

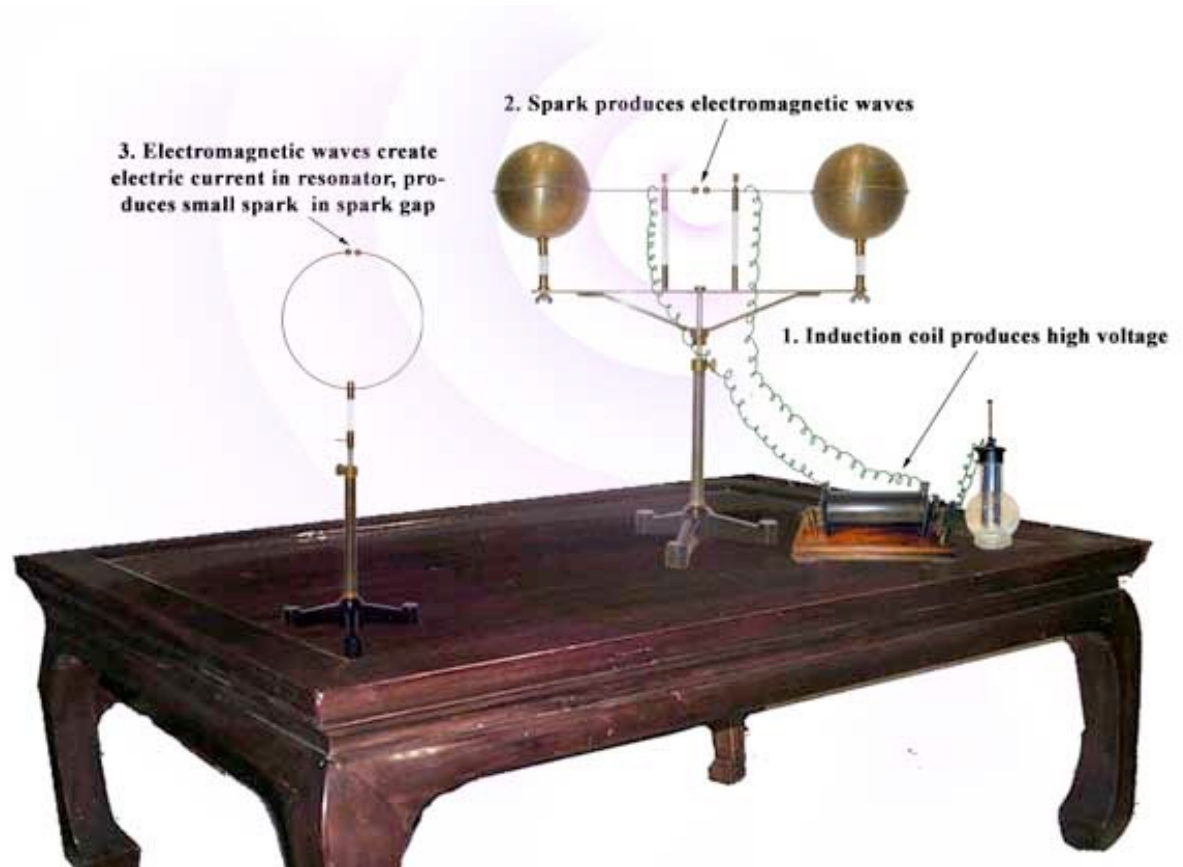
Física Moderna I

Aula 04

Marcelo G Munhoz
Edifício HEPIIC, sala 212, ramal 916940
munhoz@if.usp.br

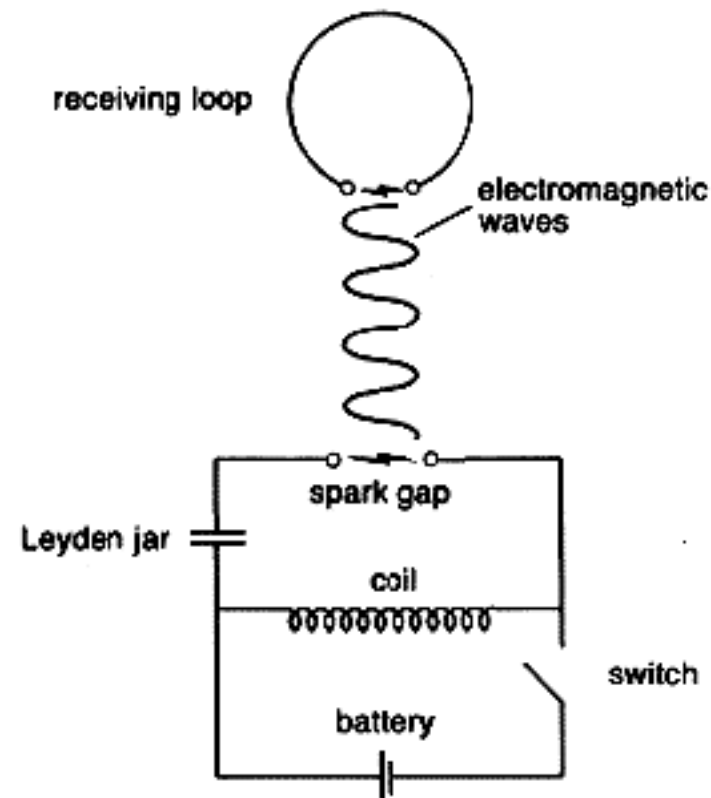
Existem essas ondas?

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



Existem essas ondas?

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



Existem essas ondas?

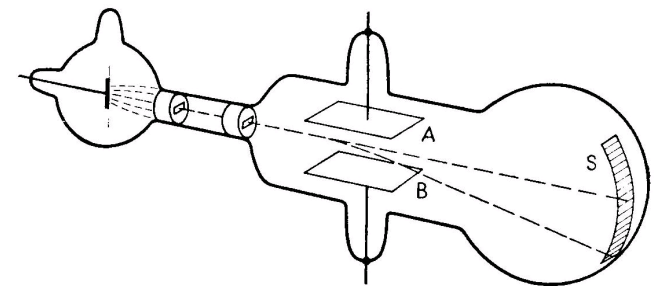
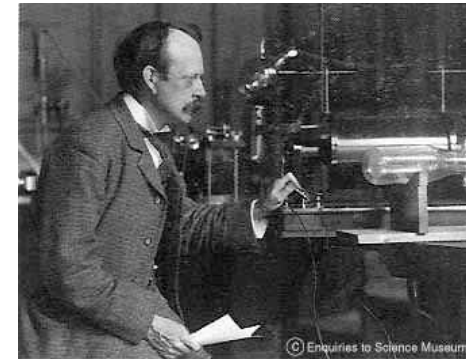
- Heinrich Hertz elabora experimentos para testar essa teoria (1887)



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

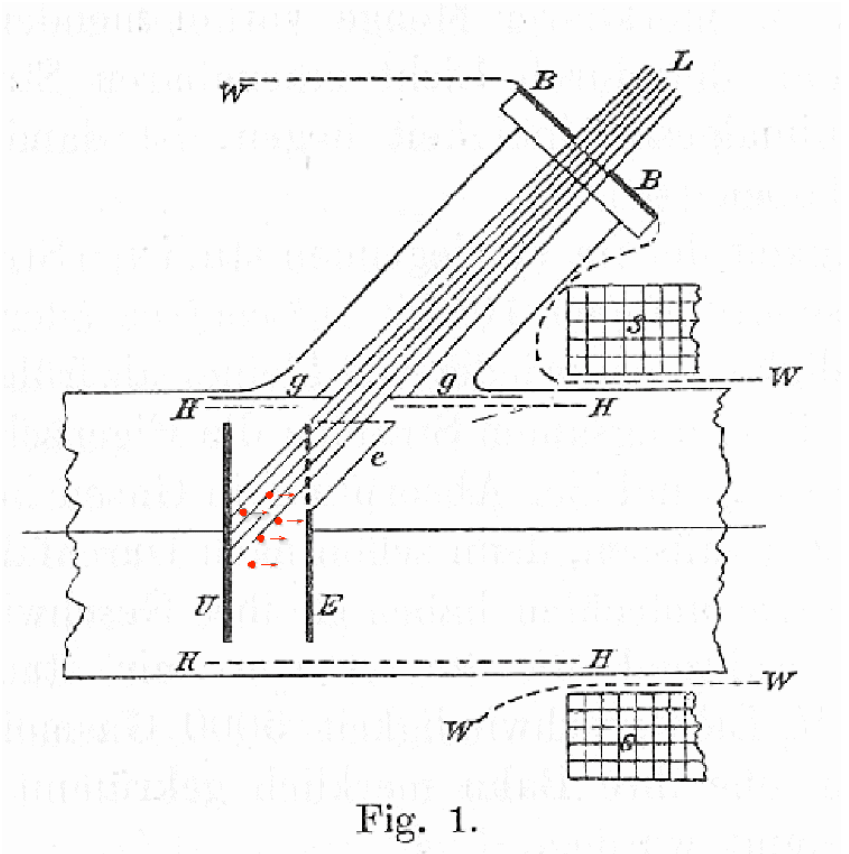
J. J. Thomson descobre o elétron (1897)

- 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



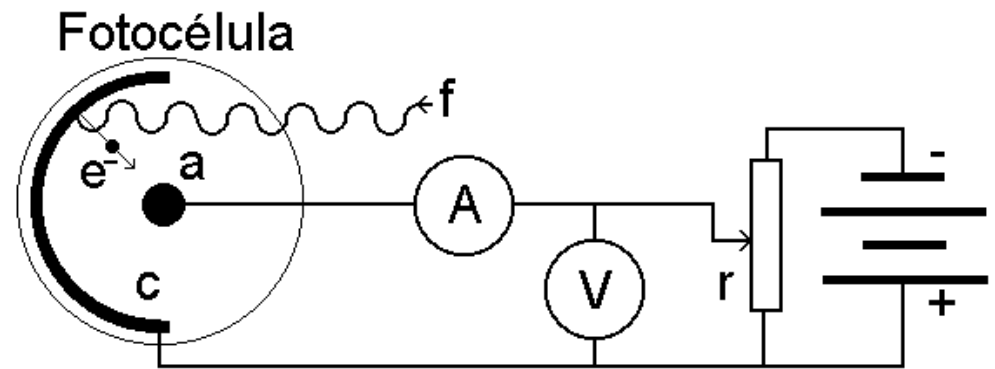
Combinando os experimentos

- 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?



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
 - “o número de elétrons ejetados é proporcional à energia carregada pela luz incidente,
 - enquanto a sua velocidade, isto é, sua energia cinética, é independente do seu número e varia apenas com seu comprimento de onda, aumentando quando este diminui”
(Nobel Lectures, Physics 1901-1921, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1967)

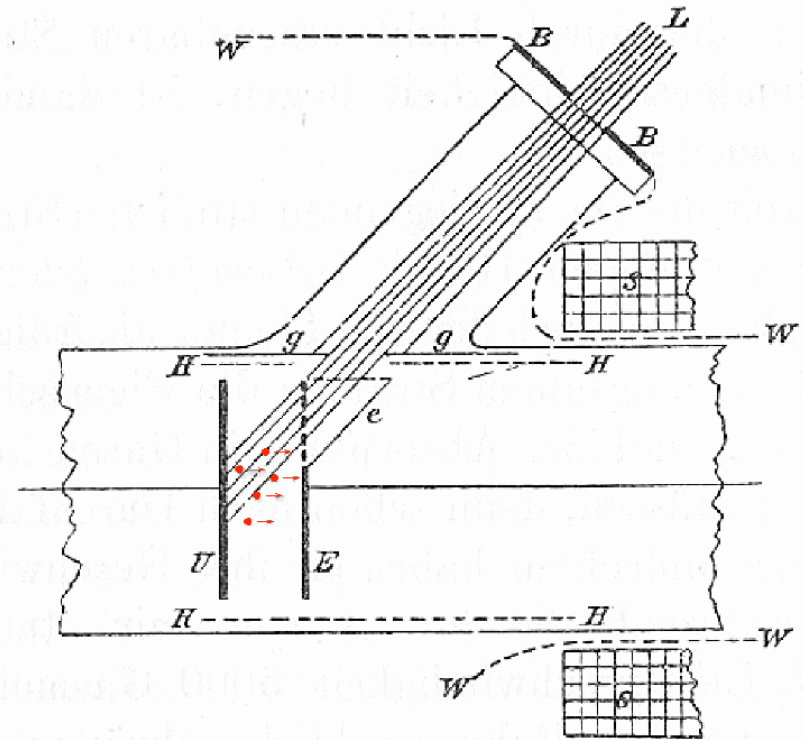
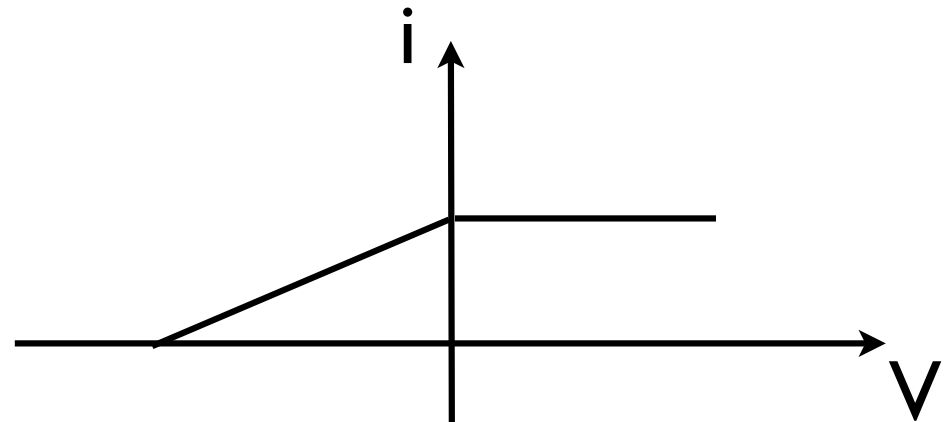
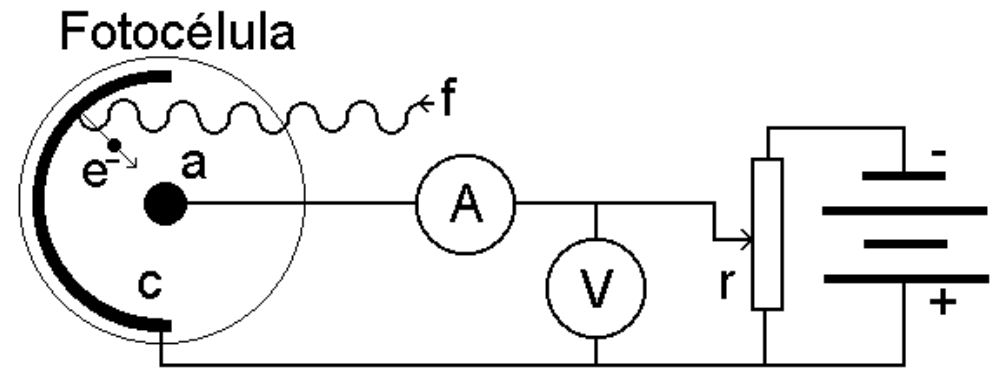


Fig. 1.

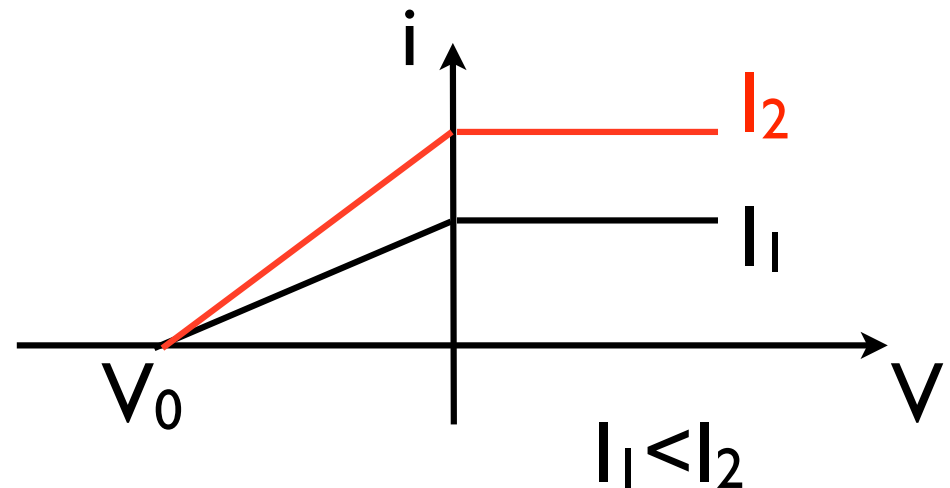
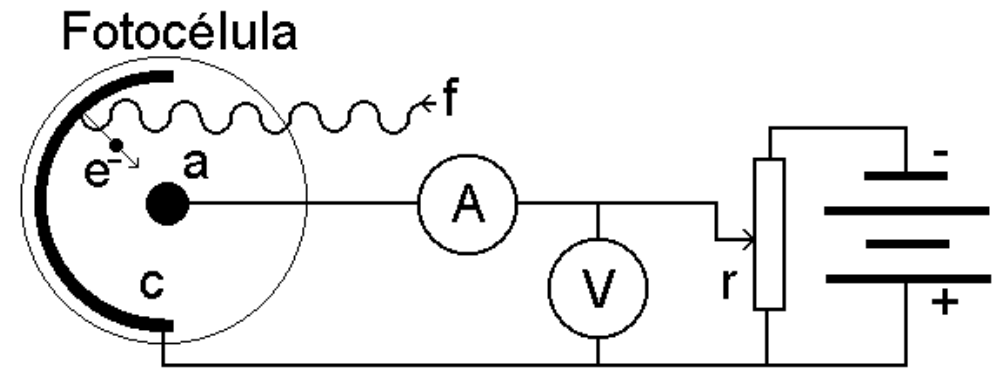
Resultados observados por Lenard

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



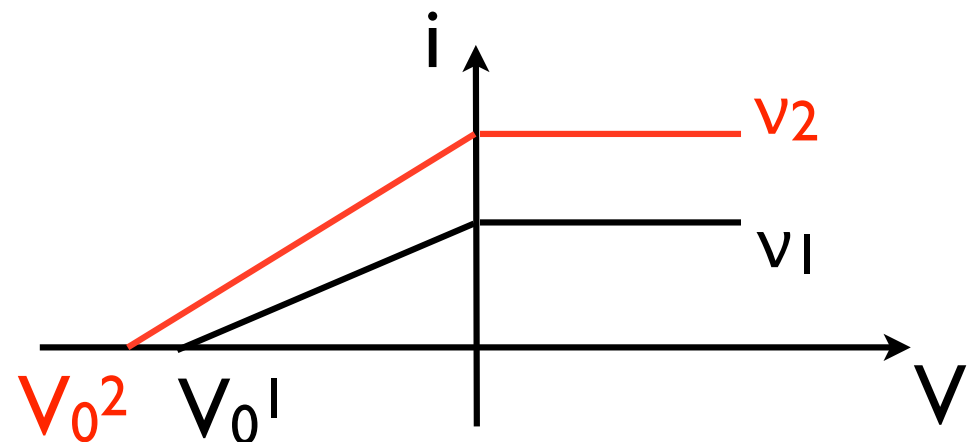
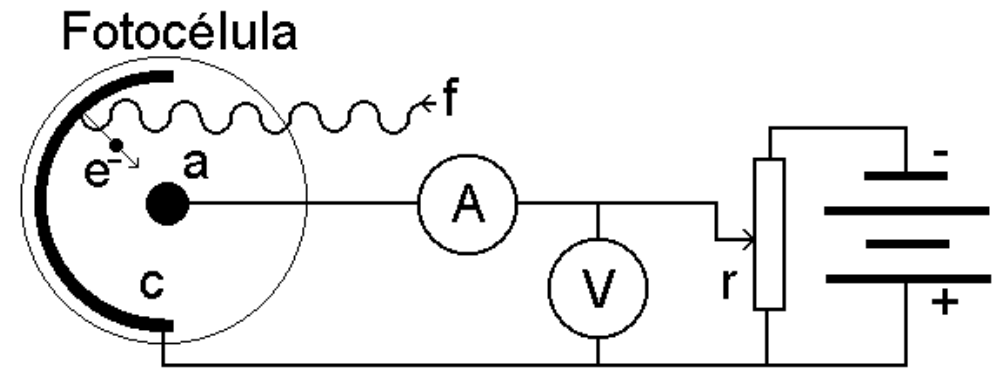
Resultados observados por Lenard

- 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 $I_1 < I_2$



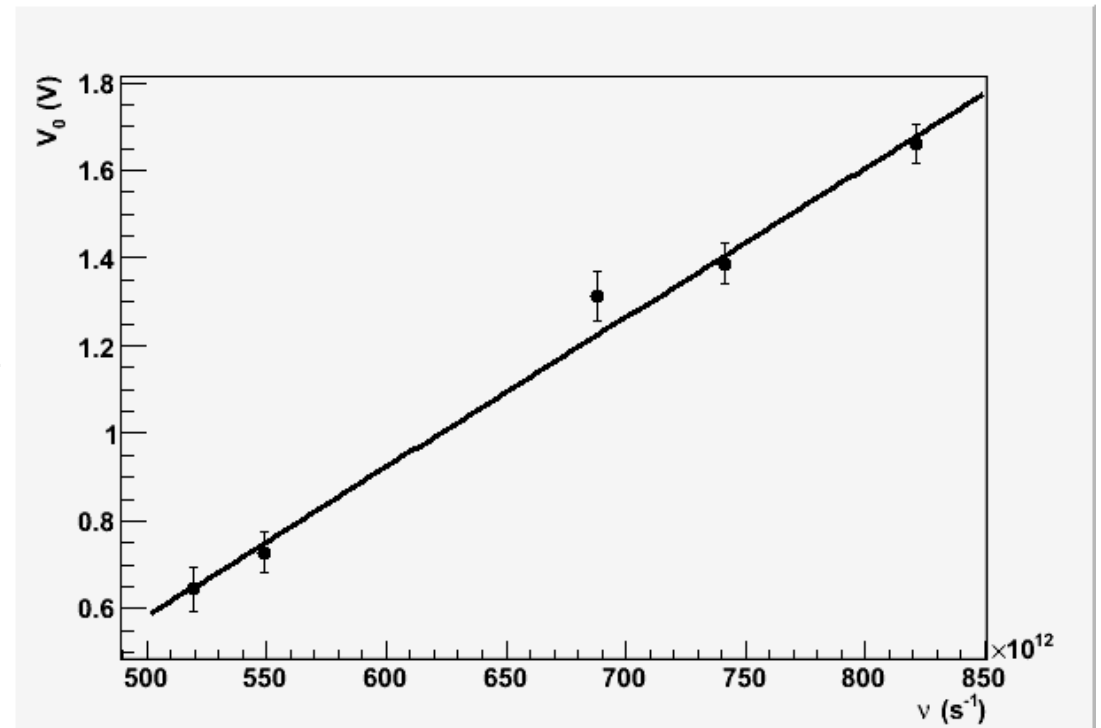
Resultados observados por Lenard

- 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 $I_1 < I_2$
- $V_0^1 < V_0^2$ se $v_1 < v_2$



Resultados observados por Lenard

- Lenard observou que:
 - E_c apresenta uma dependência linear com ν
 - Não há atraso entre o início da incidência de luz no eletrodo e a emissão de elétrons
 - Applet: https://phet.colorado.edu/sims/photoelectric/photoelectric_pt_BR.jar



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
 - “... a luz incidente consiste de quanta de energia de magnitude $E = h\nu$...”
 - “... um quantum de luz transfere toda sua energia para um único elétron ...”
 - “devemos assumir que ao deixar o metal, cada elétron deve realizar uma quantidade de trabalho $e\phi$ característico da substância.”

Nova e revolucionária descrição teórica!

- Albert Einstein, *Annales de Physique, Leipzig* 17, p. 132, 1905
- “A energia cinética desses elétrons é dada por $E_c = h\nu - e\phi$ ”
- “Se um objeto é carregado com um potencial positivo V e cercado por condutores em um potencial nulo e se V é alto o suficiente para evitar a perda de eletricidade ($i=0$) pelo objeto (V_0), tem-se que: $eV_0 = h\nu - e\phi$ ”

Previsão dessa descrição teórica

- Albert Einstein, *Annales de Physique, Leipzig* 17, p. 132, 1905
- “Se a fórmula derivada estiver correta, então V_0 , quando representado em coordenadas cartesianas em função da frequência da luz incidente, deve ser uma linha reta cuja inclinação é independente da natureza da substância de emissão” ($V_0 = h/e \cdot \nu - \phi$)

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...

