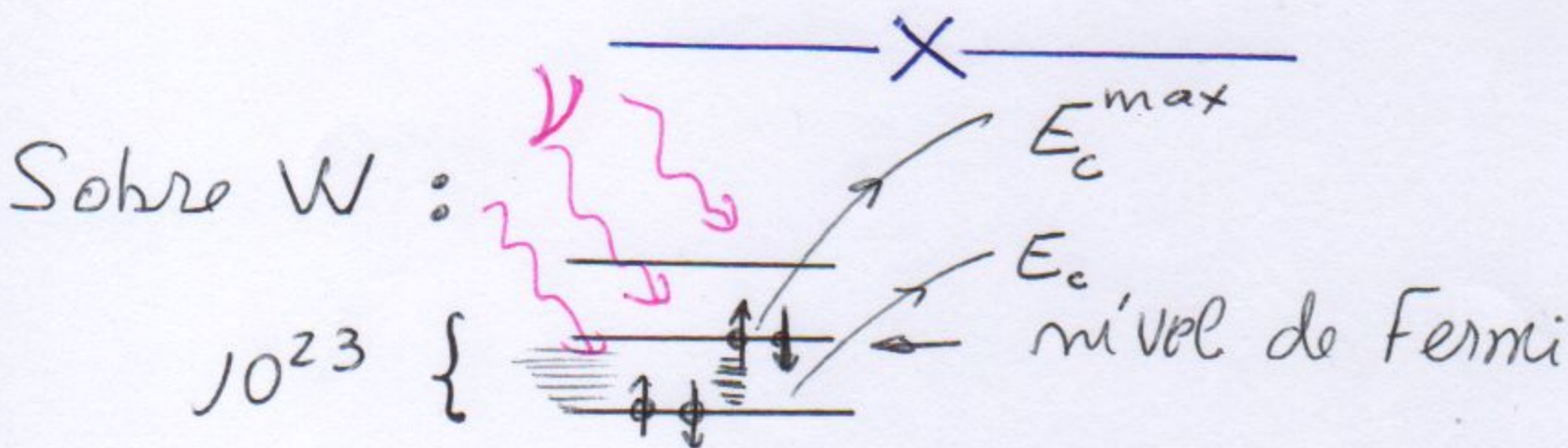
$$P / V_F = 0 \Rightarrow \nu_t = \frac{W}{h}$$

abaixo de  $\nu_t$  nã há fotoemissõ  
mesmo com  $I$  muito gde!

Nã adianta ter muitos fõtons, isto é,  
 $I$  grande, porém pouco energéticos,  
isto é, com  $\nu < \nu_t$ .



Se  $\nu > \nu_t$ , então, qto mais fõton  
mais  $e^-$  podem ser fotoejetados  $\Rightarrow$  maior  $i$ .




$W$  energia p/ desemparelhar e sair :  $\sim e\hbar\omega - \nu\hbar\omega$

atrass na fotoemissõ :

Lawrence e Beams, 1928 :  $\sim 1ms$

## Exemplo 3.7 de Tipler

$\lambda = 400 \text{ nm}$ ,  $I = 0,01 \text{ W/m}^2$



potássio  $\Rightarrow W = 2,22 \text{ eV}$

at  $t_0$  tempo, classicamente, p1  $e^-$  ser emitido?

ideia

$r \approx 1 \text{ \AA}$



Em  $\Delta t$  segundos, incide no átomo a energia (ou, o trabalho realizado pelo campo elétrico  $e^-$ ):

$$E = I \cdot \pi r^2 \cdot \Delta t = 10^{-2} \pi (10^{-10})^2 \cdot \Delta t$$

Para haver fotoemissão em  $E$  deve ser no mínimo igual a  $W$ :

$$2,22 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = \pi 10^{-22} \Delta t \Rightarrow \underline{\underline{\Delta t \approx 19 \text{ min}}}$$

A fonte é fraca:

$$N = \frac{I}{h\nu} = \frac{10^{-2}}{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{400 \cdot 10^{-9}}} = 10^{16} \text{ fótons/m}^2 \cdot \text{s}$$

Mas, cada fóton tem  $\nu = c/\lambda = 0,75 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ ,

e como  $\nu_t = \frac{W}{h} = \frac{2,22 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,6 \cdot 10^{-34}} = 0,55 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ ,

temos  $\nu > \nu_t \rightarrow$  logo fotoemite!

Como  $I$  é baixa  $\Rightarrow$  a corrente  $i$   $\bar{n}$  deve ser g<sub>de</sub>

## Exercício Tipler 3.25 : unidades

$$1 \text{ mm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-7} \text{ cm} \quad 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-8} \text{ cm}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$

• alvo de césio  $\rightarrow W = 1,9 \text{ eV}$

• determinar  $\lambda_t$ :

$$\nu_t = \frac{W}{h} = \frac{1,9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,62 \cdot 10^{-34}} = 4,6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

ou  $\nu = \frac{1,9}{4,136 \cdot 10^{-15}} = \dots \Rightarrow \lambda_t = \frac{c}{\nu_t} = 653 \text{ nm}$

• Se incide luz com  $\lambda = 300 \text{ nm}$ , qual o potencial de corte ou  $E_c^{\text{max}}$ ?

$$\nu = c/\lambda = \frac{300 \cdot 10^8}{300 \cdot 10^{-9}} = 10^{15} \text{ Hz}$$

como  $\nu > \nu_t$ , ou  $\lambda < \lambda_t$ , tem fotoemissão!

$$V_F = \frac{h}{e} \nu - \frac{W}{e} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 10^{15} - \frac{1,9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}}$$

ou

$$e \cdot V_F = h \nu - W = 4,136 \cdot 10^{-15} \cdot 10^{15} - 1,9 = 2,23 \text{ eV}$$

então

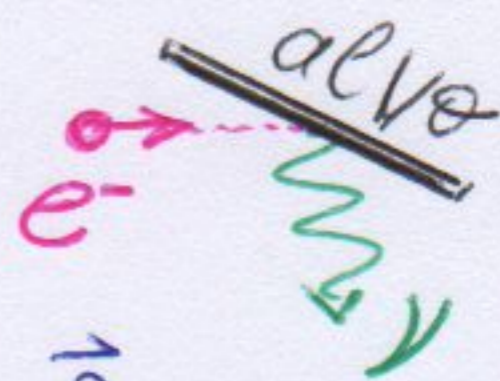
$$V_F = 2,23 \text{ volts}$$

↑  
electron-  
Volt

$$E_c^{\text{max}} = e \cdot V_F = \begin{cases} 2,23 \text{ eV} & \text{ou} \\ 2,23 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{cases}$$

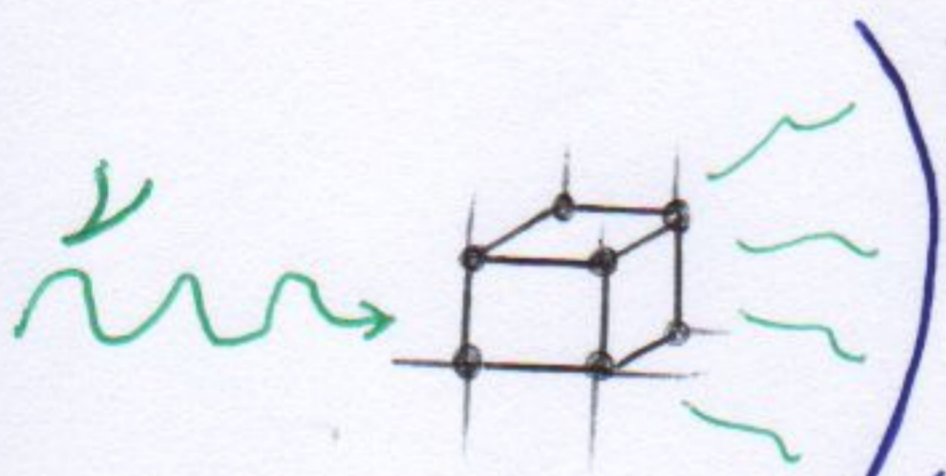
# Raios-X - Regra de Duane-Hunt

Raios-X, Roentgen, 1895



- $\vec{n}$  eram afetados por  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$
- de início  $\vec{n}$  se conseguia interf. ou difração
  - $\vec{n}$  eram cargas e não pareciam ondas
- interpretado como onda eletrom. vinda da desaceleração do elétron dentro do alvo
- alargamento do feixe em fendas muito estreitas:  $\lambda \sim 10^{-10} \text{ m}$

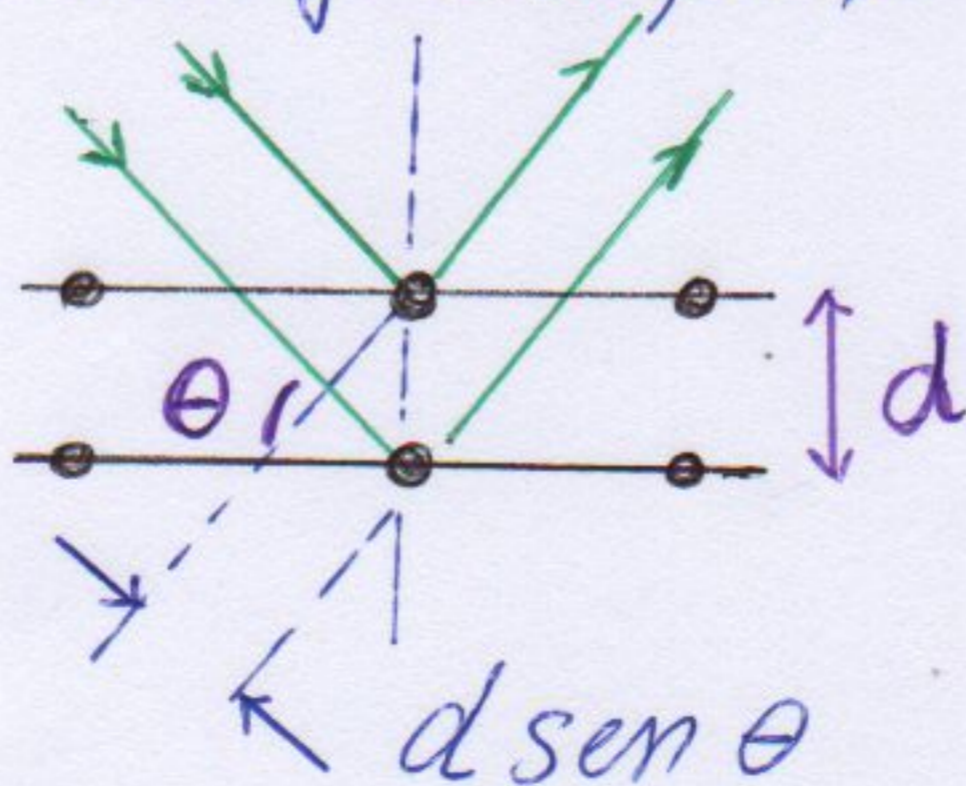
1912, Laue: como  $\lambda \sim$  espaçamento atômico cristais são redes de difração



← cristalografia

detector: interf. e difração  $\Rightarrow$  onda

1912, Bragg:

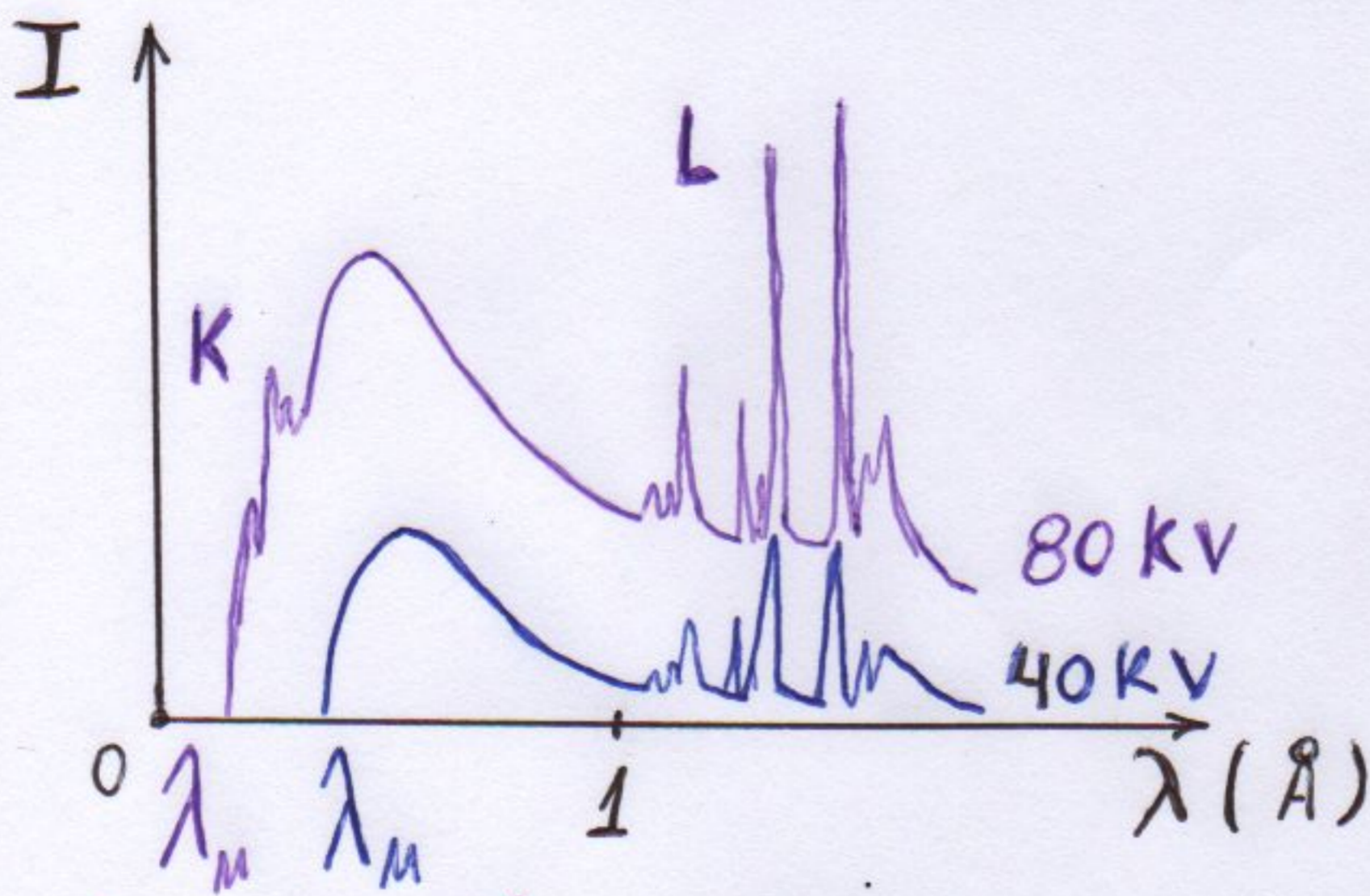


- diferença de caminho óptico:  $2d \sin \theta$
- interferência construtiva se:

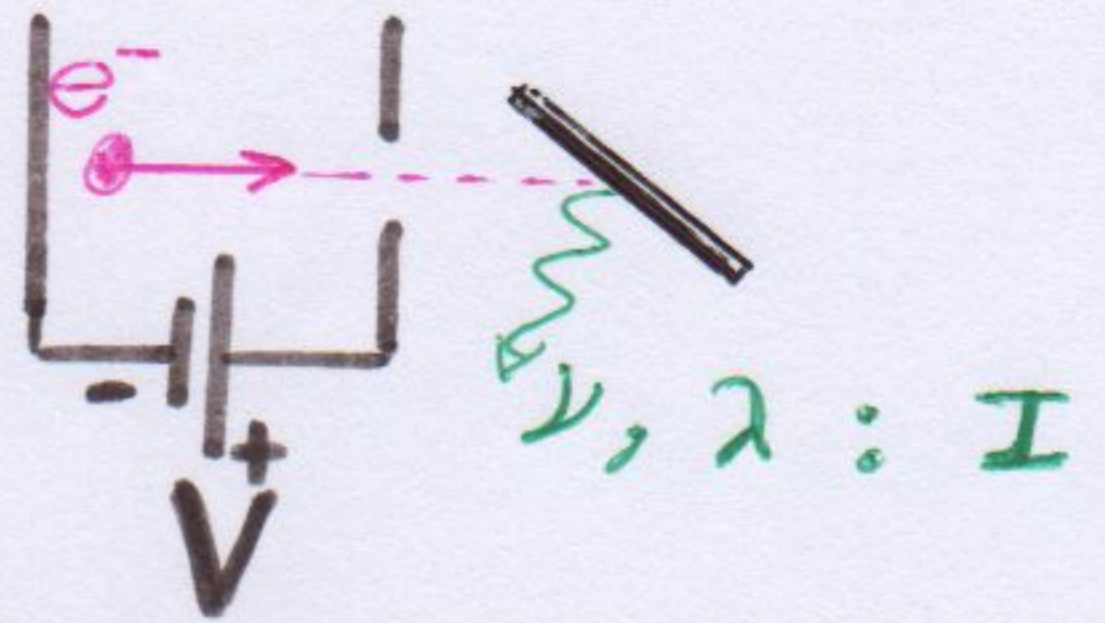
$$\underline{2d \sin \theta = m \lambda}, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

# Intensidade de raios-X

Tipler, fig. 3.18



alvo: molibdeno



menor  $\lambda$ , ou maior freq., produzido  
 $\lambda_m$ : compr. de onda de corte: } depende de  $V$   
 }  $\bar{m}$  do alvo

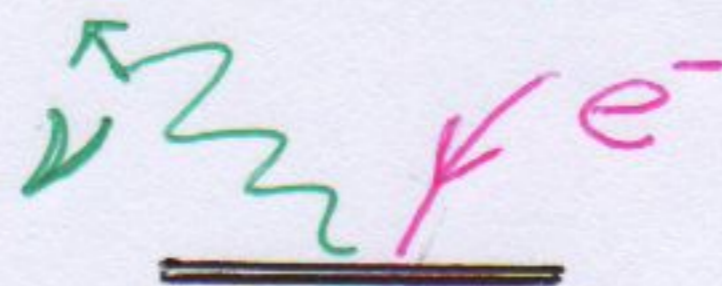
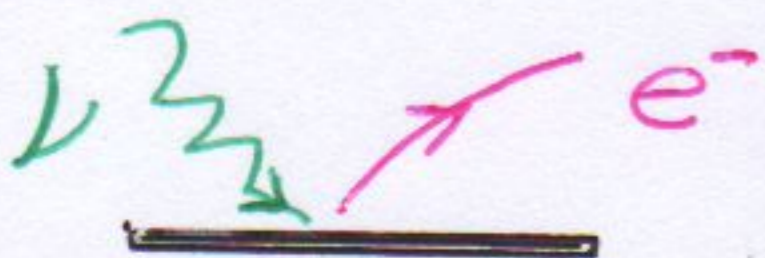
3 observações:

- espectro contínuo: devido ao freamento de elétrons (bremsstrahlung)
- linhas discretas: características do alvo; transições eletrônicas

- 1915 Duane-Hant  $\lambda_m = \frac{1240}{V}$ , em mm

## Einstein em cena

Pl Einstein, a produção de raios-X é um efeito fotoelétrico inverso!



$W \sim eV$

fotoelétrico

raios-X

$\lambda \sim 100 \text{ nm}, E_c^{\text{max}} \sim eV$

$\lambda \sim 1 \text{ nm}, E_c \sim 10^4 eV$





Várias excitações ocorrem

$$E_c = e \cdot V = h\nu + E_{\text{excitações}}$$

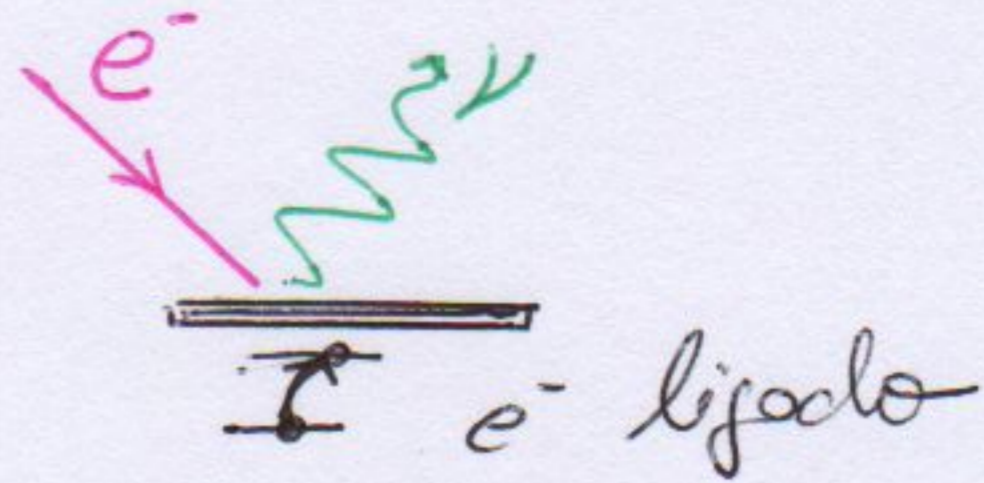
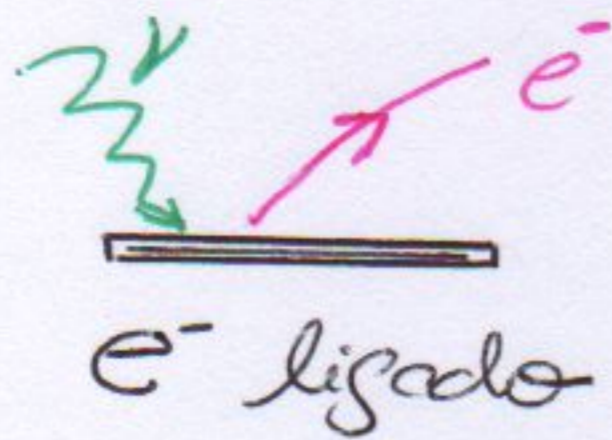
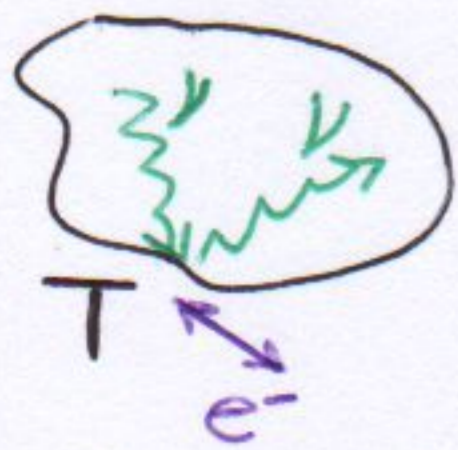
$$\underline{e \cdot V = h\nu_m} \Rightarrow \underline{\lambda_m = \frac{hc/e}{V}}$$

$$\frac{hc}{e} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 12,4 \cdot 10^{-7} \text{ volt} \cdot \text{m} = 1240 \text{ Volt} \cdot \text{mm}$$

$$\text{mm} \rightarrow \underline{\lambda_m = \frac{1240}{V}} \leftarrow \text{Volt}$$

# Efeito Compton 1923

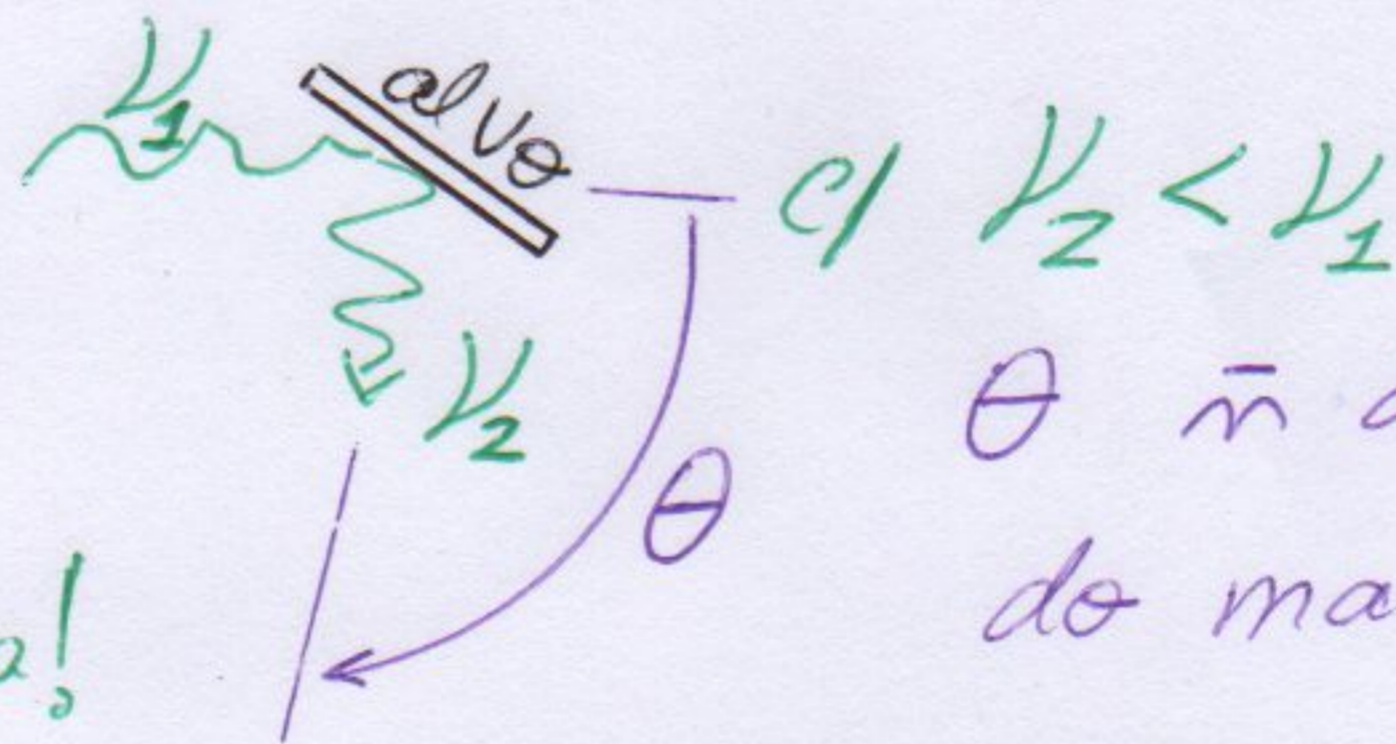
Até então tínhamos



$e^-$  ligado

Sempre havia interação radiação e  $e^-$  ligado.

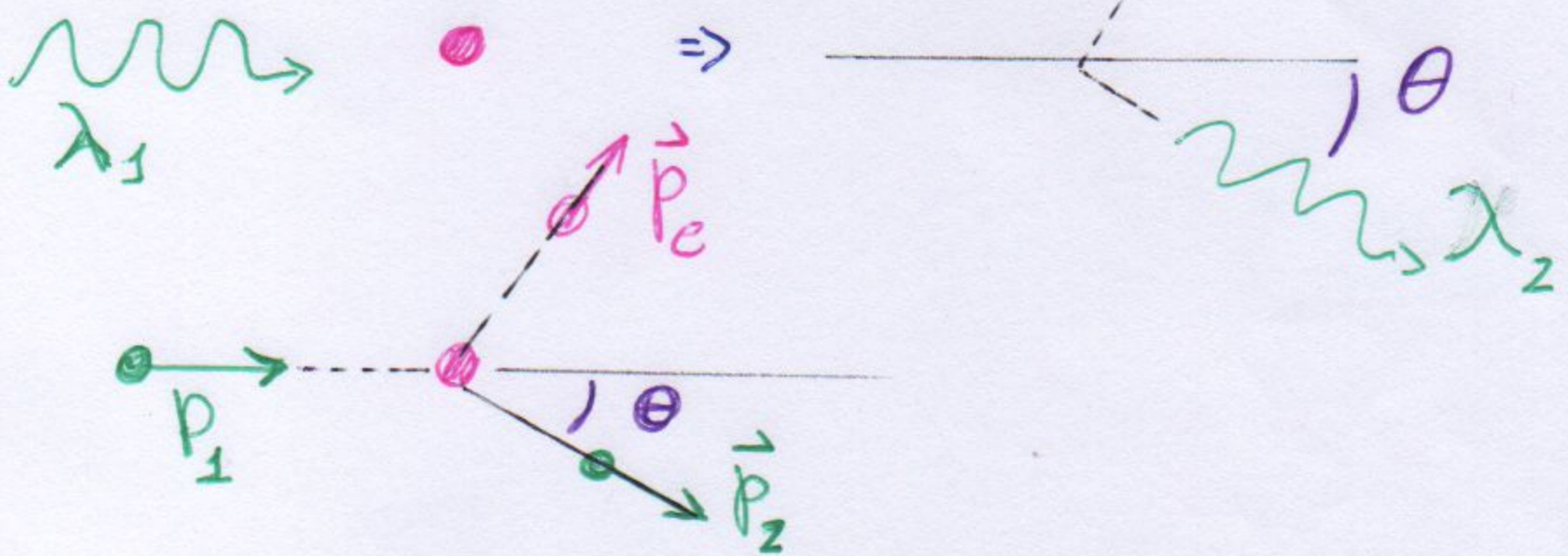
Sabia-se que:



$\lambda$  de raio-X  
de seja, alta energia!  
(keV)

$\theta$   $\bar{n}$  depende  
do material

$E_\nu \gg E_{\text{ligação}} \Rightarrow e^-$  livre!



Fóton:

$$p_1 = \frac{h}{\lambda_1}, \quad E_1 = \frac{hc}{\lambda_1} = p_1 \cdot c$$

$$p_2 = \frac{h}{\lambda_2}, \quad E_2 = \frac{hc}{\lambda_2} = p_2 \cdot c$$

elétron antes  $\vec{p} = 0$ ,  $E = mc^2$   
depois  $\vec{p}_e$ ,  $(m^2c^4 + p_e^2c^2)^{1/2}$

Cons. momento:  $\vec{p}_1 = \vec{p}_2 + \vec{p}_e$

Cons. energia:  $p_1c + mc^2 = p_2c + (m^2c^4 + p_e^2c^2)^{1/2}$

$$\rightarrow \underline{\lambda_2 = \lambda_1 + \lambda_c (1 - \cos \theta)}$$

onde  $\lambda_c \equiv \frac{h}{mc} \sim 0,0243 \text{ \AA} \sim 10^{-12} \text{ m}$

Comprimento de onda Compton

Variac $\tilde{a}$ o relativa:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sim \frac{\lambda_c}{\lambda} \sim \frac{10^{-12}}{\lambda}$$

FM,  $\lambda \sim 3 \text{ metros}$   $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-12}$  desprezível!

luz visível:  $\Delta\lambda/\lambda \sim \frac{10^{-12}}{10^{-7}} \sim 10^{-5}$

raio X:  $\Delta\lambda/\lambda \sim \frac{10^{-12}}{10^{-10}} \sim 10^{-2}$  opa!

Lic $\tilde{a}$ o: f $\acute{o}$ t $\acute{o}$ ns s $\tilde{a}$ o part $\acute{i}$ c $\acute{u}$ las!

"Como conciliar isso com o caracter ondulat $\acute{e}$ rio da radia $\tilde{c}$ o eletromagn $\acute{e}$ tica?"

"A teoria qu $\acute{a}$ ntica que estava por nascer incorpora essa dualidade."