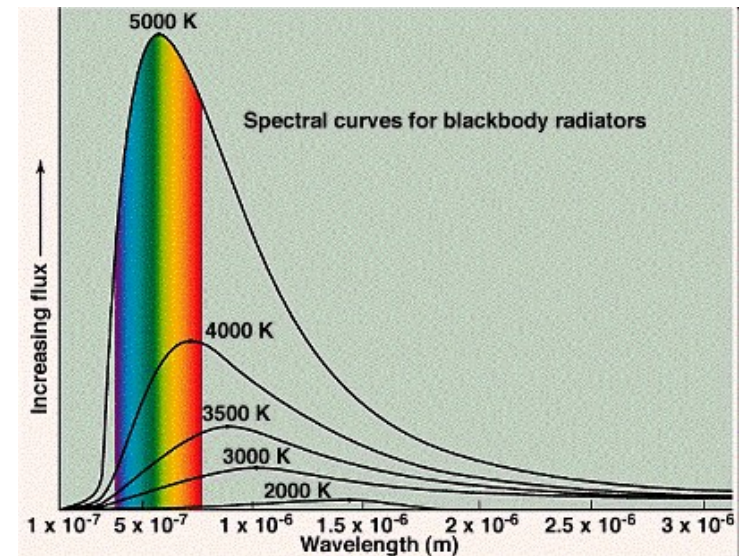
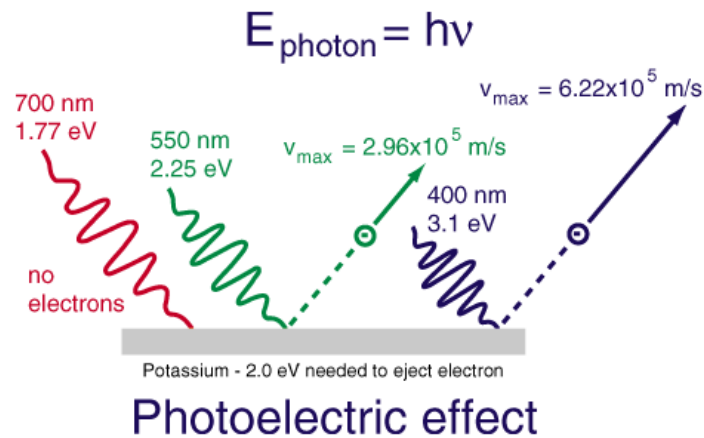
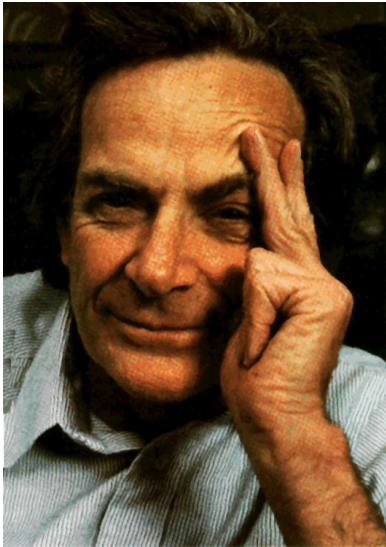


(Re)Visão de Física Moderna

- Experimentos e problemas históricos:
 - Radiação térmica.
 - Efeito fotoelétrico.



Sobre os fundamentos da Mecânica Quântica



“Não leve esta aula muito a sério... apenas relaxe e desfrute dela. Vou contar para vocês como a natureza se comporta. Se você admitir simplesmente que ela tem esse comportamento, você a considerará encantadora e cativante. Não fique dizendo para si próprio: ‘Mas como ela pode ser assim?’ porque nesse caso você entrará em um beco sem saída do qual ninguém escapou ainda. Ninguém sabe como a natureza pode ser assim”.

Richard Feynman (1918-1988)

Prêmio Nobel de Física 1965

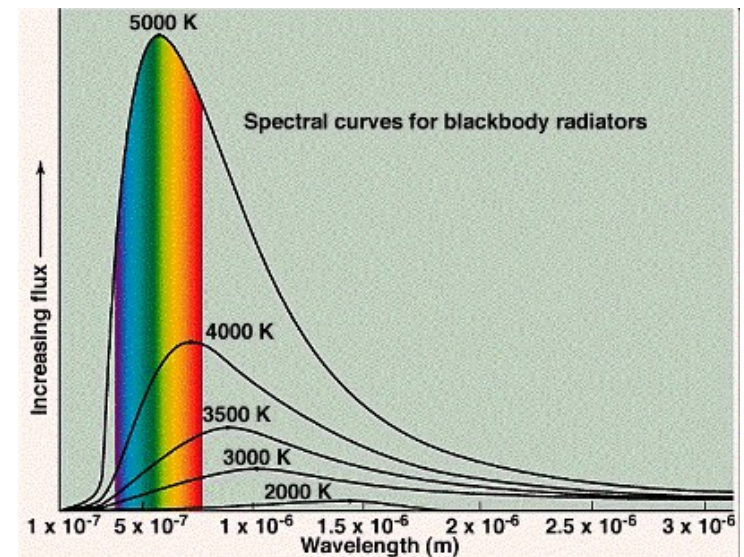
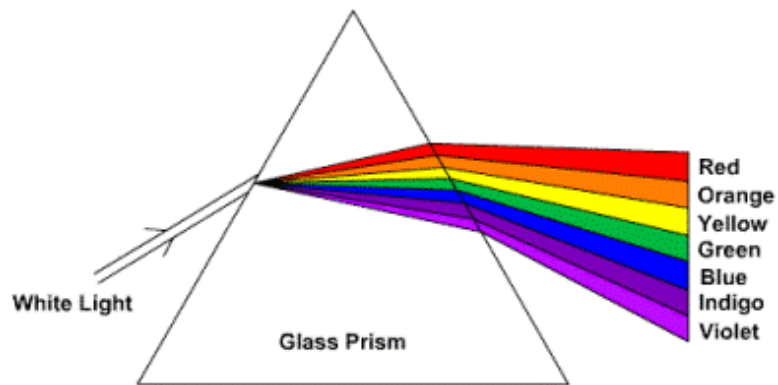
Alguns problemas e experimentos históricos

Séculos XIX-XX

- **Radiação térmica:** catástrofe do ultravioleta, **modelo de Planck**.
- **Fótons:** **efeito fotoelétrico**, **modelo de Einstein**, experimentos de Millikan; **efeito Compton**.
- **Ondas de matéria:** hipótese de de Broglie, experimento de Davisson-Germer, **difração de elétrons**.
- **Modelos atômicos:** espectros de raias; modelos de Rutherford, **Bohr**, Sommerfeld; átomo de hidrogênio; **equação de Schrödinger**.
- **Spin do elétron:** experimento de Stern-Gerlach, efeito Zeeman, átomos multieletrônicos.
- **Calor específico dos sólidos:** lei de Dulong-Petit, modelo de Einstein, modelo de Debye.

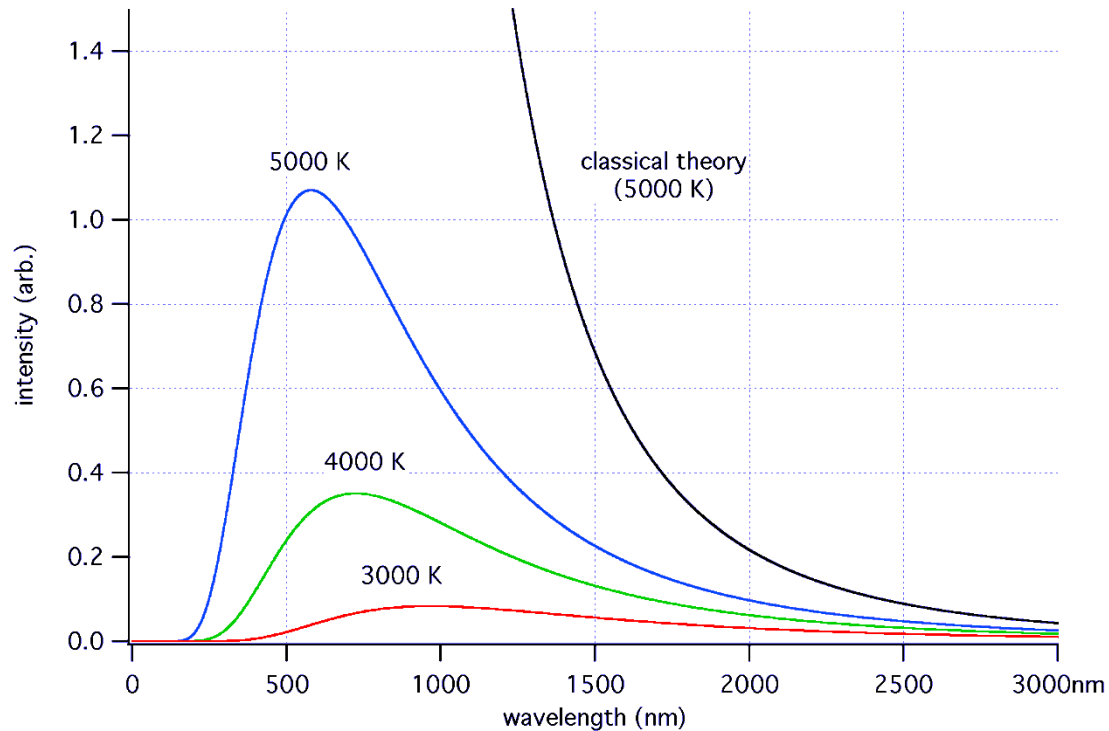
Espectros de radiação térmica

Espectros contínuos de radiação eletromagnética:



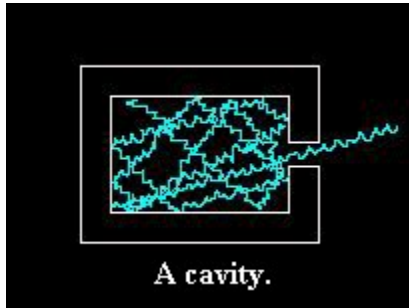
Espectros de radiação térmica

A “catástrofe do ultravioleta”:



Espectros de radiação térmica

A lei da radiação térmica de Planck:



http://rugth30.phys.rug.nl/quantummechanics/black_body.htm

Hipótese essencial: Radiação produzida por osciladores com **energia quantizada**.

$$\varepsilon = h\nu$$

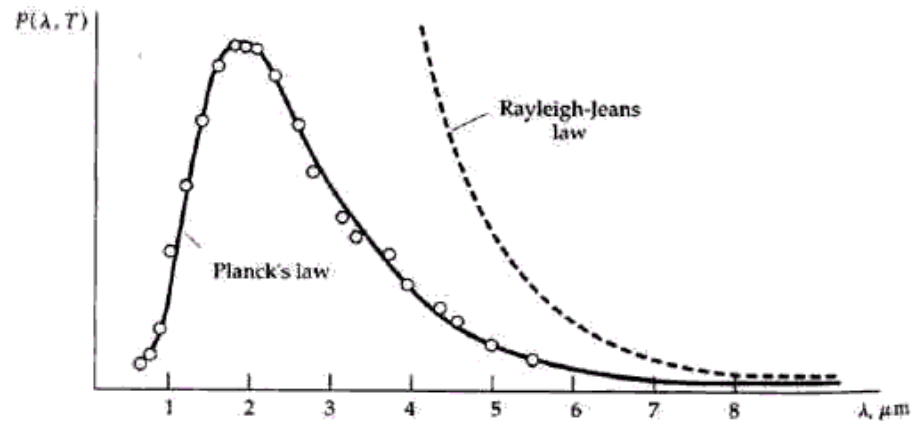
Associação posterior: quantização da radiação eletromagnética → **fótons**.



Max Planck (1858-1947) – Nobel de Física 1918

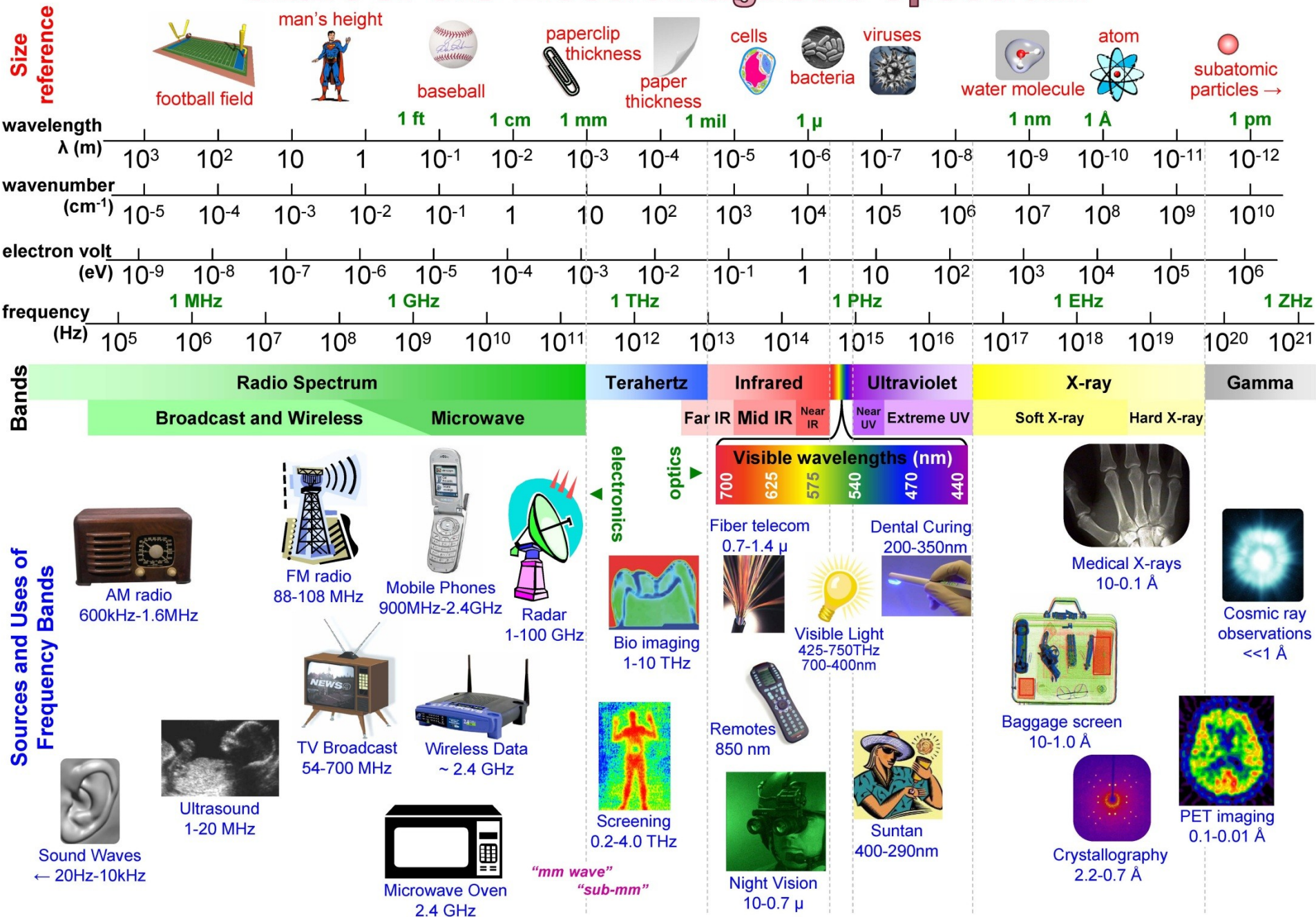
Constante de Planck:

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



http://faculty.virginia.edu/consciousness/new_page_6.htm

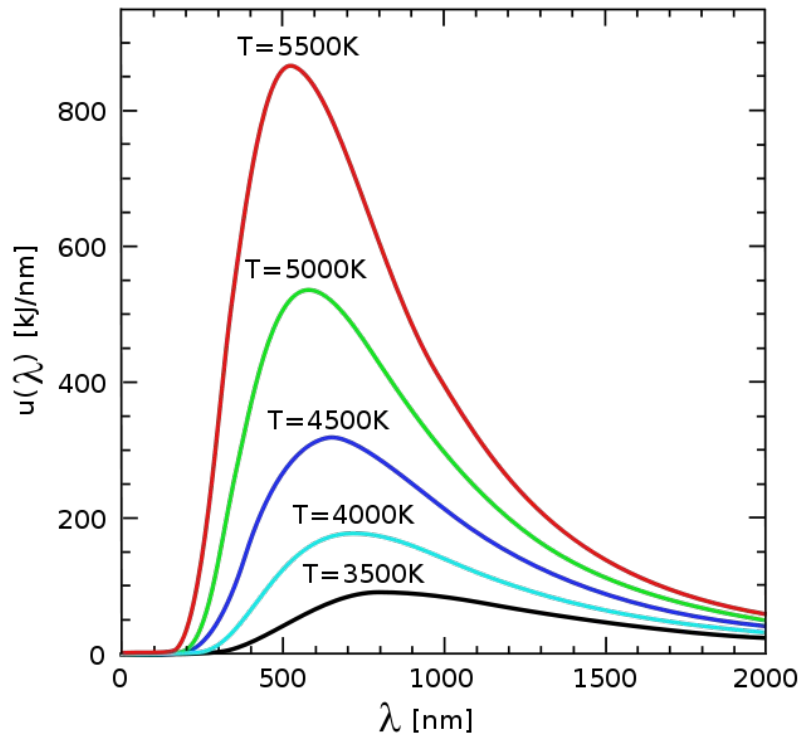
Chart of the Electromagnetic Spectrum



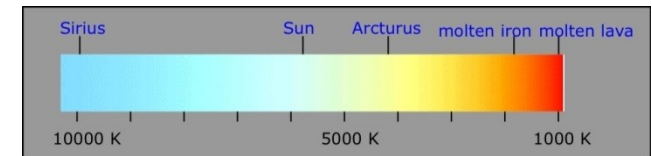
$$\lambda = 3 \times 10^8 / \text{freq} = 1 / (\text{wn} \times 100) = 1.24 \times 10^{-6} / \text{eV}$$

Espectros de radiação térmica

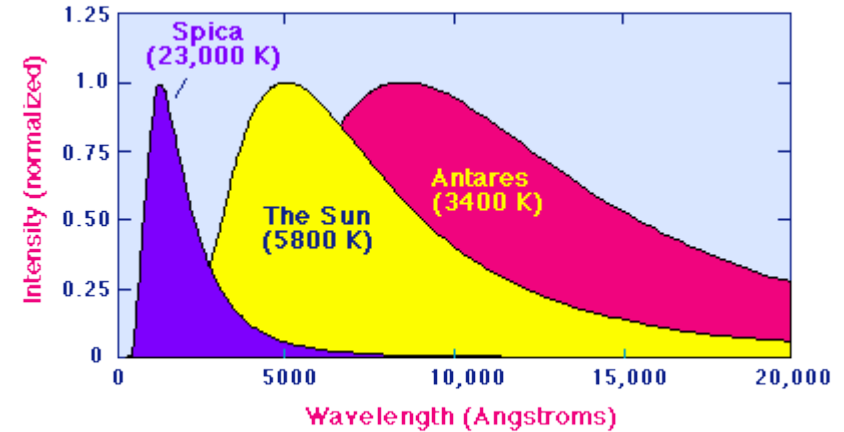
Lei do deslocamento de Wien: $\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$



http://en.wikipedia.org/wiki/Wien_displacement_law_constant



<http://www.chem1.com/acad/webtext/atoms/atpt-2.html>



<http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/radiation.html>

Dispositivos fotossensíveis

Células fotoelétricas

- **Células fotoemissivas:**



- ✓ Ejeção de elétrons de uma superfície iluminada (de metal ou semicondutor).

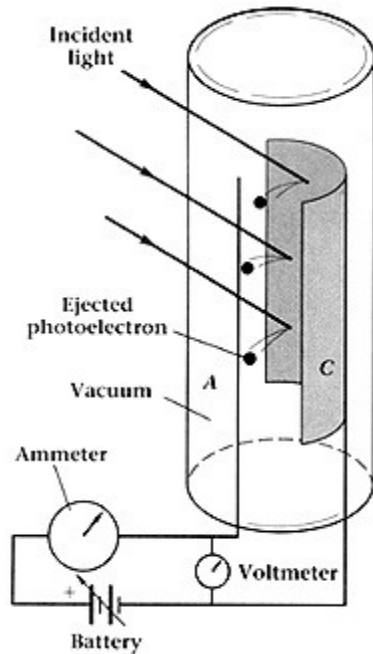
- **Células fotovoltaicas:**

- ✓ Geração de f.e.m. causada pela incidência luminosa.

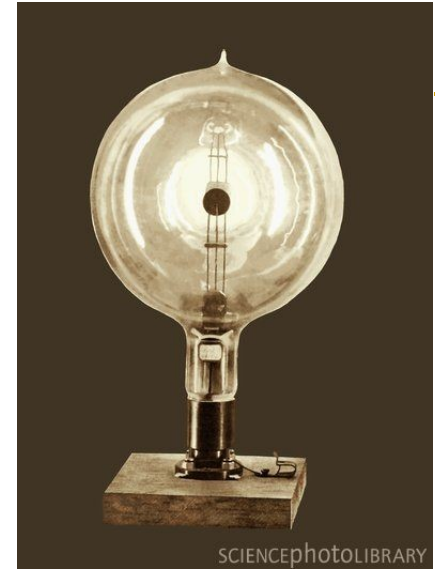
- **Células fotocondutivas:**

- ✓ Variação da resistência elétrica em função da intensidade de luz.

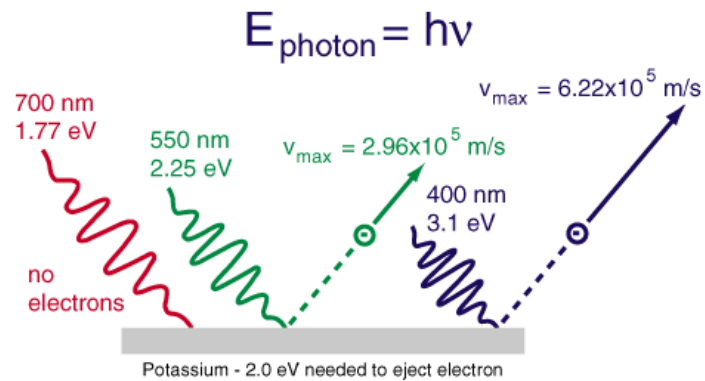
Efeito fotoelétrico



http://rst.gsfc.nasa.gov/Intro/Part2_2.html



<http://www.sciencephoto.com/media/363628/enlarge>



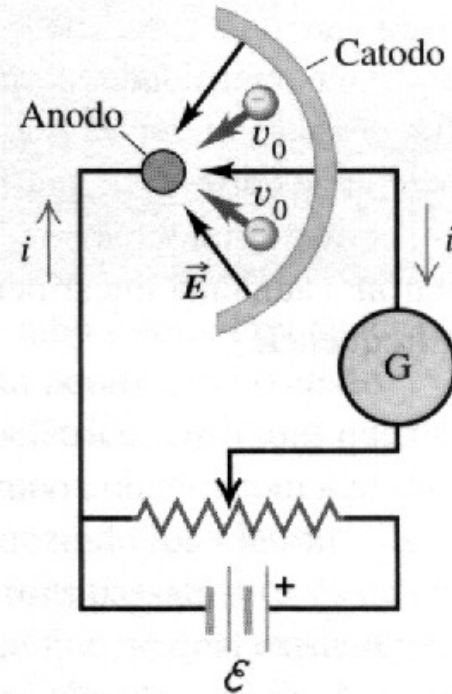
Photoelectric effect

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod1.html#c2>

Efeito fotoelétrico

Potencial de corte:

- V_o = ddp necessária para frear os fotoelétrons mais rápidos.
- eV_o = máxima energia cinética dos fotoelétrons.



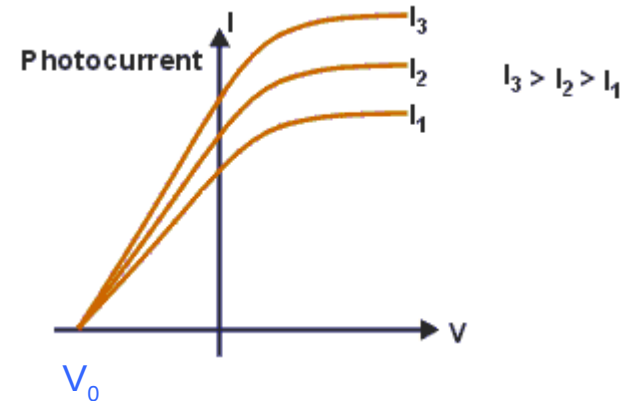
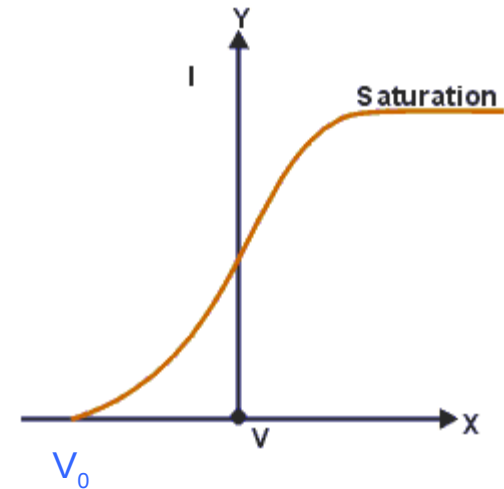
Efeito fotoelétrico

Medida da fotocorrente e do potencial de corte :

- V_0 : não depende da intensidade.
- V_0 : varia com a frequência.



Existe uma **frequência de corte**.



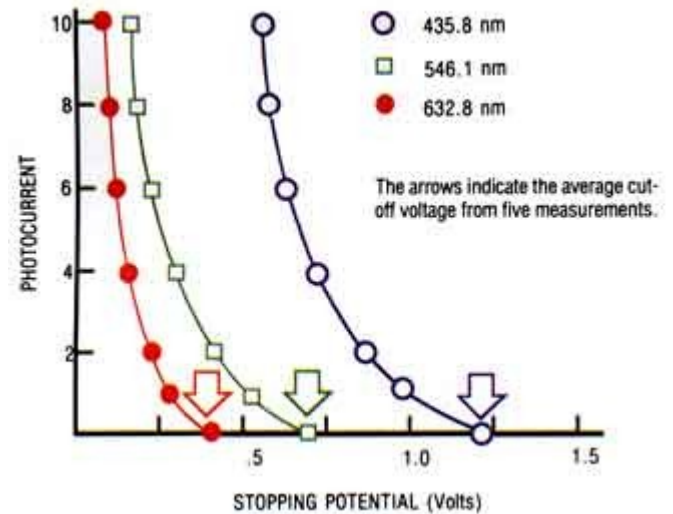
Efeito fotoelétrico

Medida da fotocorrente e do potencial de corte :

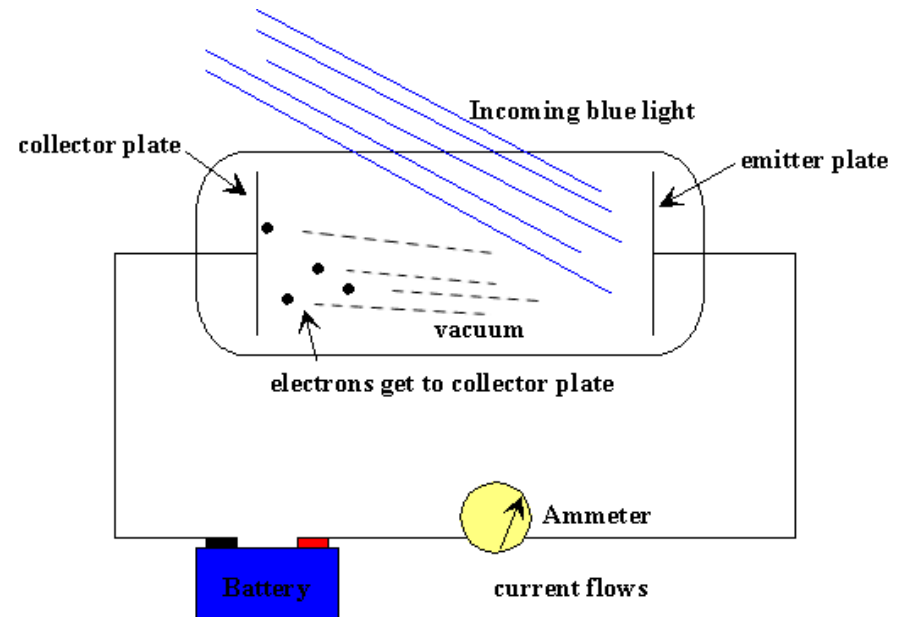
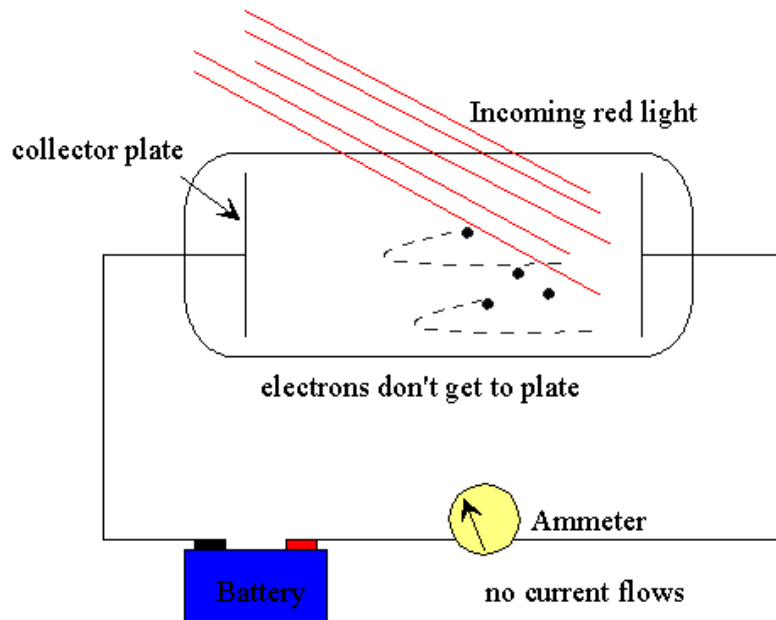
- V_0 : não depende da intensidade.
- V_0 : varia com a frequência.



Existe uma **frequência de corte**.



Efeito fotoelétrico



Efeito fotoelétrico

Problemas com a Física Clássica

- 1) O aumento da intensidade da radiação incidente deveria resultar no aumento do potencial de corte.
- 2) O efeito fotoelétrico deveria ocorrer para qualquer frequência, dependendo apenas da intensidade da radiação incidente.
- 3) Deveria existir um intervalo de tempo mensurável entre a absorção da energia da radiação e a emissão do elétron.

Efeito fotoelétrico

O problema da inexistência de retardo temporal:

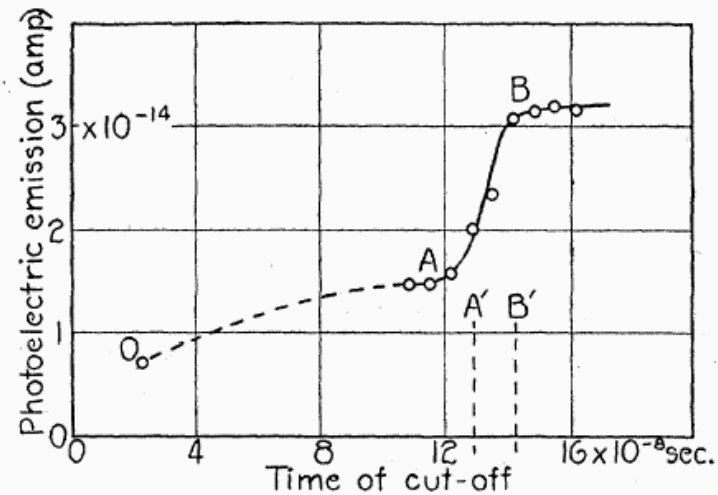
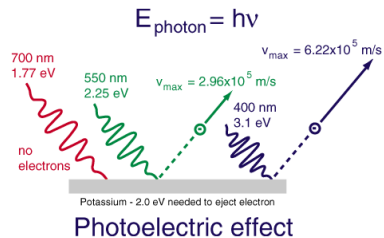


Fig. 3. Photoelectric currents to the collector for various times of cut-off after beginning of spark.

Efeito fotoelétrico – modelo de Einstein

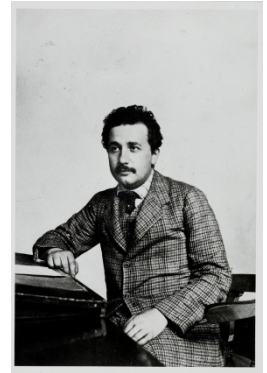


$$K = h \nu - w$$

Energia cinética do fotoelétron

Energia do quantum de luz incidente

Trabalho para remover o elétron do metal



Albert Einstein (1879-1955)
Nobel de Física 1921

$$eV_o = K_{max} = h \nu - w_o$$

Potencial de corte

Energia cinética máxima do fotoelétron

Função trabalho

Efeito fotoelétrico – modelo de Einstein

Solução dos problemas:

- K_{\max} (e portanto V_o) não depende da intensidade da iluminação: a intensidade está relacionada com **número** de quanta incidentes e **não** com a **energia** de cada quantum.
- Existência de uma frequência de corte:
 $K_{\max} = 0 \Rightarrow h\nu_o = w_o$;
 $\nu < \nu_o \Rightarrow$ não há emissão de elétrons.
- Ausência de retardamento no processo: a absorção do quantum é **instantânea**, quando este tem energia suficiente para ejetar o elétron.

*“Sobre um ponto de vista **heurístico** acerca da emissão e transformação da luz.”*
Ann. Phys. 17, 132 (1905)

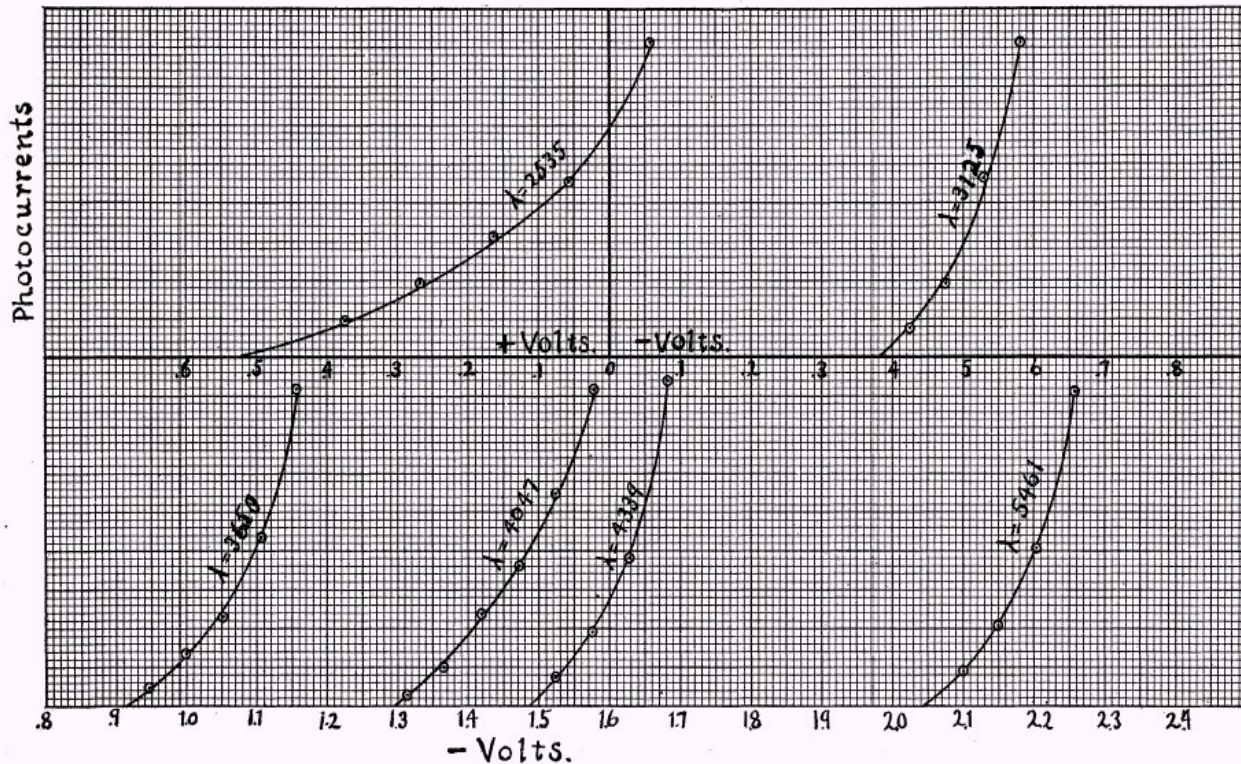
Efeito fotoelétrico

Verificação experimental - Millikan:



Robert Millikan (1868-1953)
Nobel de Física 1923

Fig. 5.



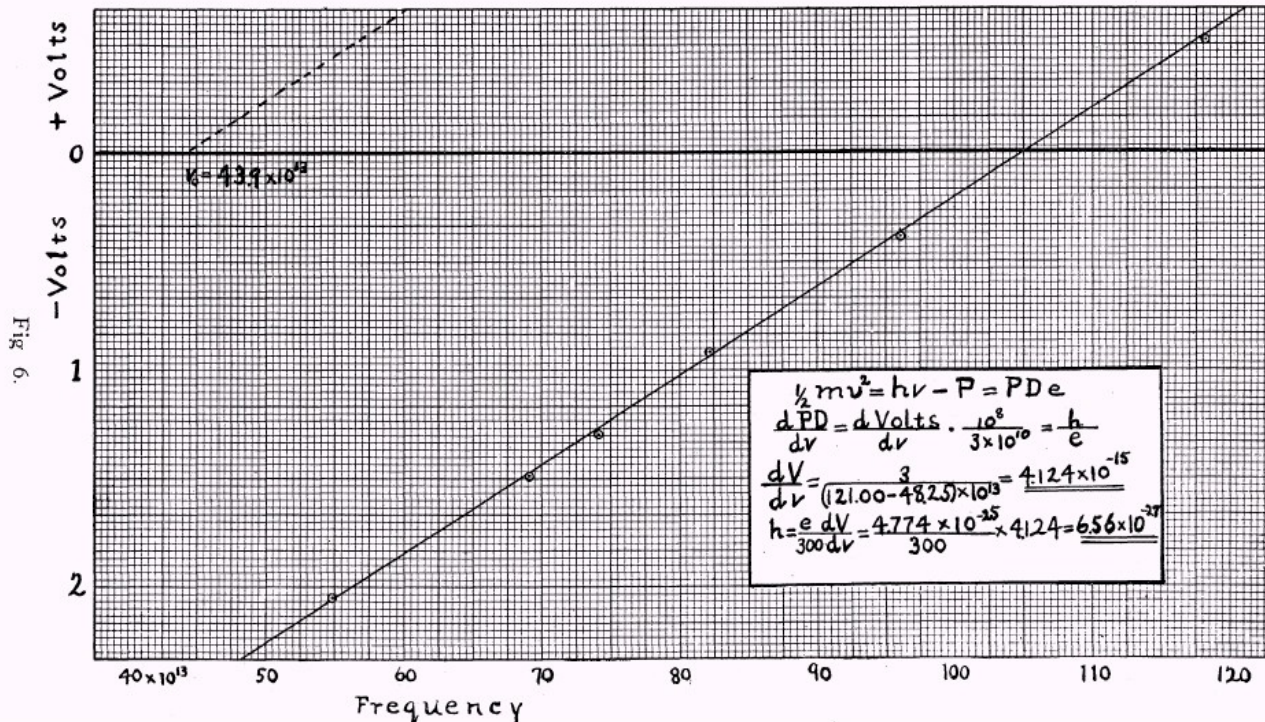
"A direct photoelectric determination of Planck's ' h '"
[Phys. Rev. 7, 355 \(1916\)](#)

Efeito fotoelétrico

Verificação experimental - Millikan:



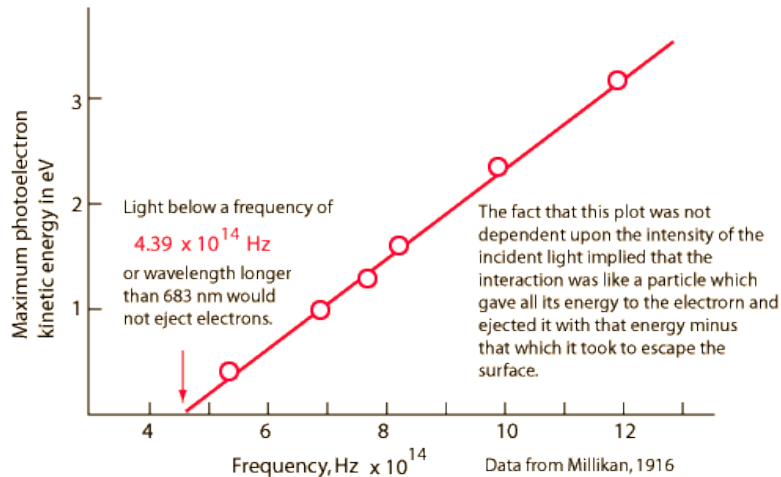
Robert Millikan (1868-1953)
Nobel de Física 1923



"A direct photoelectric determination of Planck's 'h' "
Phys. Rev. 7, 355 (1916)

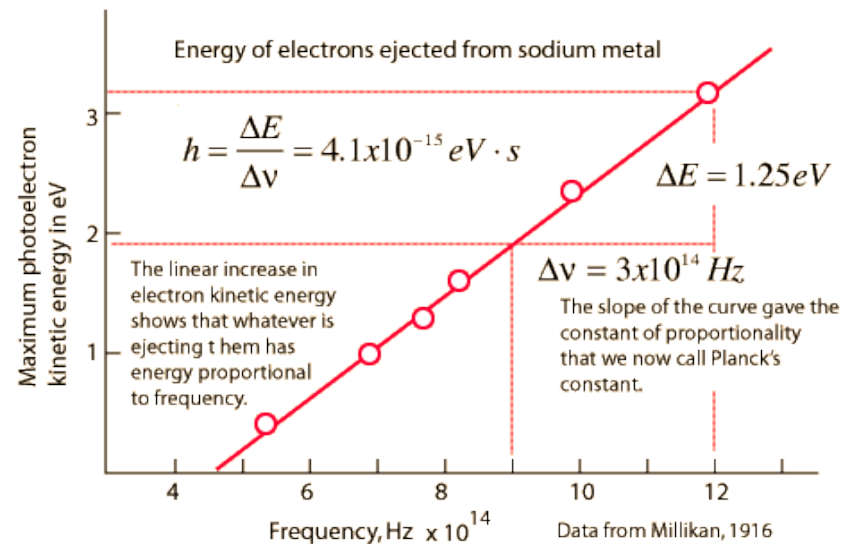
Efeito fotoelétrico

Dependência do potencial de corte com a frequência:



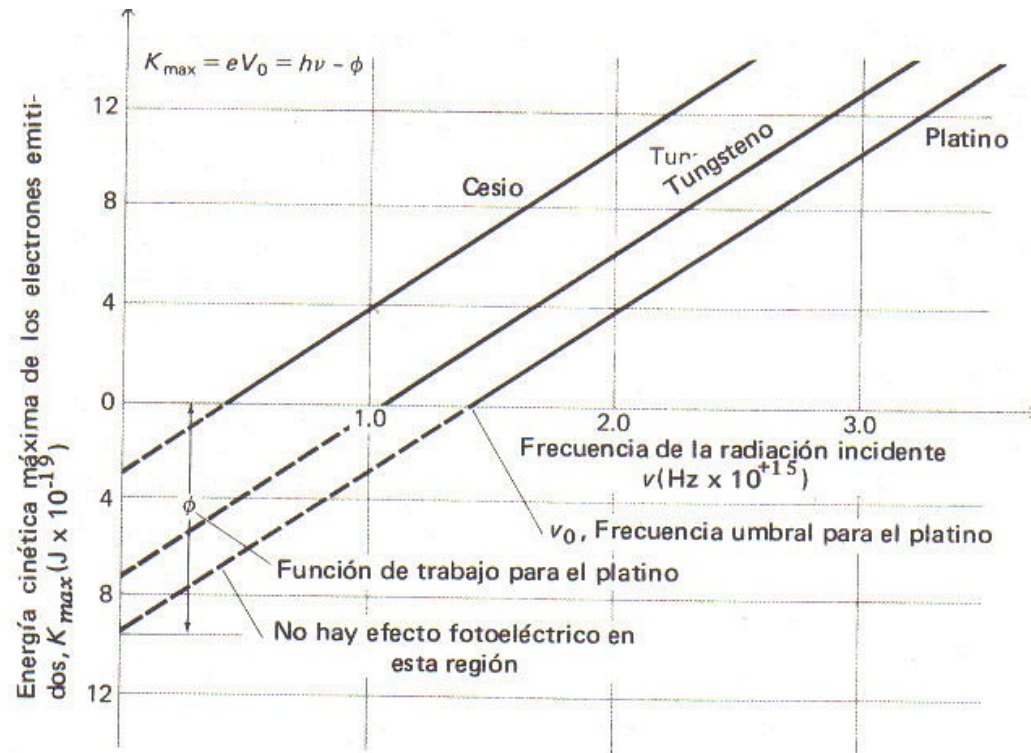
$$V_o = \frac{h}{e} \nu - \frac{w_o}{e}$$

Inclinação da curva $V_o \times \nu$



Efeito fotoelétrico

Dependência do potencial de corte com a frequência:



Bibliografia:

- *“Materiais e Dispositivos Eletrônicos”*, Sergio M. Rezende, 2ª edição. São Paulo: Livraria da Física, 2004.
- *“Ciência e Engenharia de Materiais – uma Introdução”*, W. D. Callister Jr., 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- *“Física Quântica. Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas”*, R. Eisberg, R. Resnick, 6ª ed., Rio de Janeiro: Editora Campus, 1979.
- *“Sobre um ponto de vista heurístico acerca da emissão e transformação da luz”*, Ann. Phys. **17**, 132 (1905).
- *“A direct photoelectric determination of Planck’s ‘h’ ”*, Phys. Rev. **7**, 355 (1916).