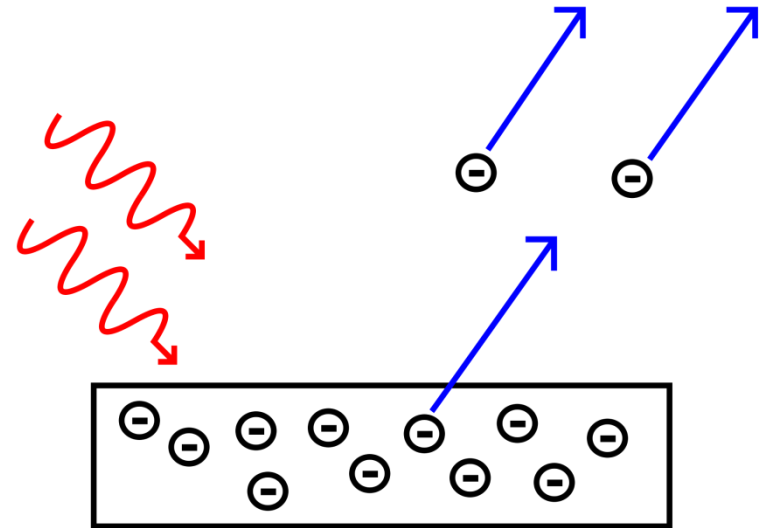


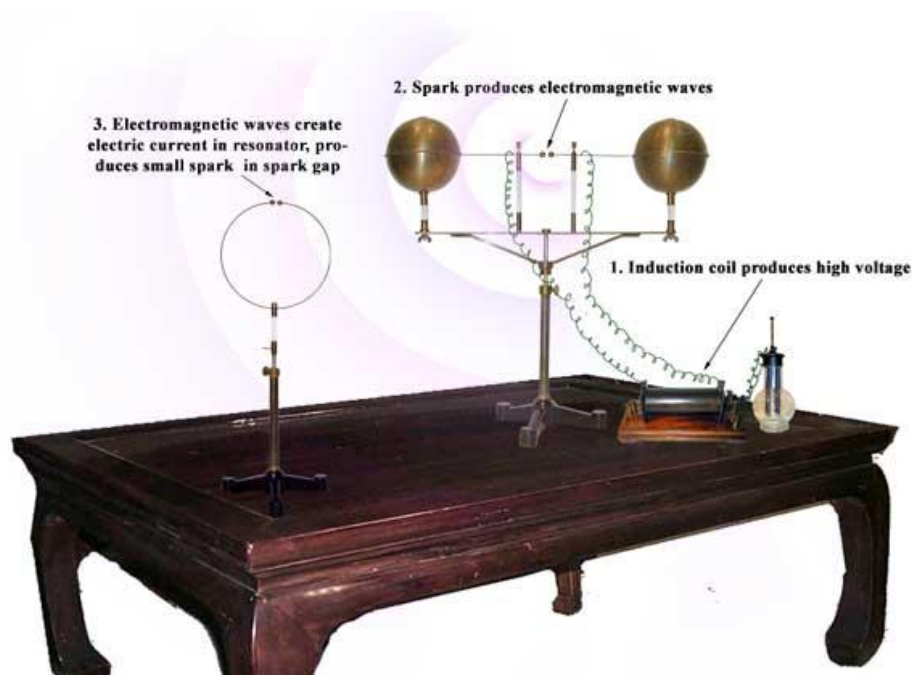
EFEITO FOTOELÉTRICO

- Elétrons são emitidos da matéria após absorverem a energia de uma radiação eletromagnética (de baixos comprimentos de onda – visível ou UV) que incida sobre ela.
- Descoberto acidentalmente por Hertz (1886)
- Solução: Einstein (1905); prêmio Nobel (1921)
- Luz é composta de pacotes (quanta) de energia: fótons
- Propriedade corpuscular da radiação eletromagnética
- Reforço à teoria quântica de Planck (quanta de energia)



1. Descoberta dos fotoelétrons

- Heinrich Hertz – experimentos com ondas de rádio
 - Existência prevista matematicamente por Maxwell em 1864
 - Detectadas pela primeira vez por Hertz em 1885



1. Fonte: bobina de indução de alta voltagem, aplicada entre as duas meias-hastes condutoras.

2. Emissor: haste de latão (26 cm) interrompida no centro, formando um transmissor de faísca (“spark gap”) com polos constituídos de pequenas esferas. A alta voltagem produz uma faísca que forma um caminho de condução, levando a carga a oscilar e a emitir radiação eletromagnética ($\lambda \sim$ tamanho das meias-hastes).

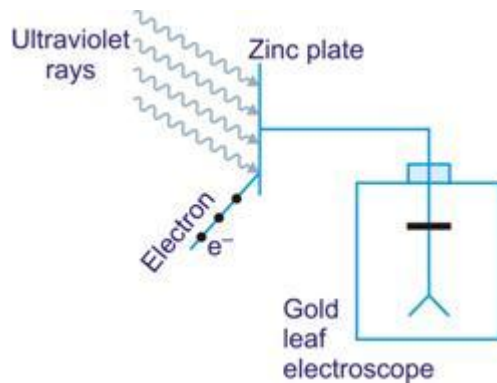
3. Detector (antena): anel de cobre interrompido (pequeno “gap”), com uma pequena esfera de latão em uma extremidade e uma ponta móvel na outra. O diâmetro do anel deve ser tal que uma corrente nele oscilando possua um período natural próximo ao do transmissor ($\sim 7,5$ cm). Uma faísca sinaliza a presença de carga oscilante (radiação eletromagnética) no detector.

- Acidentalmente detecta “algo mais”

Ocasionalmente Hertz colocava o detector em um local escuro, a fim de melhor observar a faísca. Tamanho da faísca (distância máxima entre a esfera de latão e a ponta móvel) *diminuiu* no *escuro*. Faísca mais *vigorosa* ao expor o detector à luz *ultravioleta*. Em 1887 Hertz reporta suas observações experimentais, sem procurar qualquer explicação teórica.

- Wilhelm Hallwachs – detecção simples

- Efeito da luz em corpos eletricamente carregados (1888)



Placa de zinco negativamente carregada, acoplada a um eletroscópio de folhas de ouro.

Eletroscópio perde sua carga muito lentamente.

Ao incidir luz UV sobre a placa, o eletroscópio perde rapidamente sua carga.

Caso a placa de zinco for previamente carregada positivamente, a perda rápida de carga no eletroscópio por ação da luz UV não é observada.

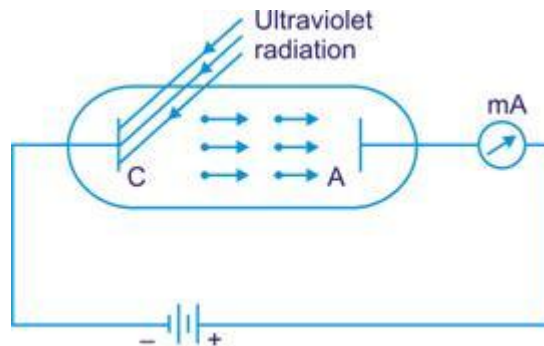
- Clareia um pouco a situação, mas não oferece uma teoria

■ J. J. (Joseph John) Thomson – identifica as partículas

□ Luz UV causa a emissão de elétrons (1899)

Novo método experimental: colocar a superfície que será exposta à radiação em um tubo de vácuo, ou seja, transformá-la no cátodo de um tubo de raios catódicos.

Raios catódicos serão ejetados do cátodo por ação da luz UV (ao invés de um alto campo elétrico).



Explicação da época: átomos do cátodo contém elétrons, que serão agitados e vibrarão por ação do campo elétrico oscilante da radiação incidente;
eventualmente alguns elétrons serão libertados, e ejetados do cátodo.

Efeitos esperados: um aumento da intensidade de radiação agitará os elétrons mais *violentamente*, levando a uma maior quantidade de elétrons ejetados e que possuirão uma maior energia cinética (velocidade), em média;
um aumento na frequência agitará os elétrons mais *rapidamente*, levando a uma ejeção mais rápida;
uma luz muito fraca levará um tempo para agitar o elétron a uma amplitude de vibração suficiente para que seja ejetado, ou seja, é esperado um retardo na ejeção.

■ Philipp Lenard – encontra algumas surpresas

- Dependência da energia dos fotoelétrons emitidos com a intensidade e a frequência da luz incidente (1902)

Carregou a placa coletora negativamente, de forma a *repelir* os elétrons fotoejetados na placa emissora.

Somente elétrons ejetados com energia cinética suficiente para vencer o potencial retardador chegam ao coletor, provocando uma leitura no amperímetro.

Existe um potencial mínimo V_0 (limite ou de corte), abaixo do qual nenhum fotoelétron chega ao coletor.

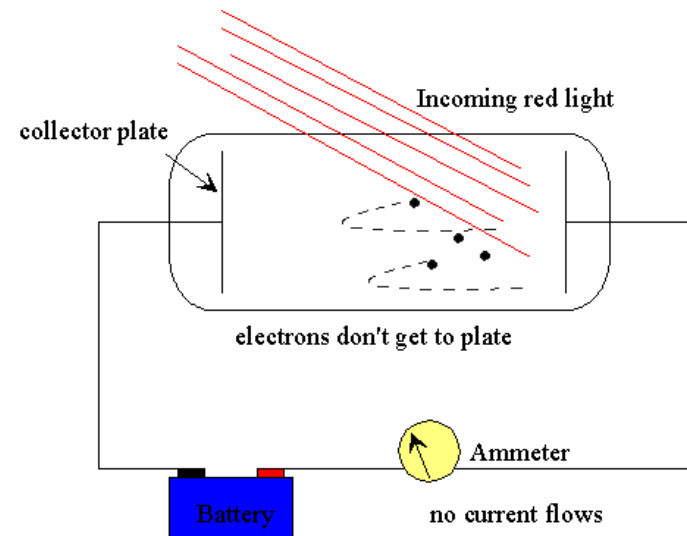
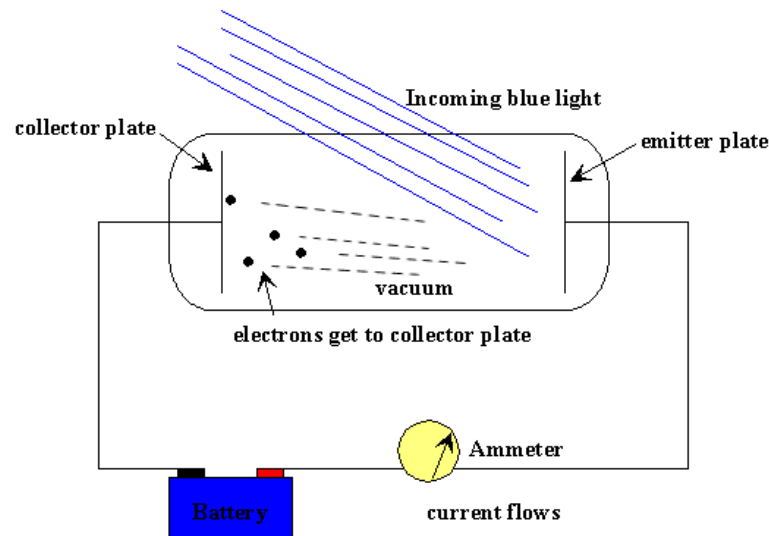
Esperado (classicamente) : energia da radiação eletromagnética depende de sua intensidade e independe de sua frequência

⇒ V_0 deve *depende* da intensidade da luz

⇒ efeito fotoelétrico deve ocorrer para *qualquer* frequência da luz

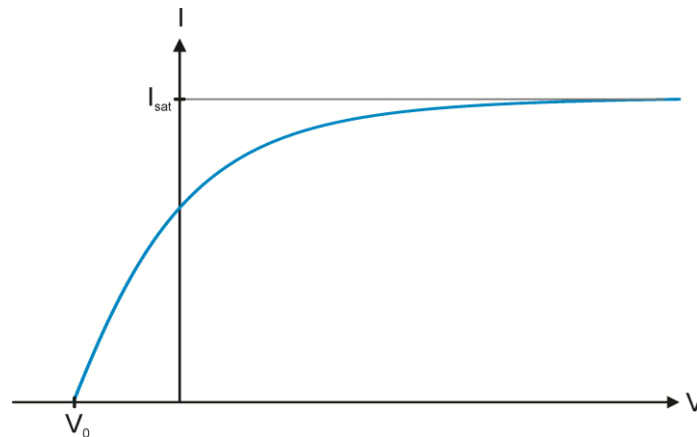
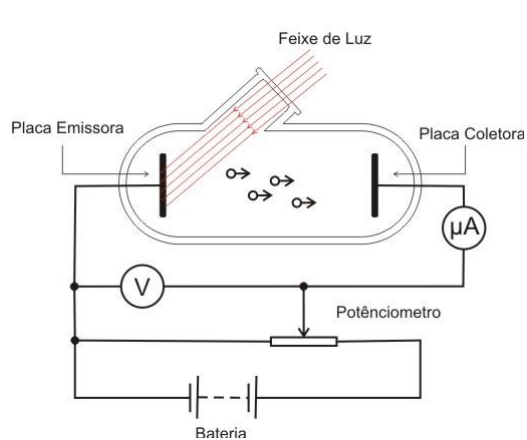
Experimentalmente: ⇒ V_0 *independe* da intensidade da luz

⇒ efeito fotoelétrico só ocorre para frequências acima de ν_0 (limiar ou de corte)



2. Resultados experimentais encontrados

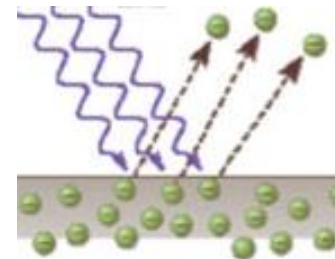
- Dependência da corrente medida com a voltagem aplicada
 - Corrente elétrica medida no amperímetro atinge um valor limite: **corrente de saturação** (I_{sat})
 - Para voltagens negativas ainda existe corrente, até um valor limite: **potencial de corte** ou **potencial limite** (V_0)



■ O que ocorre

- Luz incide sobre a placa emissora e provoca a emissão de fotoelétrons
 - É necessária uma energia mínima W_0 (função trabalho) para remover o elétron do metal
- Fotoelétrons emitidos possuem energia cinética suficiente para alcançar a placa coletora, mesmo sem voltagem ou voltagem negativa aplicada entre as placas

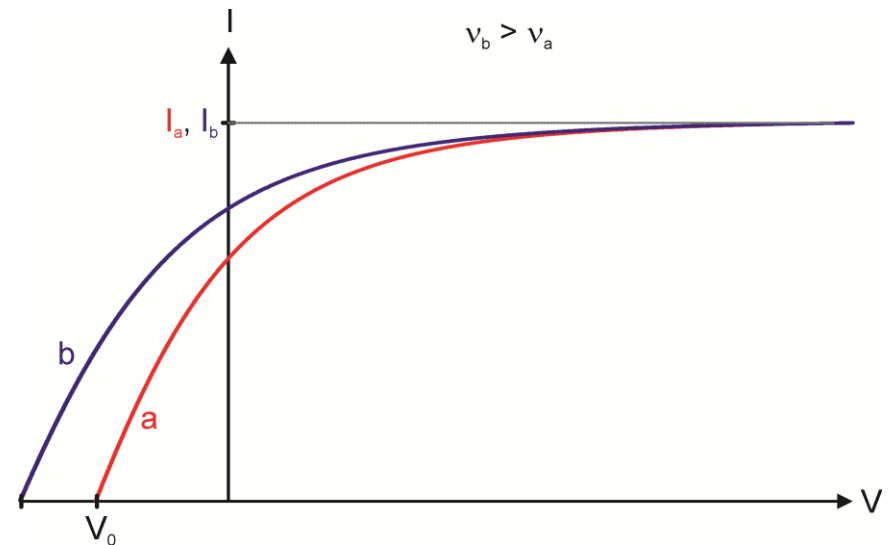
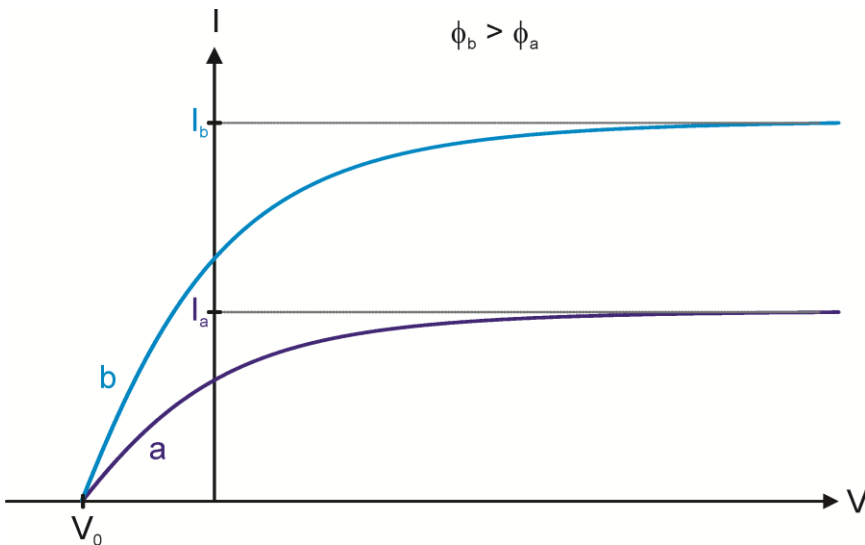
O fotoelétron de maior energia é aquele que atinge a placa coletora mesmo movendo-se contra o potencial negativo $V_0 \Rightarrow K_{max} = eV_0$



■ Luz incidente: frequência ν e intensidade ϕ

- Corrente de saturação **depende da intensidade** da luz incidente
- Potencial de corte **independe da intensidade** da luz incidente

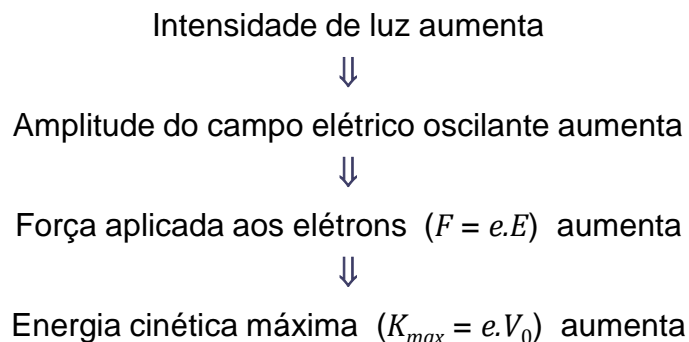
- Corrente de saturação **independe da frequência** da luz incidente
- Potencial de corte **depende da frequência** da luz incidente



3. Explicação clássica do efeito fotoelétrico

- Teoria ondulatória clássica da luz

- Dependência com a intensidade



Classicamente: Intensidade de luz aumenta $\Rightarrow V_0$ aumenta
(contradiz observações experimentais)

□ Dependência com a frequência

Energia dos fotoelétrons ($K = e.V$) depende da frequência da luz



Efeito fotoelétrico é independente da frequência da luz

Classicamente: frequência de luz muda $\Rightarrow V_0$ não muda
(contradiz observações experimentais)

□ Retardamento na ejeção

Energia luminosa está uniformemente distribuída sobre a frente de onda



Luz suficientemente fraca: elétron leva um tempo para absorver a energia suficiente para escapar

Classicamente: retardo entre início de incidência da luz e ejeção do fotoelétron
(contradiz observações experimentais)

4. Teoria quântica do efeito fotoelétrico

■ Albert Einstein – teoria quântica

- Interpretação bastante simples dos resultados de Lennard: a energia radiante está quantizada em pacotes concentrados chamados fótons (1905).

A energia da radiação incidente será $E = h\nu \Rightarrow$ depende apenas de sua *frequência*

Na fotoemissão, um fóton (quantum de energia) é absorvido por um elétron

É necessária uma energia W para remover o elétron do metal

\Rightarrow A energia cinética do elétron ejetado será $K = h\nu - W$

A energia mínima para remover o elétron do metal é W_0 : **função trabalho**

Para que o elétron chegue ao coletor deverá ter uma energia mínima $E = eV_0$

\Rightarrow A energia cinética **máxima** do elétron ejetado será $K_{max} = h\nu - W_0$

Fotoelétrons devem respeitar a equação:

$$V_0 = -\frac{W_0}{e} + \frac{h}{e}\nu$$

Previsão para o gráfico de V_0 contra $\nu \Rightarrow$ reta de coeficiente angular h/e

Deve existir uma frequência mínima abaixo da qual o efeito fotoelétrico não ocorre ($K = 0$): **frequência de corte** ν_0

$$\nu_0 = \frac{W_0}{h}$$

■ Teoria corpuscular quântica da luz

□ Dependência com a intensidade

Intensidade de luz aumenta



Aumenta número de fótons



Aumenta corrente fotoelétrica

Energia dos fótons não muda



Energia cinética máxima dos elétrons ($K_{max} = h\nu - W_0 = eV_0$) não muda

Quanticamente: Intensidade de luz aumenta $\Rightarrow I_0$ aumenta
 V_0 não muda
(em acordo com observações experimentais)

□ Dependência com a frequência

Energia dos fótons depende da frequência da luz



Energia cinética máxima dos elétrons ($K_{max} = h\nu - W_0 = eV_0$) depende da frequência da luz

Quanticamente: frequência de luz muda $\Rightarrow V_0$ muda
(em acordo com observações experimentais)

□ Retardamento na ejeção

Energia luminosa está concentrada em pacotes (fótons)

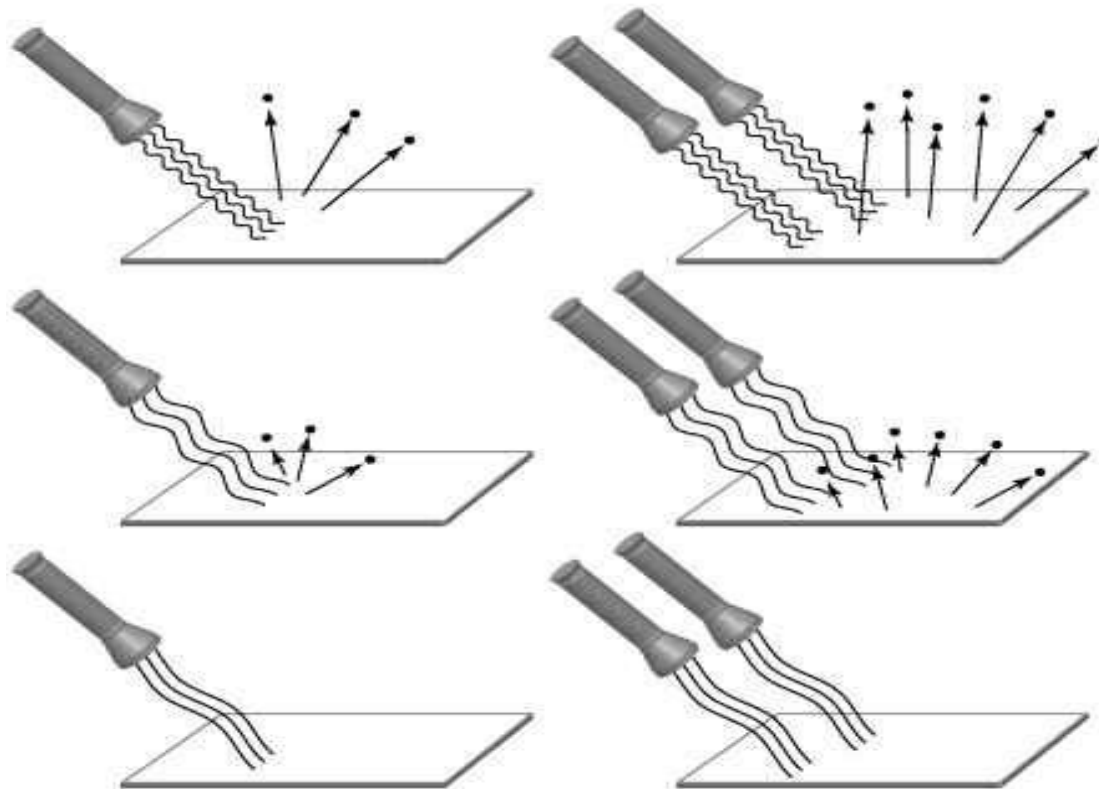


Luz fraca: poucos pacotes, porém se sua energia for suficiente para que o elétron escape, a transferência dar-se-á toda ao mesmo tempo

Quanticamente: não ocorre retardo entre início de incidência da luz e ejeção do fotoelétron
(em acordo com observações experimentais)

□ Consequências da teoria quântica: efeitos esperados no efeito fotoelétrico

Aumento da *intensidade* da luz ⇒ mais fótons ⇒ mais elétrons ejetados
Diminuição da *frequência* da luz ⇒ fótons menos energéticos ⇒ elétrons com menor energia
Abaixo do *limiar* da frequência ⇒ fótons não soltam o elétron ⇒ não ocorre efeito fotoelétrico



■ Robert Millikan – confirma a teoria quântica de Einstein

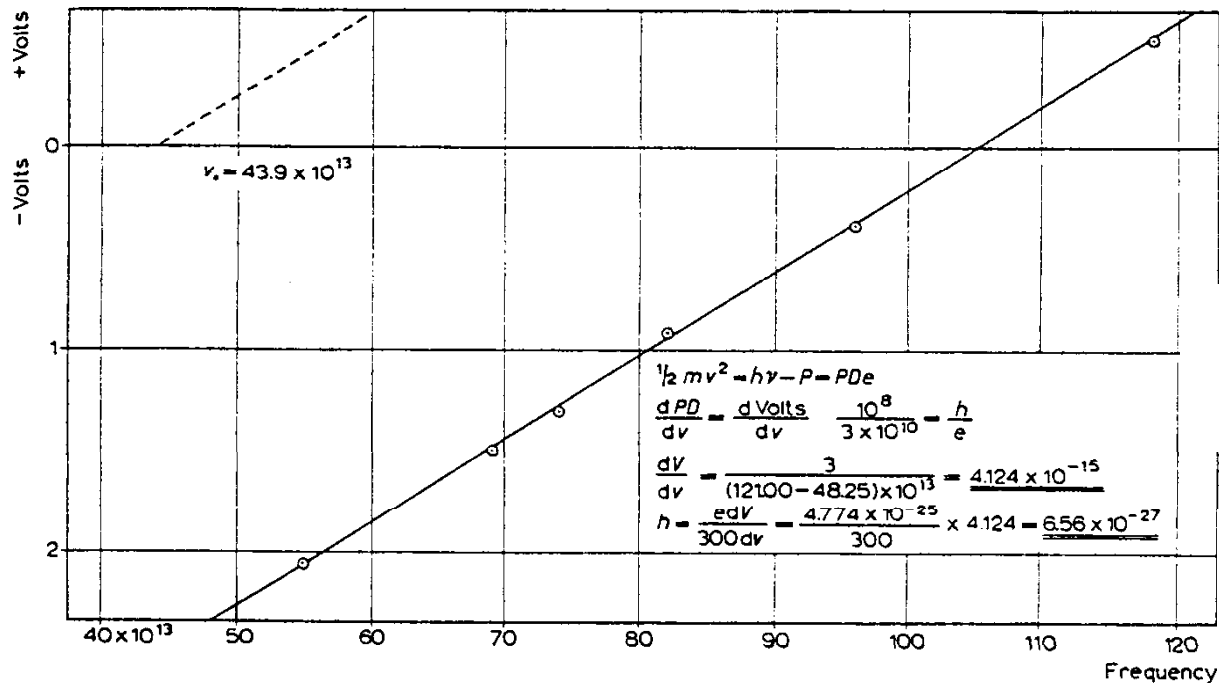
□ Dependência do potencial limite com a frequência da luz incidente (1914)

Millikan não aceita a teoria quântica de Einstein, que lhe parece um ataque à teoria ondulatória da luz. Realiza uma série de experimentos (~10 anos!) no efeito fotoelético.

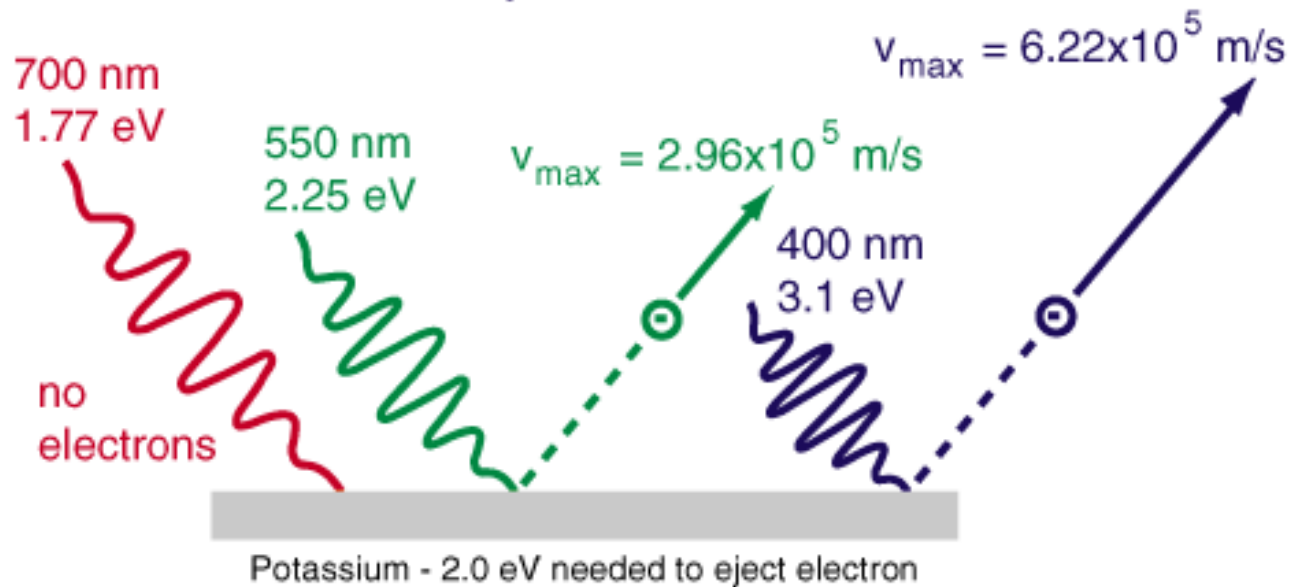
Confirma a dependência do potencial de corte V_0 com a frequência.

Confirma a existência da frequência de corte ν_0 .

Calcula e confirma o valor da constante de Planck h (0,5% de acurácia), reforçando a teoria quântica.



$$E_{\text{photon}} = h\nu$$



Photoelectric effect