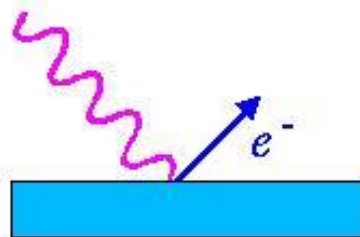


Efeito Fotoelétrico



Emissão de **elétrons** provocada pela incidência de **radiação eletromagnética** sobre algum **material**

Heinrich Hertz 1886 - descoberta do efeito

Wilhelm Hallwachs 1888 - primeiras experiências

J.J.Thomson 1899 - emissão de elétrons

Philip Lenard 1902 - medidas da energia dos elétrons

A. Einstein 1905 - teoria do fóton

R. Millikan 1915 - verificação da teoria de Einstein

<http://www.nobel.se/physics/laureates/>



Prêmio Nobel de Física 1921

"pelos seus serviços para a Física Teórica, e especialmente pela sua descoberta da lei do **efeito fotoelétrico**"

Albert Einstein

(1879- 1955)



Prêmio Nobel de Física 1923

"pelo seu trabalho sobre a carga elementar e sobre o **efeito fotoelétrico**"

Robert Andrews Millikan

(1868- 1953)

Teoria clássica do eletromagnetismo (Maxwell 1865)

Onda Eletromagnética. Ex:

$$\vec{E} = A \hat{\epsilon} \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \delta)$$

Vetor de Poynting:

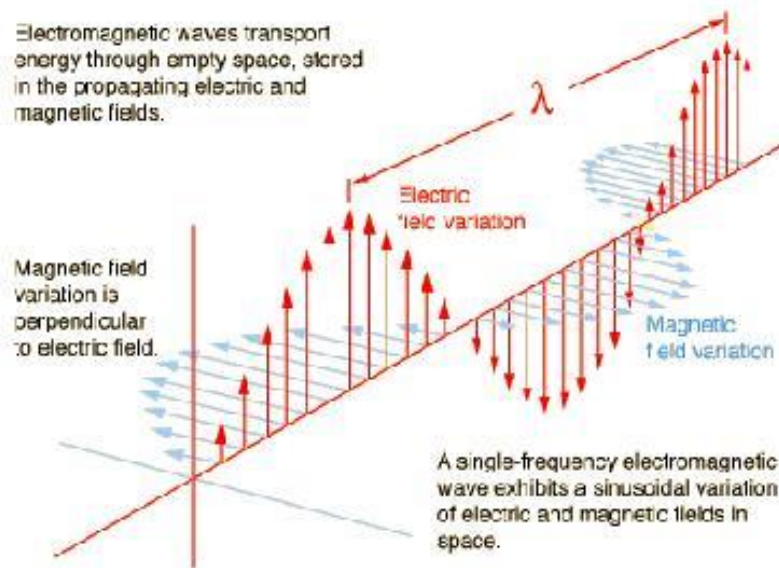
$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B})$$

Intensidade da onda E- M:

$$I = \langle \vec{S} \rangle \cdot \hat{u} = \frac{1}{2} \epsilon_0 A^2$$

A: Amplitude do campo elétrico

Electromagnetic waves transport energy through empty space, stored in the propagating electric and magnetic fields.

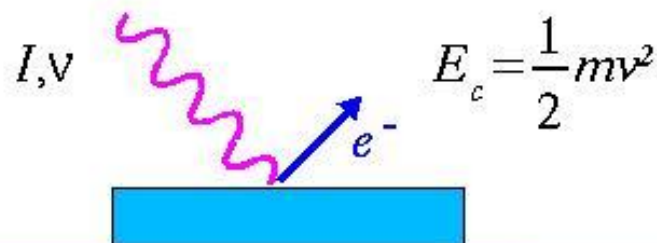


$$I = \frac{\Delta U}{\Delta a \Delta t} \quad (\text{energia/área/tempo})$$

Teoria clássica do E- M

×

Efeito fotoelétrico



Previsões:

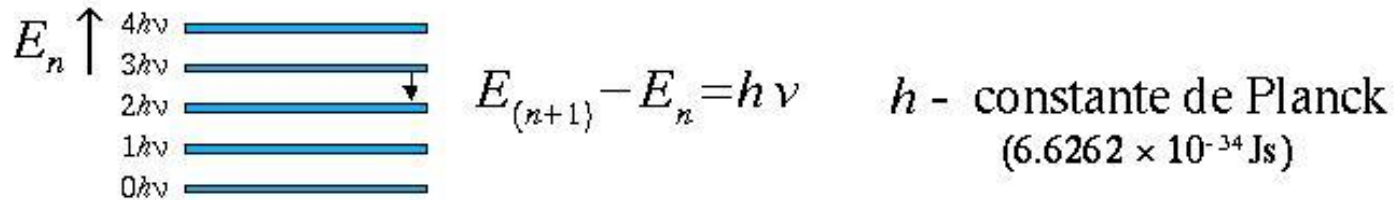
- 1) A energia cinética dos elétrons (E_c) deveria aumentar com a intensidade (I) da onda E- M.
- 2) Deveria “demorar” para haver emissão de elétrons, dependendo de I .
- 3) E_c não deveria depender criticamente da frequência (ν) da onda E- M.

Observações:

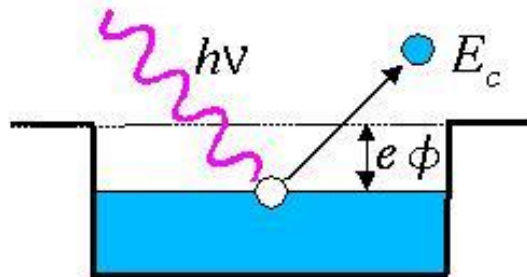
- 1) E_c não varia com I
- 2) Não há atraso perceptível
- 3) Para frequências baixas não ocorre e.f.e.

A teoria de Einstein explica o e.f.e.

Planck (1900), quantização do osc. harmônico: $E_n = nh\nu$
explica a radiação de corpo negro



Einstein (1905), fóton: $E_f = h\nu$



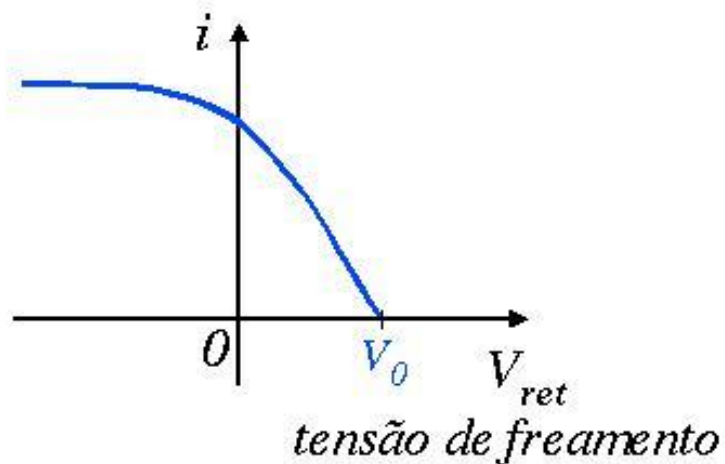
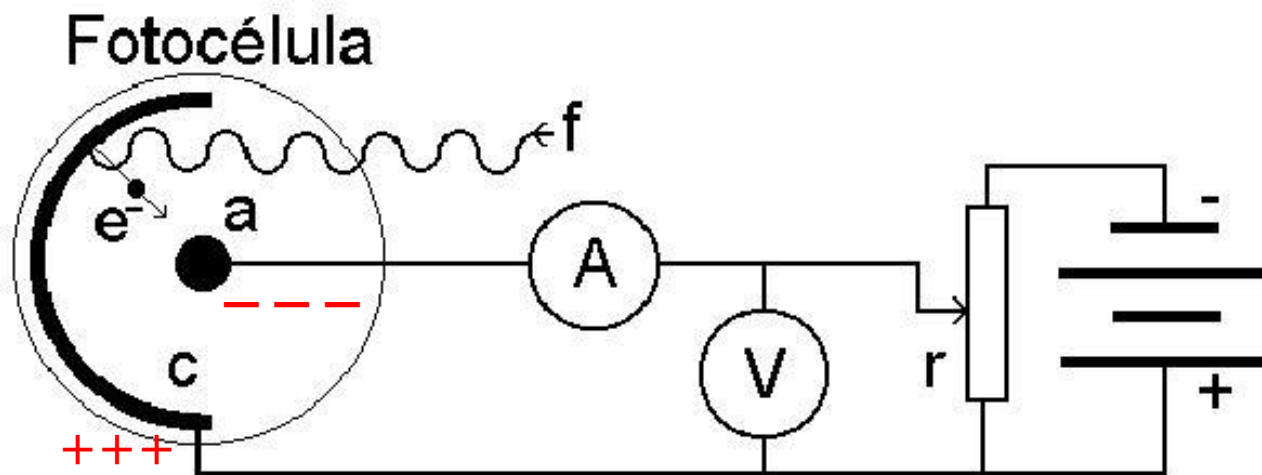
Conservação de energia:

$$E_c^{max} = h\nu - e\phi$$

e : carga do elétron (1.6022×10^{-19} C)
 ϕ : função de trabalho (V)

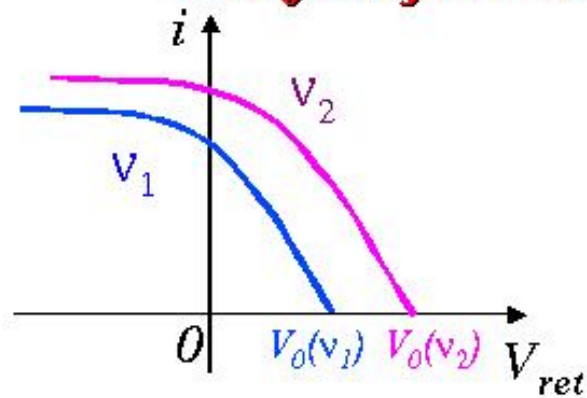
- 1) ✓
- 2) ✓
- 3) ✓

Como medir a energia cinética máxima dos foto-elétrons

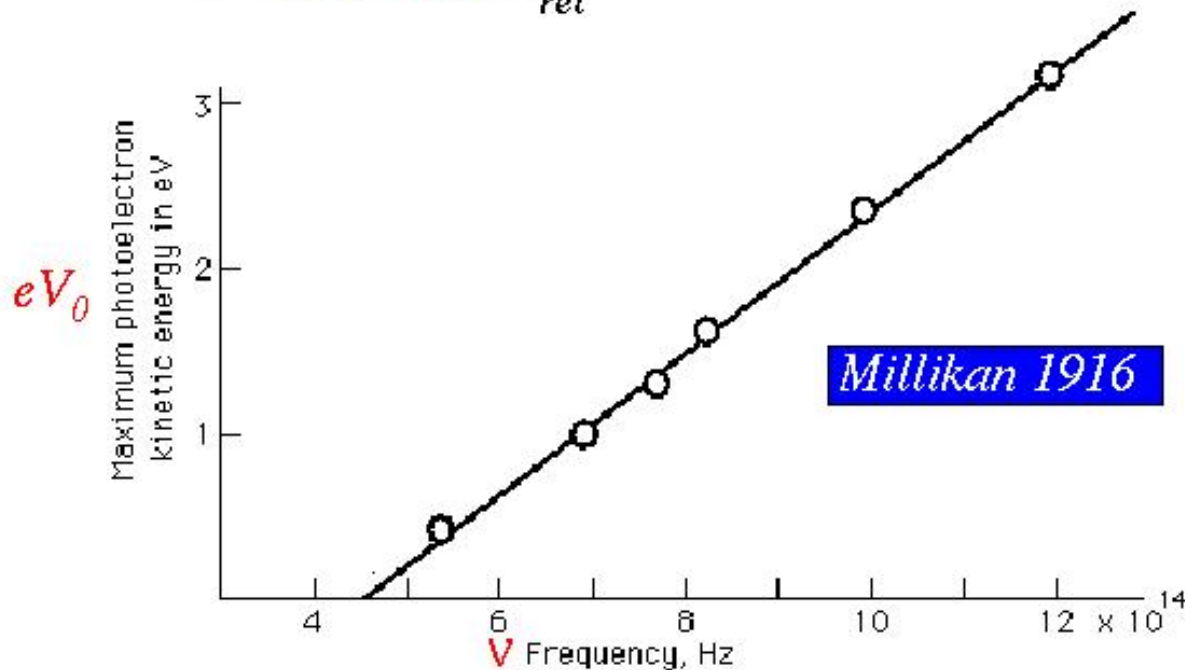


$$E_c^{máx} = eV_0$$

Verificação das previsões de Einstein

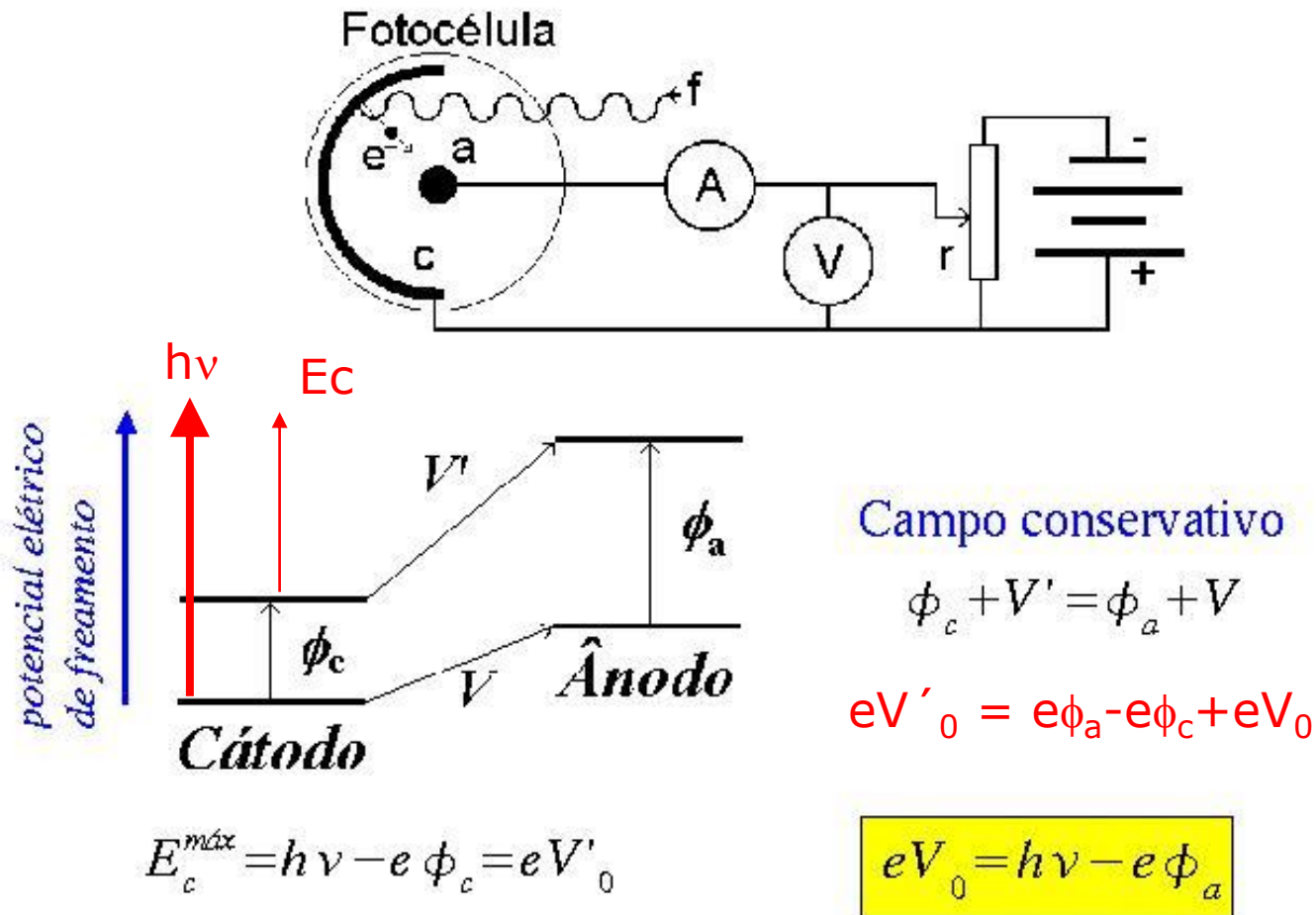


$$eV_0(\nu) = h\nu - e\phi$$



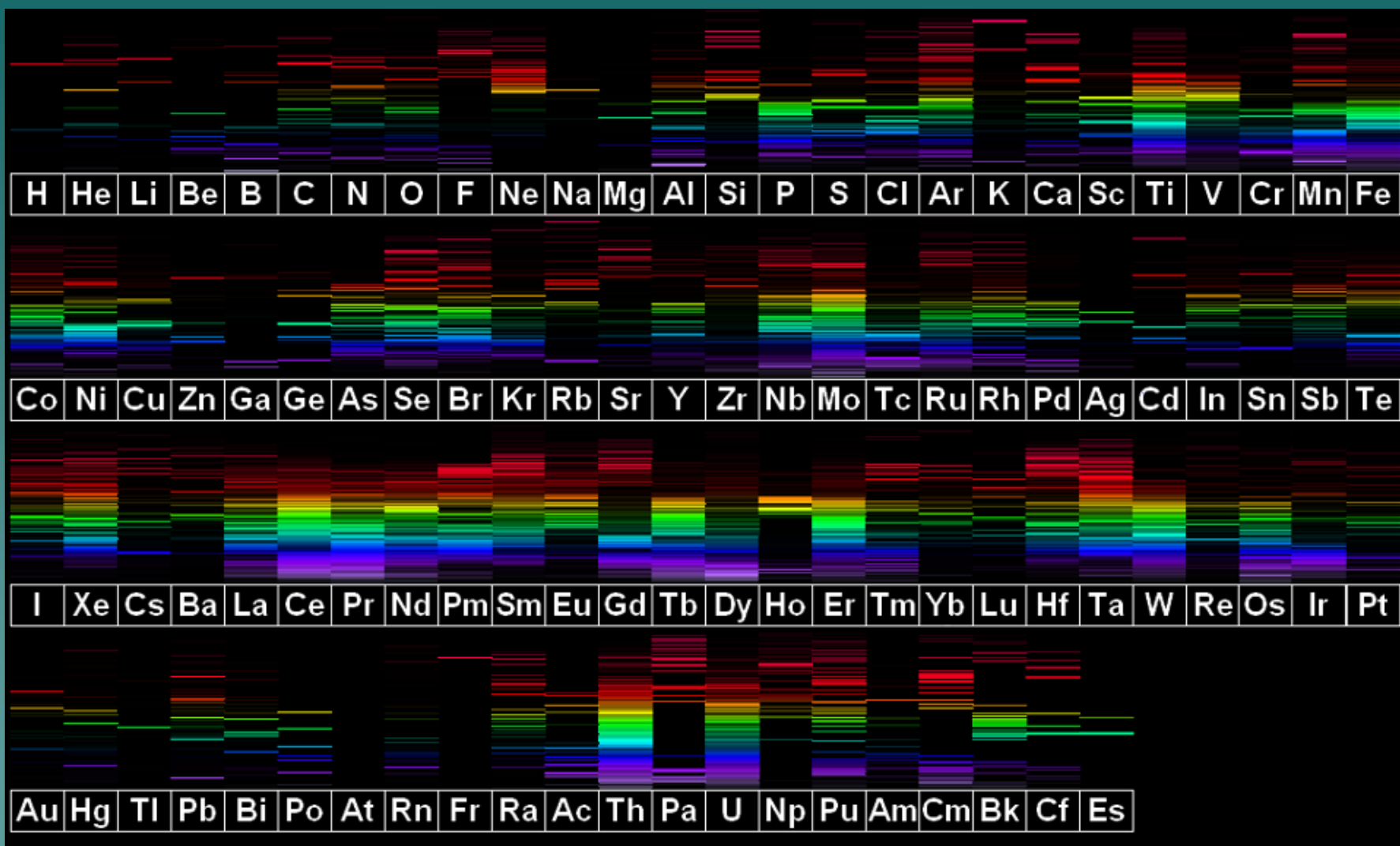
Millikan 1916

Considerações sobre o “potencial de contato”: $\phi_a - \phi_c$



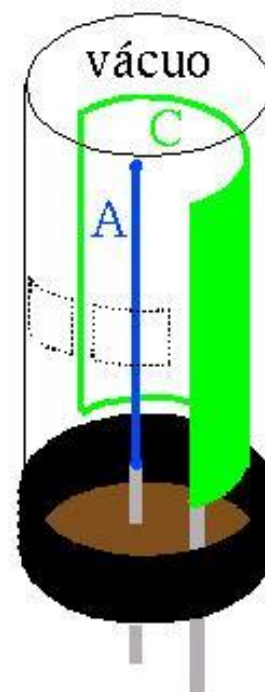
Equipamento para medida do efeito fotoelétrico





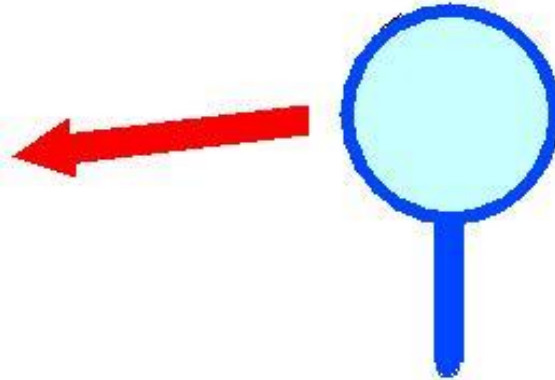
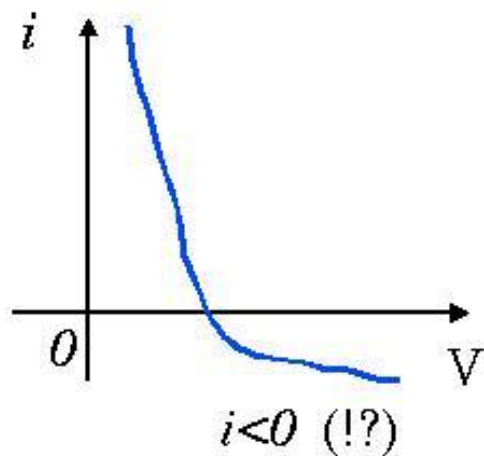
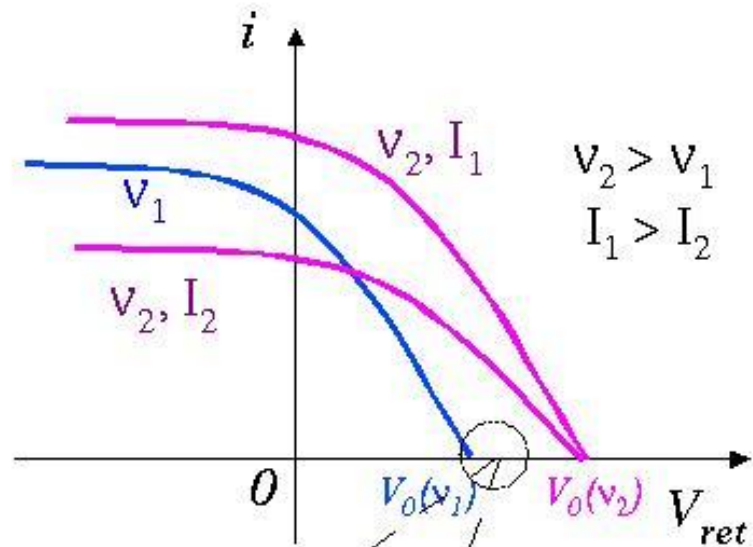
H	He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe
Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te
I	Xe	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es					

A Célula Fotoelétrica

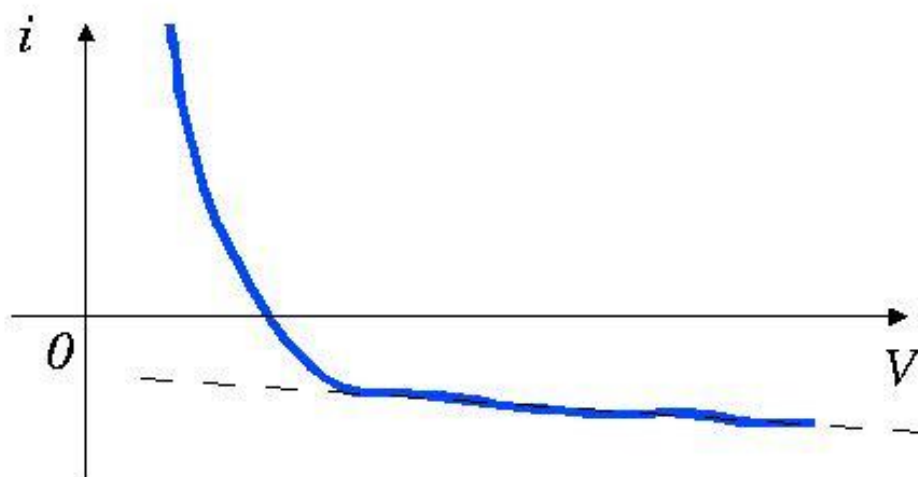


Procedimentos - Parte I

- 0) Ler a apostila
- 1) Identificar as raia do Hg e as ligações do circuito elétrico etc.
- 2) Fazer medidas “interessantes” seguindo sugestões da apostila
- 3) Tentar entender tudo



Correntes espúreas



$$i = i_c + i_a + i_f$$

Corrente medida

Corrente de cátodo
(a que interessa)

Corrente de ânodo
($\approx \text{cte} < 0$)

Corrente de “fundo”:
fuga ($= -V/R_f$) +
ambiente + ...

Obtenção de $i_c(V)$

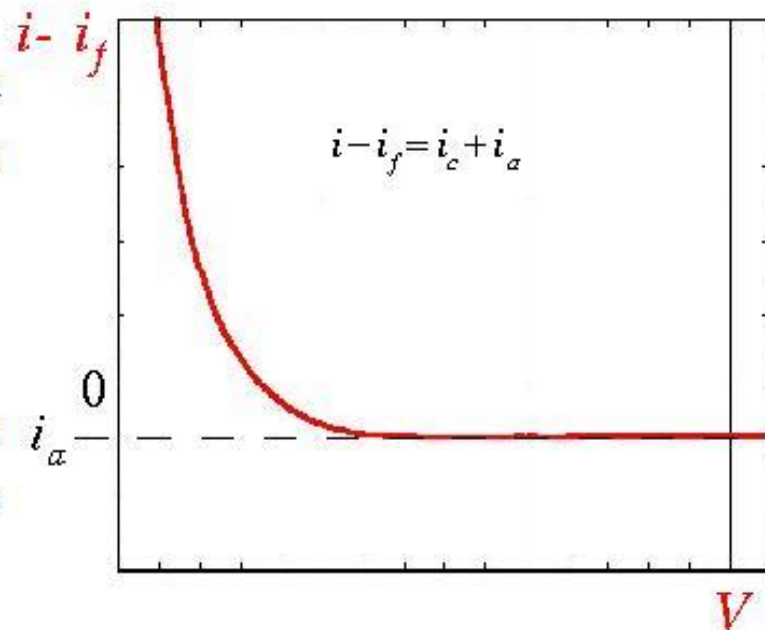
1) Medir i_f : a corrente de “fundo”, isto é, a que se obtém bloqueando a saída da Lâmpada de Hg, e que corresponde a:

$$i_f = i_{amb} - \frac{V}{R_f} + \dots$$

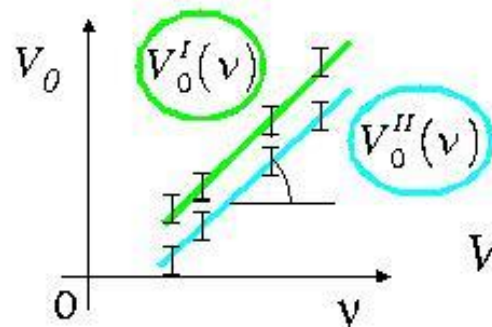
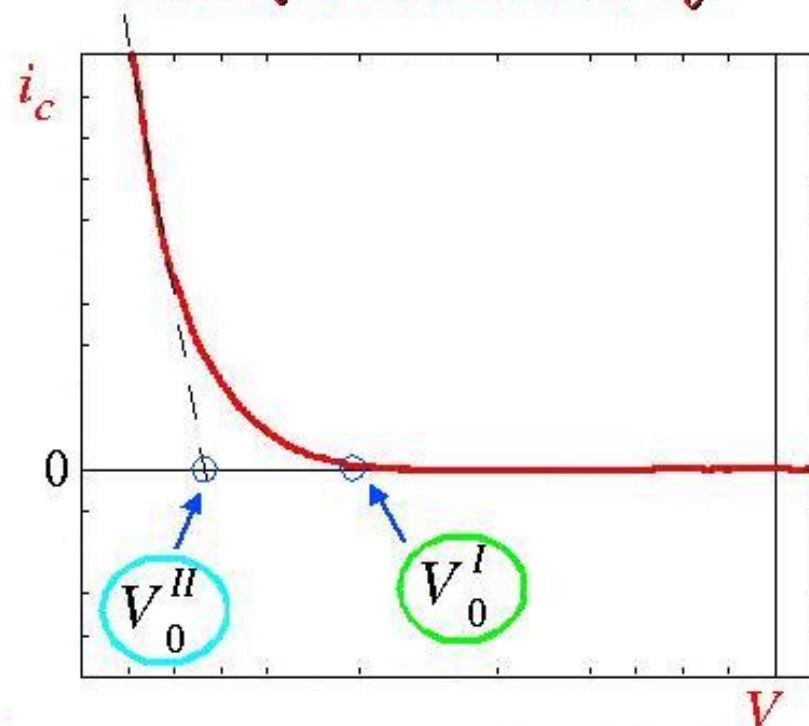
2) Subtrair i_f ponto a ponto (em função de V) das medidas de cada raia para obter:

$$i - i_f = i_c + i_a$$

3) Ajustar uma constante (i_a) para a região de $V > V_0$ onde supõe-se que $i_c = 0$, e subtrair.



Mas afinal, onde está V_0 ?



Erro sistemático grande em ϕ_a ,
mas possivelmente
tolerável no coef. angular:

$$V_0 = \frac{h}{e} \nu - \phi_a$$

$$\boxed{\frac{\Delta V_0}{\Delta \nu} = \frac{h}{e}}$$

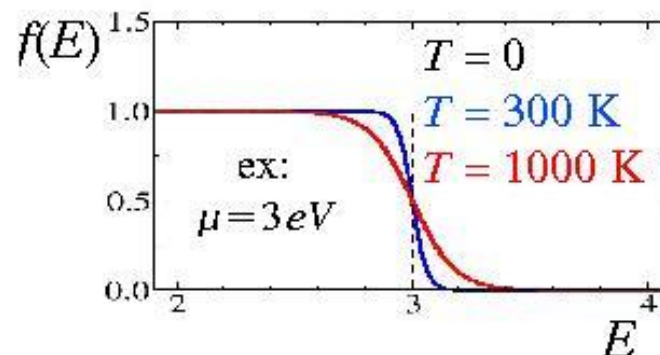
Mas..., por quê a curva de $i(V)$ é assintótica?

Era tudo mentira! Não existe energia cinética máxima dos elétrons (bom..., quase: a não ser no zero absoluto, $T = 0$ K).

Complicou. Elétrons são férmions, e obedecem a estatística de **Fermi-Dirac**. A probabilidade de ocupação de um estado de energia E depende da temperatura e do potencial químico μ segundo a fórmula:

$$f(E) = \frac{1}{\frac{e^{E-\mu}}{kT} + 1}$$

k = constante de Boltzman



A curva de $i(V)$ depende de T e da *geometria* da fotocélula

Referências históricas:

R.H. Fowler, Phys. Rev. **38**, 15 (1931)

L.A. DuBridge, Phys. Rev. **39**, 108 (1931)

L.A. DuBridge, Phys. Rev. **43**, 727 (1933) *

* Xerox PASTA 14

Curvas teóricas para o efeito fotoelétrico

W.W. Roehr, Phys. Rev. 44, 866 (1933) *

ENERGY DISTRIBUTION OF PHOTOELECTRONS

867

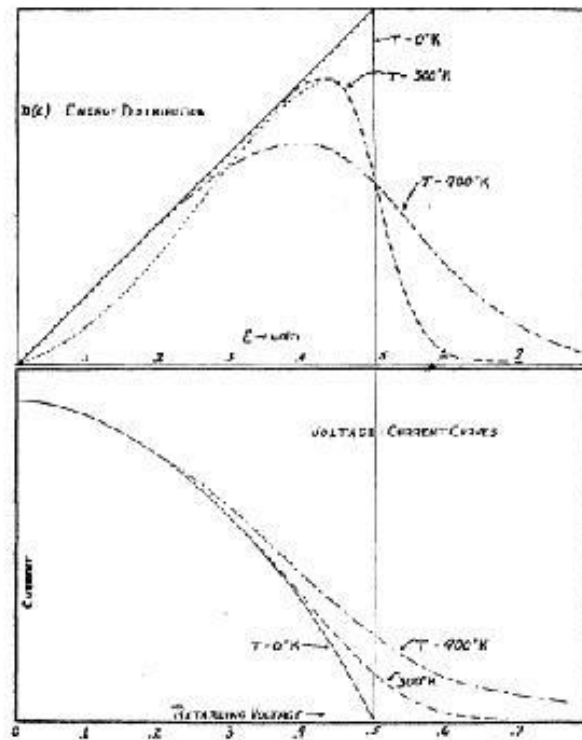
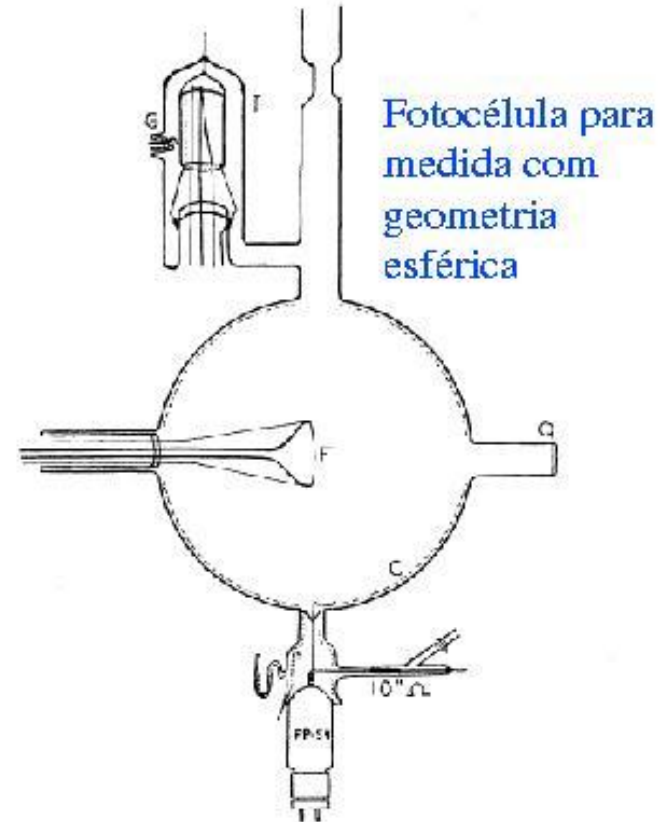


FIG. 1. Theoretical energy distribution and voltage-current curves for three temperatures.



Curvas de corrente versus tensão para diversos λ e temperaturas

ENERGY DISTRIBUTION OF PHOTOELECTRONS

869

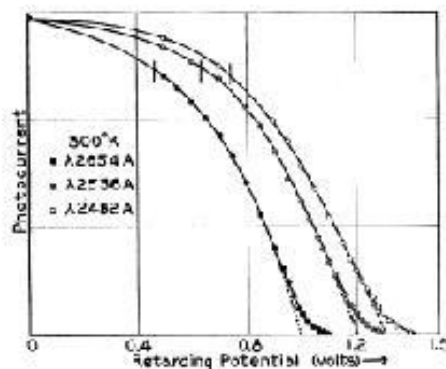


FIG. 4. Current-voltage curves for room temperature.

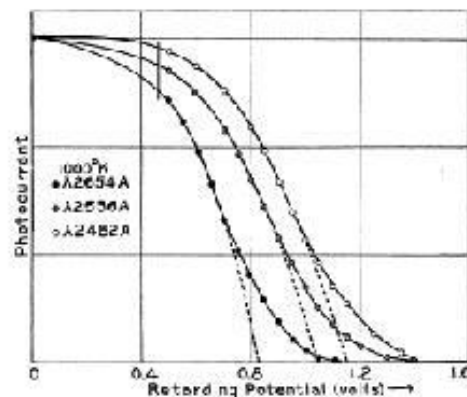


FIG. 5. Current-voltage curves for 1000°K.

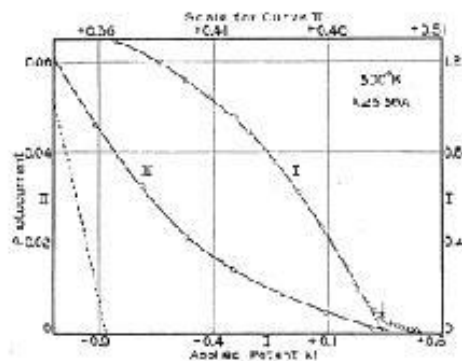
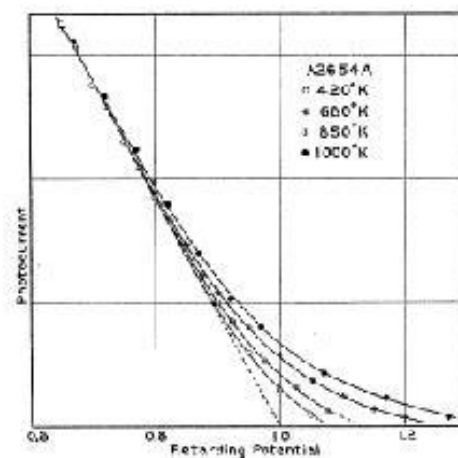
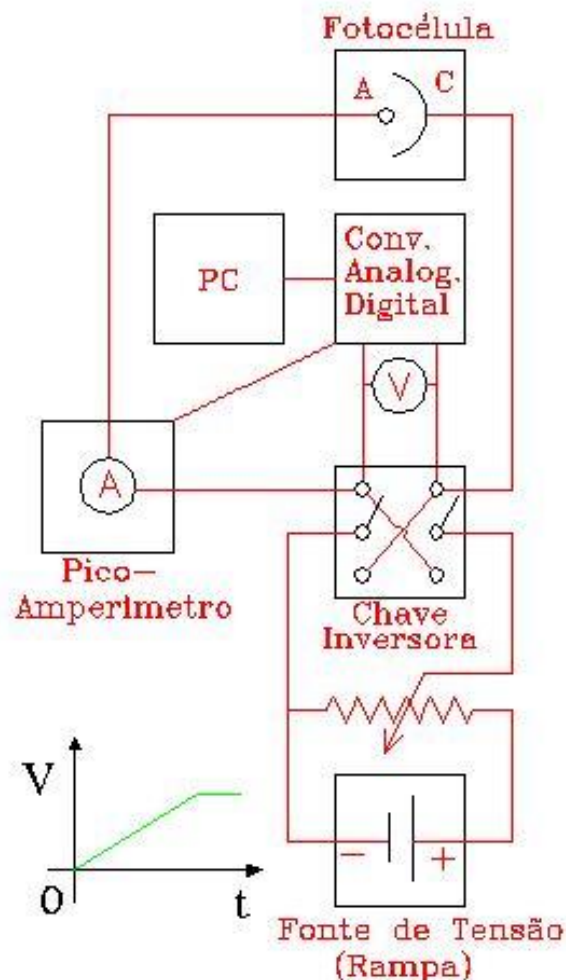


FIG. 6. I. Current-voltage curve for frequency far from threshold. II. Enlargement of tail of Curve I showing asymptotic approach.



W.W. Roehr,
Phys. Rev. **44**,
866 (1933)

Procedimentos - Parte II



- 0) Verificar circuito (polaridades, etc.), e funcionamento do programa de aquisição.
- 1) Calibrar o CAD (*uma vez*)
- 2) Focalizar uma raia do Hg na fotocélula.
- 3) Escolher escala do pico- amp.
- 4) Disparar rampa e em seguida a aquisição.
- 5) Guardar os dados e passar para outra (2).

