

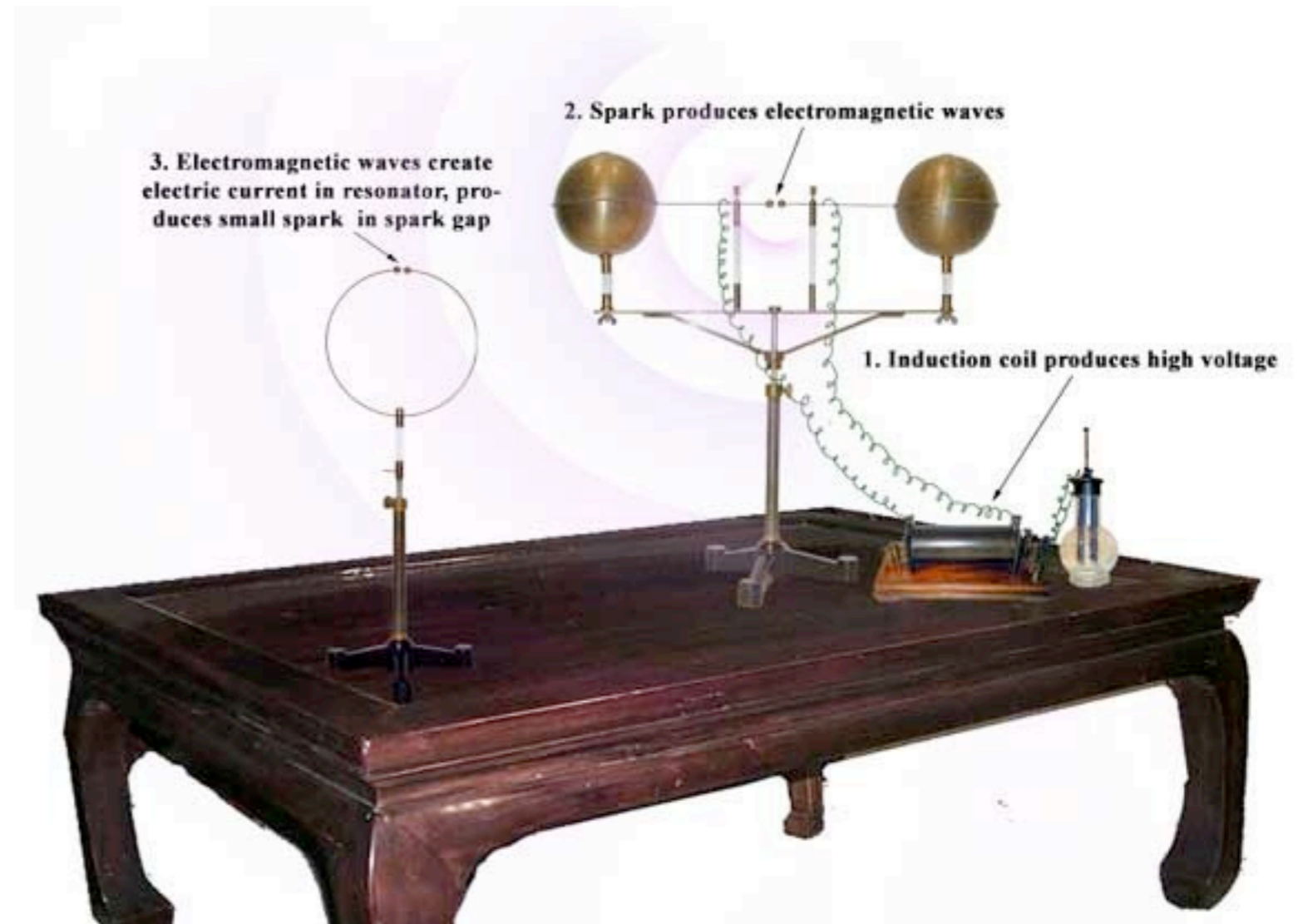
# Física Moderna I

## Aula 04

Marcelo G Munhoz  
Pelletron, sala 245, ramal 6940  
[munhoz@if.usp.br](mailto:munhoz@if.usp.br)

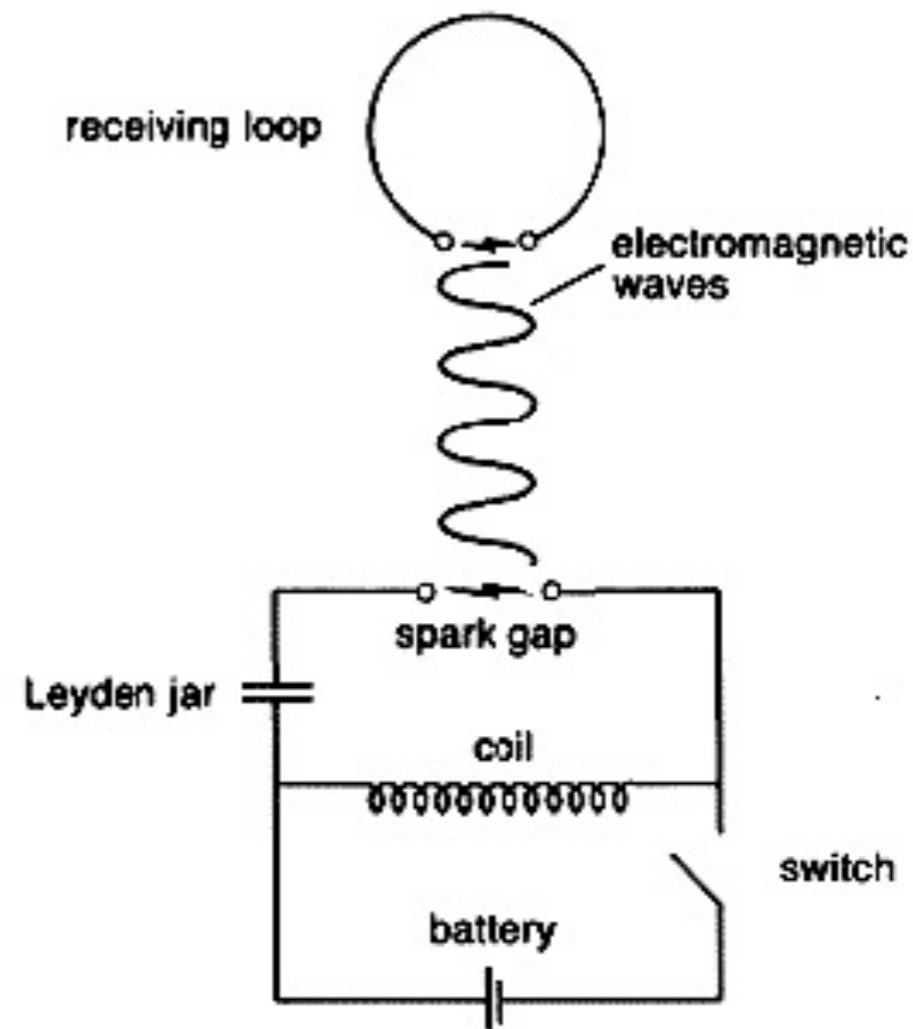
# Existem essas ondas?

- Heinrich Hertz elabora experimentos para testar essa teoria (1887)



# Existem essas ondas?

- Heinrich Hertz elabora experimentos para testar essa teoria (1887)



# Existem essas ondas?

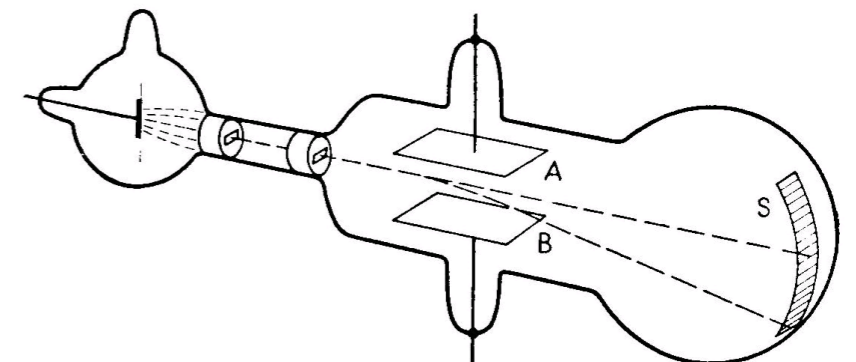
- Heinrich Hertz elabora experimentos para testar essa teoria (1887)



É essencial que as superfícies dos pólos do arco de faíscas sejam constante polidas

# J.J. Thomson descobre o elétron (1897)

- Thomson também estudava descargas elétricas em gases utilizando tubos de raios catódicos
- Através de um experimento e princípios simples de eletromagnetismo, ele mediu a razão  $e/m$  do elétron



# Combinando os experimentos

- Phillip von Lenard, *Annales de Physique, Leipzig* 8, p. 149, 1902
- Realizou um experimento onde ele faz incidir luz em um eletrodo e mede a corrente gerada entre os eletrodos e a energia cinética dos recém descobertos elétrons quando emitidos pelo efeito da luz do eletrodo
- O que esperar sobre o resultado desse experimento segundo a física clássica?

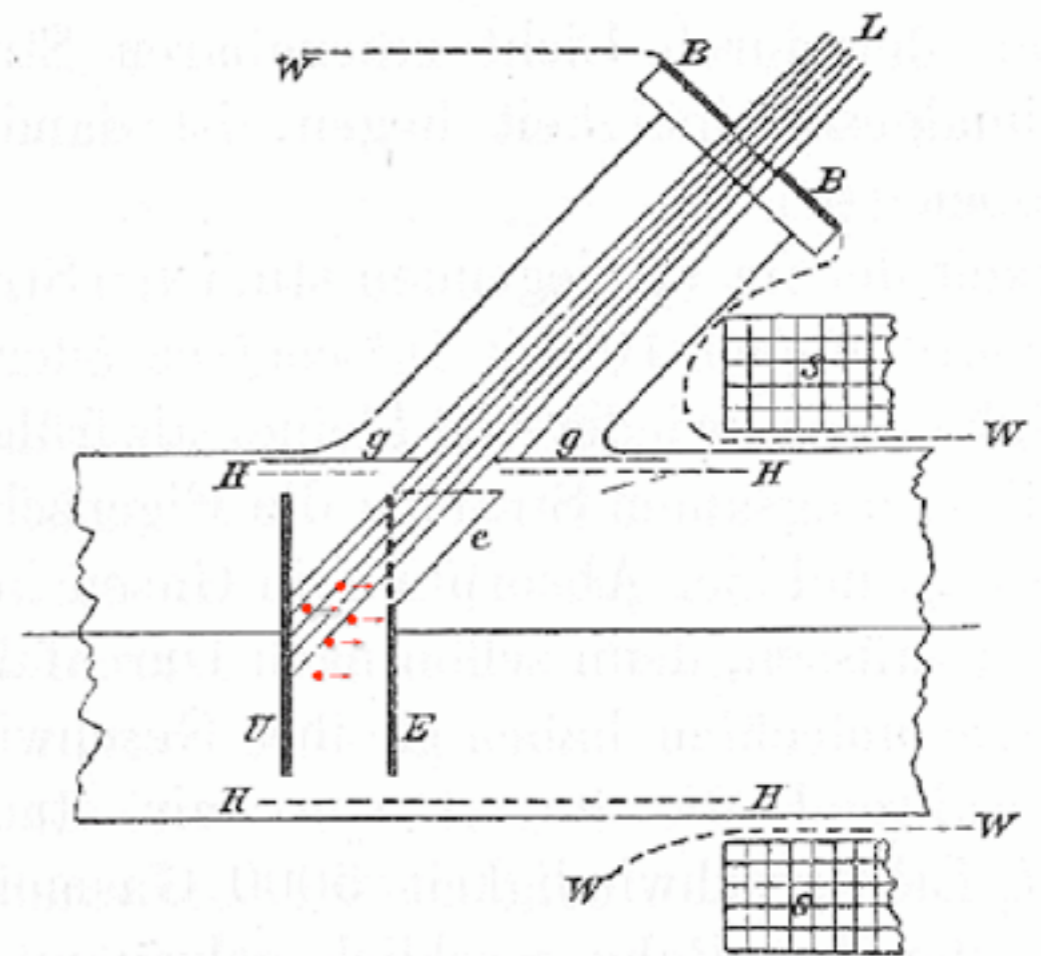
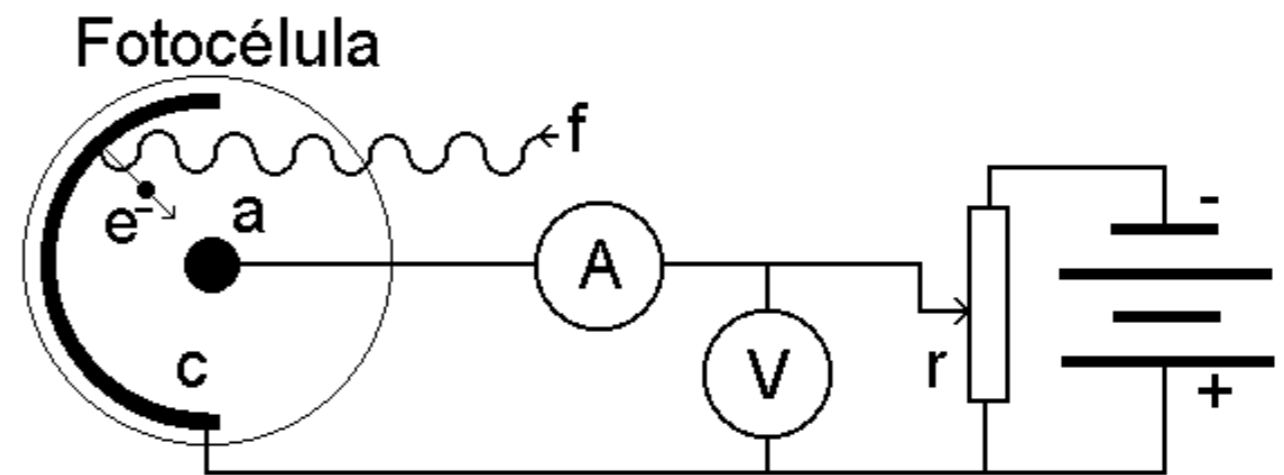


Fig. 1.

# Medida da Energia Cinética dos elétrons

- Esta é a medida chave do estudo de Lenard
- Como medir  $E_c$  ?
  - Aplicar uma tensão no circuito que retarda a velocidade dos elétrons. Quando eles param ( $i = 0$ ), tem-se:  $e \cdot V_0 = E_c$



# Previsão da física clássica

- A previsão da física clássica para essas observações são:
  - a intensidade do campo é proporcional a sua amplitude ao quadrado ( $I \propto E^2$ ). Como a força sobre um elétron é proporcional à amplitude do campo ( $F = eE$ ), a energia cinética dos mesmos deve aumentar com a intensidade da luz
  - este efeito deve ocorrer para qualquer frequência de luz, sendo importante apenas a intensidade da mesma
  - deve haver um intervalo de tempo finito entre a incidência da luz e o início da emissão de elétrons



# Resultados observados por Lenard

- Phillip von Lenard, *Annales de Physique*, Leipzig 8, p. 149, 1902
- “the number of electrons projected is proportional to the energy carried by the incident light,
- whilst their speed, that is to say, their **kinetic energy**, is quite independent of this number and varies only with the wavelength and increases when this diminishes.”  
(Nobel Lectures, Physics 1901-1921, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1967 )

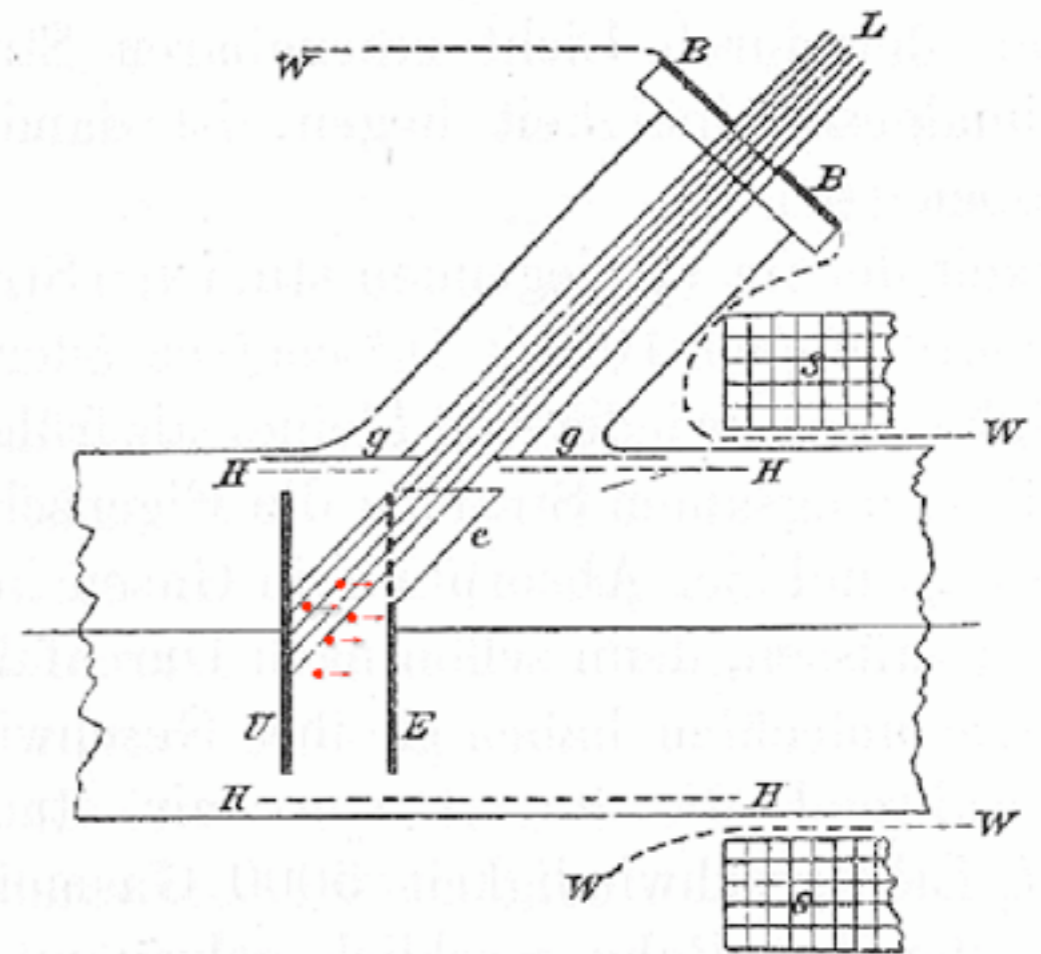
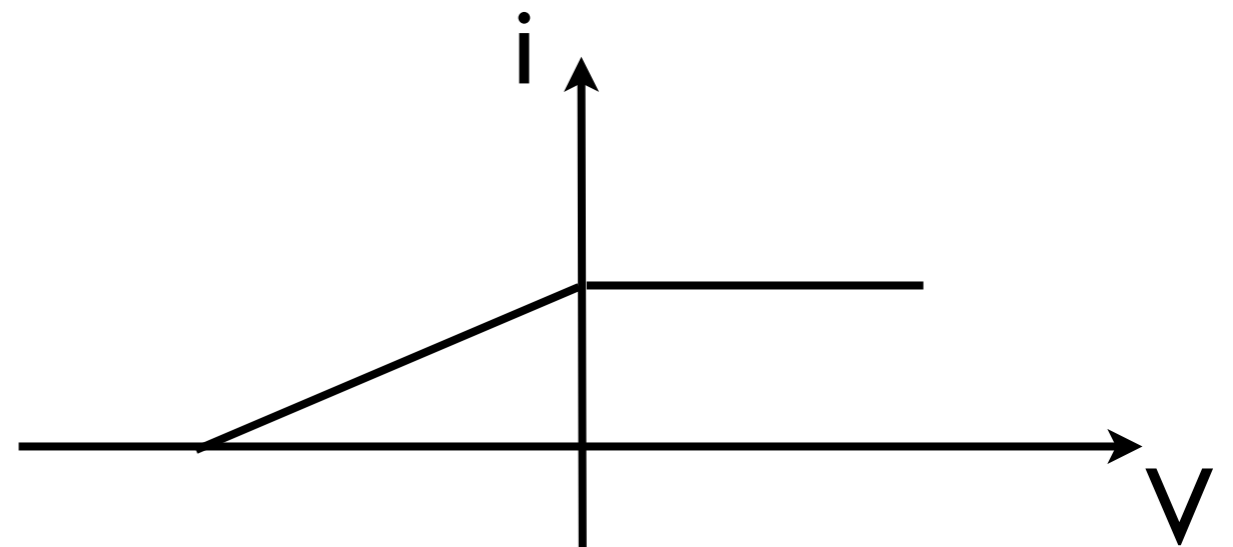
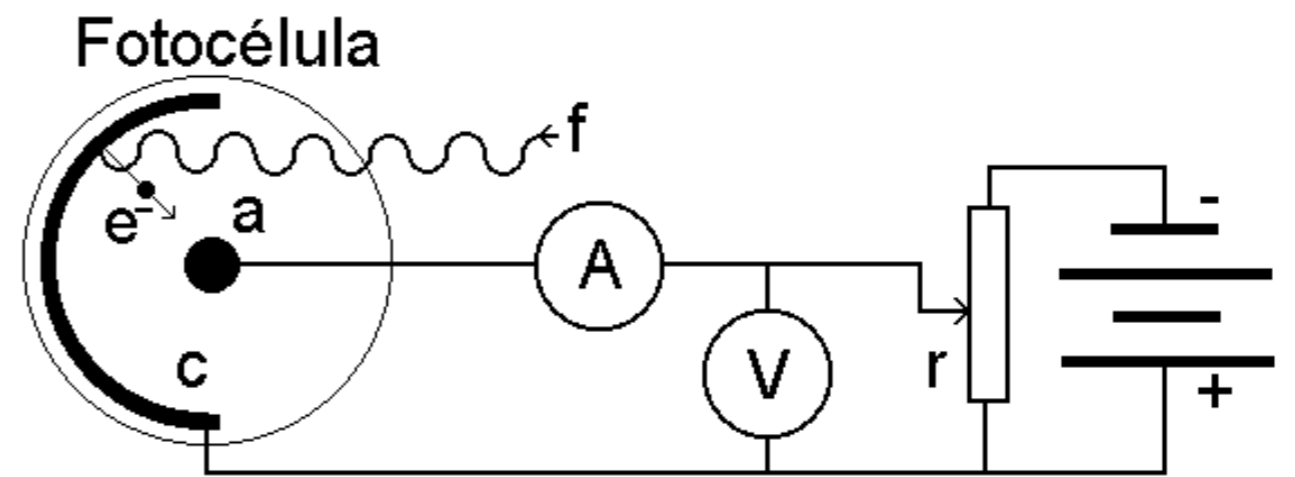


Fig. 1.

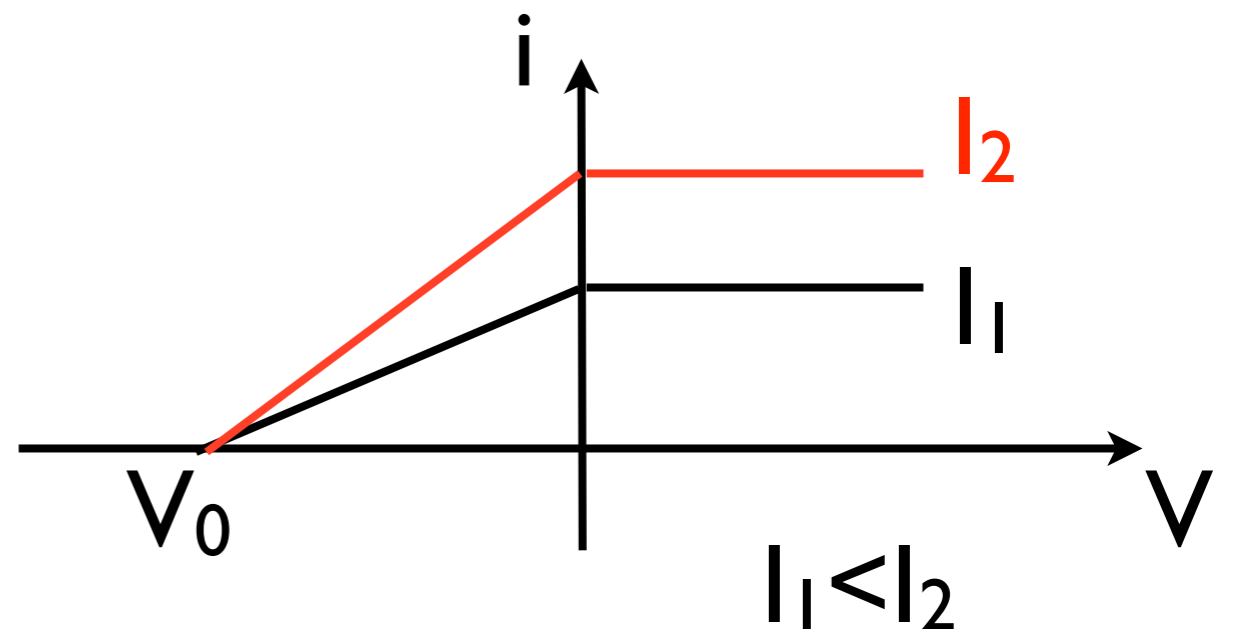
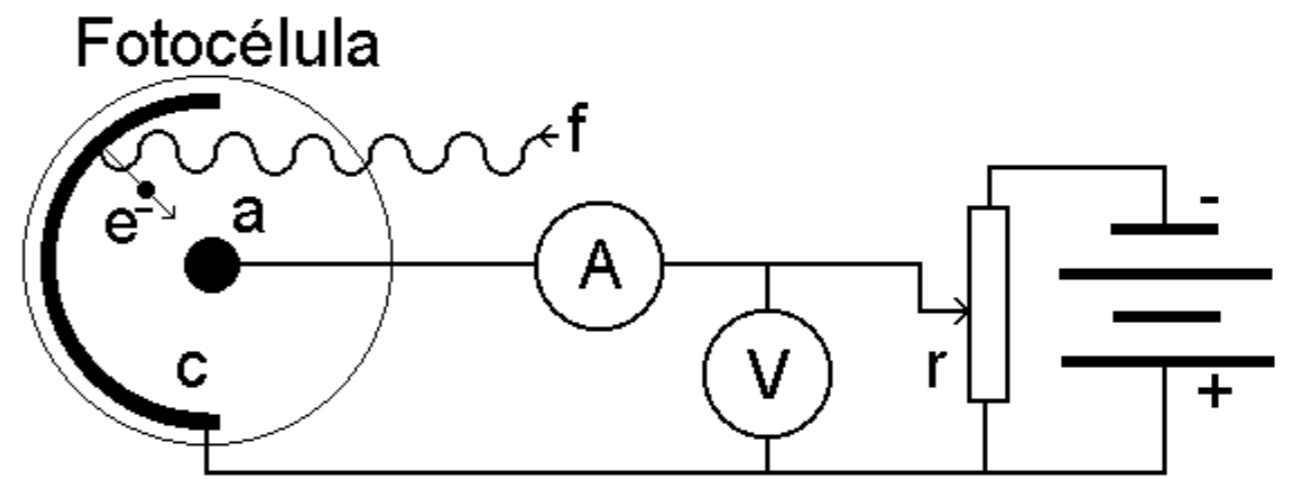
# Resultados observados por Lenard

- Lenard observou que:
- Quando  $V > 0 \Rightarrow i \rightarrow i_{\max}$
- Quando  $V < 0 \Rightarrow i \rightarrow 0$



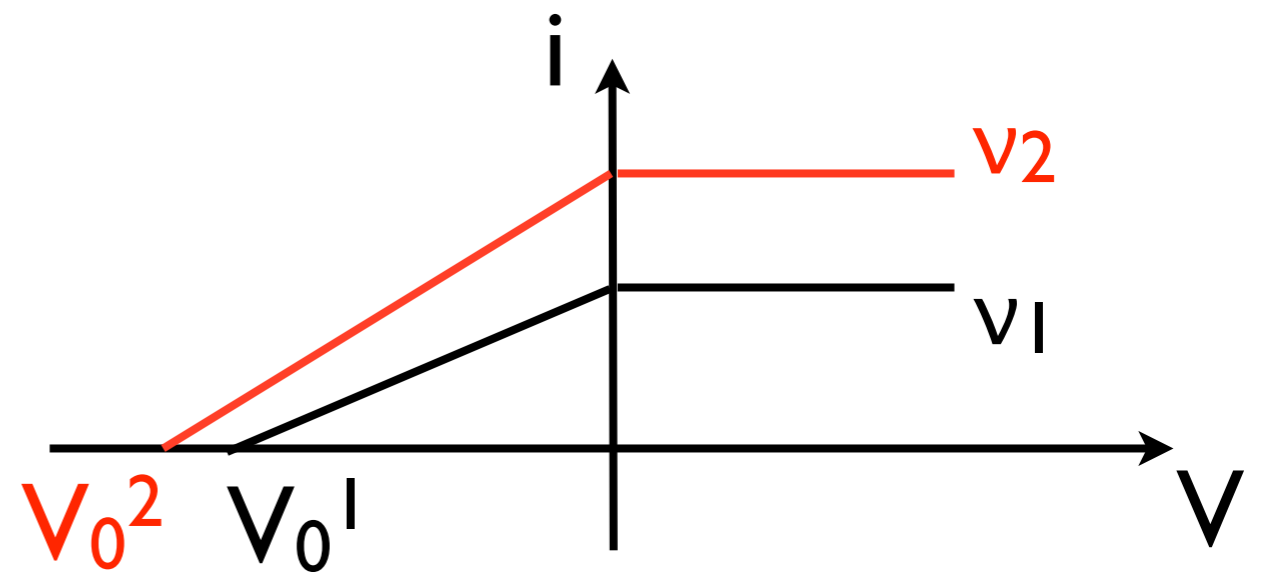
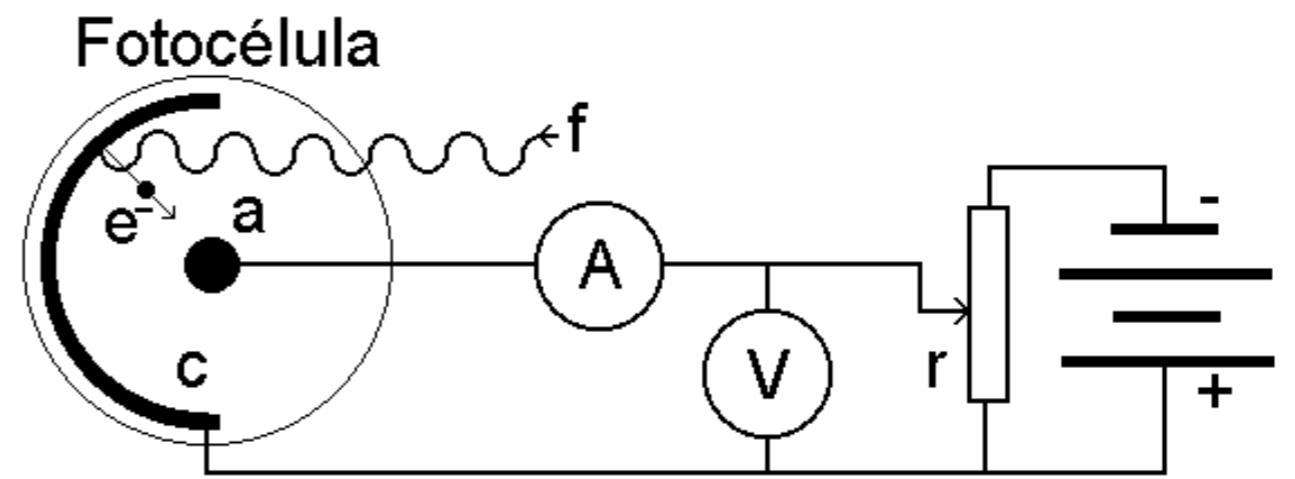
# Resultados observados por Lenard

- Lenard observou que:
- Quando  $V > 0 \Rightarrow i \rightarrow i_{\max}$
- Quando  $V < 0 \Rightarrow i \rightarrow 0$
- $i_{\max}^1 < i_{\max}^2$  se  $I_1 < I_2$



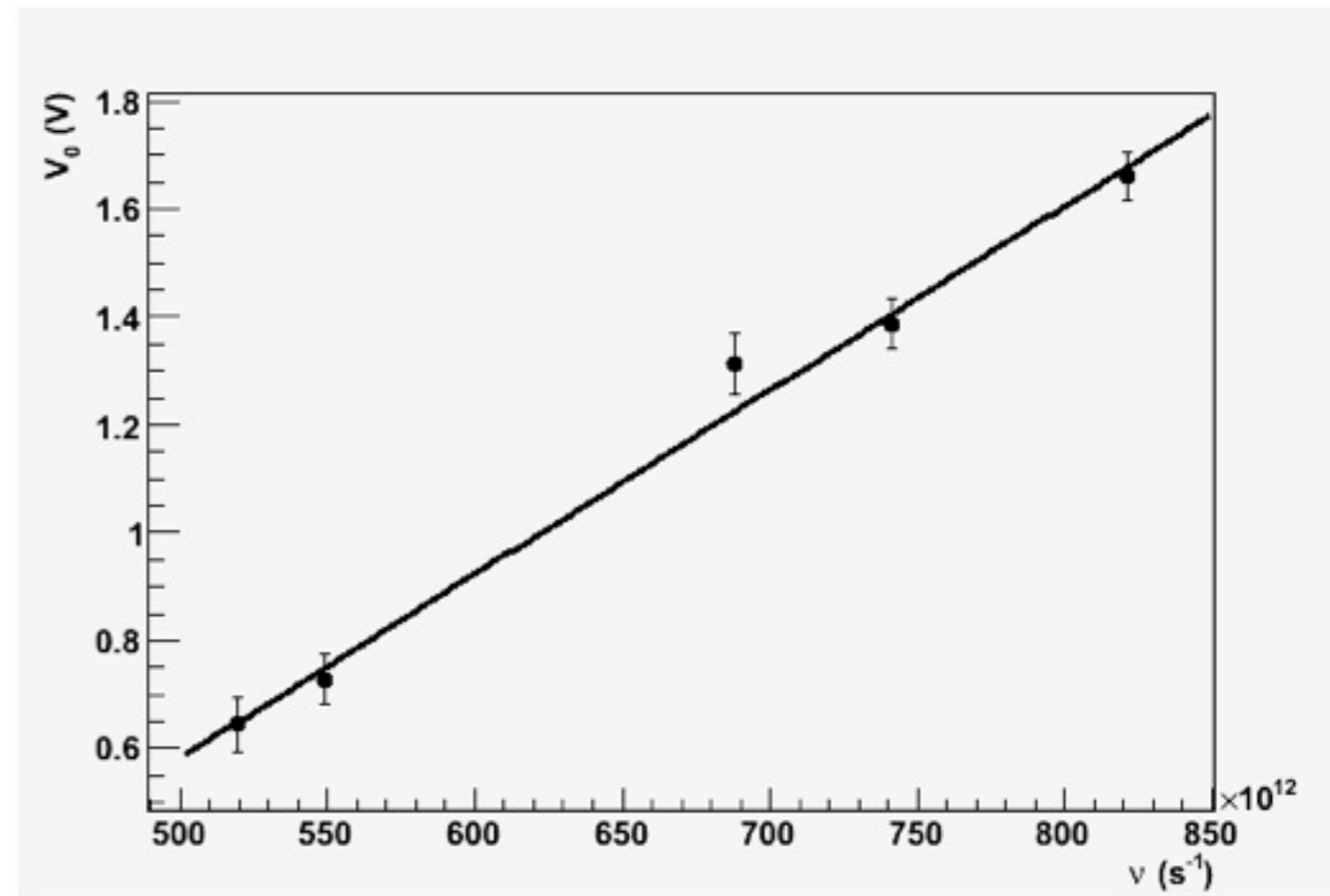
# Resultados observados por Lenard

- Lenard observou que:
- Quando  $V > 0 \Rightarrow i \rightarrow i_{\max}$
- Quando  $V < 0 \Rightarrow i \rightarrow 0$
  
- $i_{\max}^1 < i_{\max}^2$  se  $l_1 < l_2$
- $V_0^1 < V_0^2$  se  $v_1 < v_2$



# Resultados observados por Lenard

- Lenard observou que:
  - $E_c$  apresenta uma dependência linear com  $\nu$
  - Não há atraso entre o início da incidência de luz no eletrodo e a emissão de elétrons



# Descrição da física clássica

- As observações contradizem a descrição teórica clássica:
  - a intensidade do campo é proporcional a sua amplitude ao quadrado ( $I \propto E^2$ ). Como a força sobre um elétron é proporcional à amplitude do campo ( $F = eE$ ), a energia cinética dos mesmos deveria aumentar com a intensidade da luz
  - este efeito deveria ocorrer para qualquer frequência de luz, sendo importante apenas a intensidade da mesma
  - deve haver um intervalo de tempo finito entre a incidência da luz e o início da emissão de elétrons

# Nova e revolucionária descrição teórica!

- Albert Einstein, *Annales de Physique, Leipzig* 17, p. 132, 1905
- “... the incident light consists of energy quanta of magnitude  $E = h\nu$  ...”
- “... a light quantum delivers its entire energy to a single electron ...”
- “we shall assume that in leaving the body each electron must perform an amount of work  $e\phi$  characteristic of the substance.”

# Nova e revolucionária descrição teórica!

- Albert Einstein, *Annales de Physique, Leipzig* 17, p. 132, 1905
- “The kinetic energy of such electrons is given by  $E_c = h\nu - e\phi$ ”
- “If the body is charged to a positive potential  $V$  and is surrounded by conductors at zero potential, and if  $V$  is just large enough to prevent loss of electricity ( $i=0$ ) by the body ( $V_0$ ), it follows that:  $eV_0 = h\nu - e\phi$ ”



# Previsão dessa descrição teórica

- Albert Einstein, *Annales de Physique, Leipzig* 17, p. 132, 1905
- “If the derived formula is correct, then  $V_0$ , when represented in Cartesian coordinates as a function of the frequency of the incident light, must be a straight line whose slope is independent of the nature of the emitting substance.” ( $V_0 = h/e \cdot \nu - \phi$ )

# Dualidade onda-partícula da radiação eletromagnética

- A luz é uma onda eletromagnética e uma partícula (fóton) ao mesmo tempo!
- Ela se propaga como onda e interage como partícula...

