

Instituto de Física USP

Física Moderna I Aula 09

Professora: Mazé Bechara

Aula 09 – O efeito fotoelétrico e a visão corpuscular da radiação eletromagnética

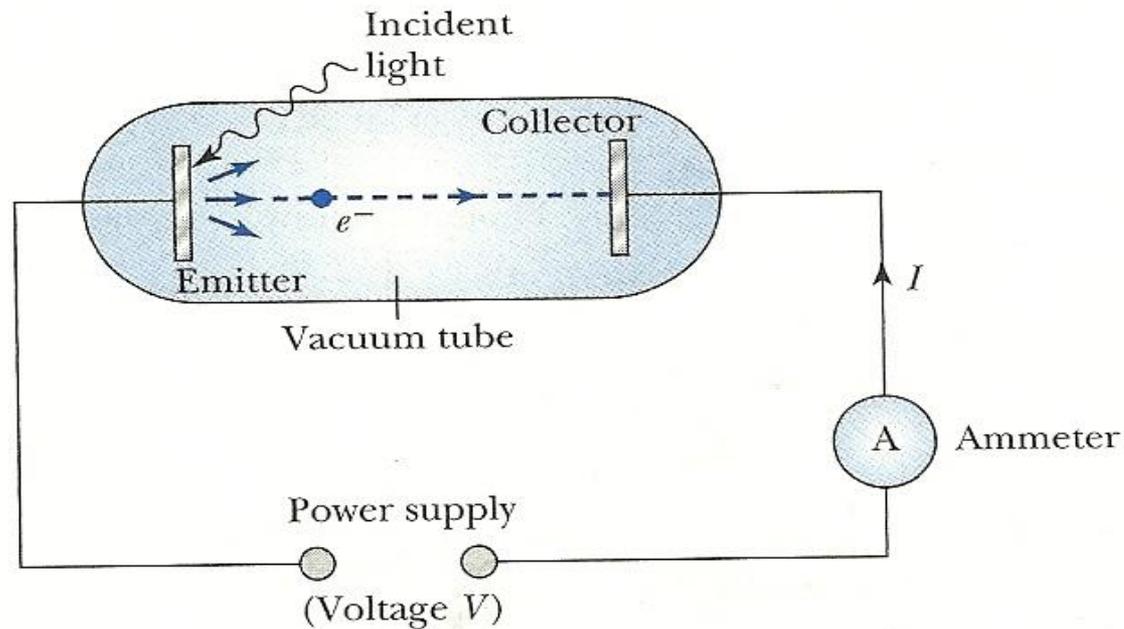
1. Efeito fotoelétrico: o que é, o que se observa experimentalmente, e principais características (algumas não podem ser descritas no contexto da física clássica).
2. A proposta de Einstein com seus fótons que dá conta de descrever todas as características do efeito fotoelétrico.
3. Aplicações: efeito fotoelétrico e visão fotônica e visão humana.

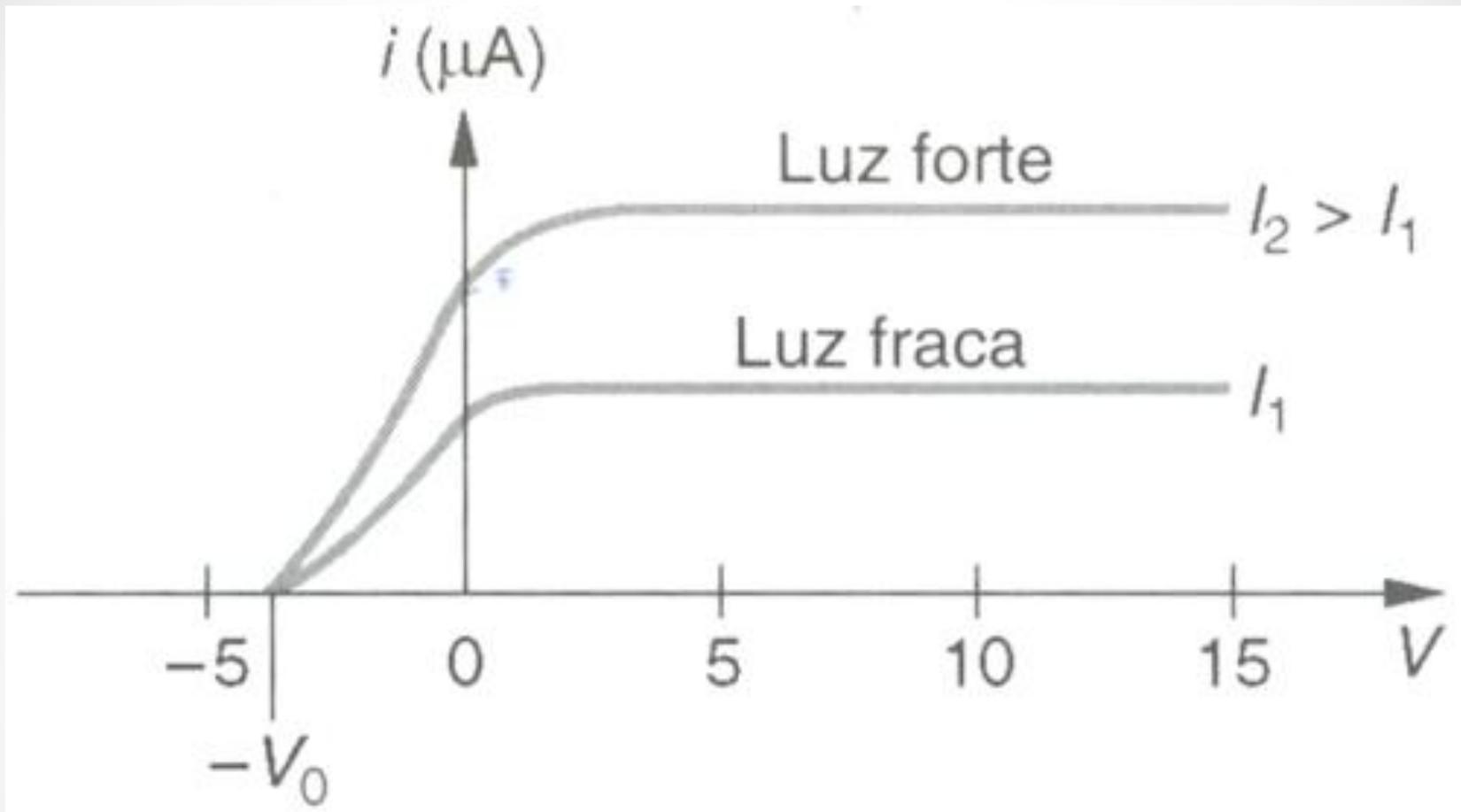
O efeito fotoelétrico – uma motivação da visão fotônica proposta por Einstein

- **Observado por Hertz** pela primeira vez em **1887** quando produziu e detectou ondas eletromagnéticas, confirmando a proposta de Maxwell de que luz **é onda (eletromagnética)**.
- **O que é:** emissão de elétrons por materiais por incidência de radiação eletromagnética.
- **Se o material é um metal o efeito fotoelétrico** é observado quando a **radiação incidente** tem frequência monocromática **visível ou ultravioleta**.
- **Como se observa:** corrente fotoelétrica (ordem de micro ampères) criada e medida em um circuito que se fecha entre o material emissor de elétron e outro coletor.

Equipamento para medir efeito fotoelétrico

(diferente do usado na disciplina Laboratório de Física Moderna!)





Fotocorrente i em função da tensão V para uma luz de frequência f e duas intensidades $I_2 > I_1$. A tensão de corte V_0 é a mesma nos dois casos (mesmo emissor).

Corrente fotoelétrica i versus o potencial V no catodo emitida em experimentos com feixes de mesma intensidade mas diferentes frequencias f , incidindo sobre mesmo material no emissor. Os valores V_{o2} e V_{o1} dependem do material

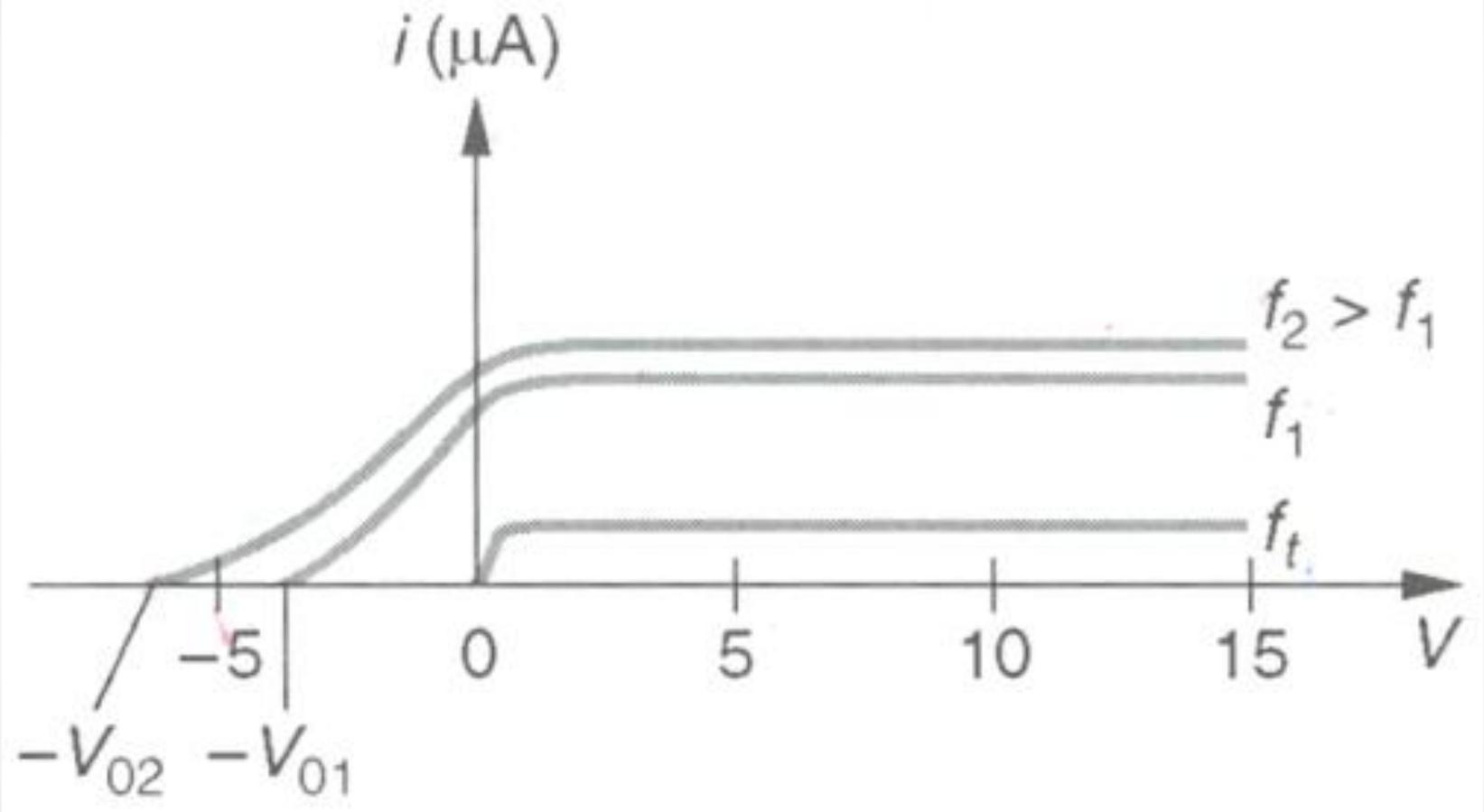


Figura do Tipler & Llewellyn

Função trabalho é a menor energia (de qualquer forma) que dada a um metal faz ele emitir elétrons.

Tabela 3-1 Funções trabalho de alguns elementos

Elemento	ϕ (eV)
Na	2,28
C	4,81
Cd	4,07
Al	4,08
Ag	4,73
Pt	6,35
Mg	3,68
Ni	5,01
Se	5,11
Pb	4,14

A descrição do efeito fotoelétrico pelo eletromagnetismo clássico

- Luz absorvida por um elétron.

- A conservação de energia no processo: $\mathcal{E}_{EB} + \mathcal{E}_e^{lig} = \mathcal{E}_e^{cin}$

OU:

$$\mathcal{E}_{EB} = \mathcal{E}_e^{cin} + \left| \mathcal{E}_e^{lig} \right|$$

- A conservação da energia para o elétron menos ligado ao material:

$$\mathcal{E}_{EB} = \mathcal{E}_e^{cin \max} + \left| \mathcal{E}_e^{lig \min} \right| = eV_o + \phi$$

- A conservação da energia para o elétron mais ligado ao material:

$$\mathcal{E}_{EB} = \mathcal{E}_e^{cin \min} + \left| \mathcal{E}_e^{lig \max n} \right|$$

- Segundo Maxwell um elétron de área ΔA absorve na unidade de tempo Δt energia eletromagnética proporcional a I :

$$\frac{\mathcal{E}_{EB}}{\Delta t} = I \Delta A = \frac{E_o^2}{2\mu_o c} \Delta A$$

- ☠ Portanto a corrente deveria ser independente da frequência e o potencial de corte deveria depender da intensidade.

Características Experimentais do Efeito Fotoelétrico

1. A corrente fotoelétrica é observada **muito rapidamente** após (quase instantaneamente) a incidência no material de radiação eletromagnética monocromática de frequência ν e intensidade I .  **EM DESACORDO COM O ELETROMAGNETISMO CLÁSSICO.**
2. A **corrente fotoelétrica** existe quando há ou não diferença de potencial entre o emissor e o coletor. Quando a diferença de potencial no coletor é positiva em relação ao emissor, se observa que a corrente **cresce para pequenos valores de potencial, atingindo um “patamar”** (da ordem de microampères) chamada **corrente de saturação.** *(Isso é uma indicação de que havia elétrons parados na vizinhança do emissor, que foram acelerados por um pequeno potencial positivo no coletor).*
- 2a. A partir daí, o número de elétrons emitidos por unidade de tempo (corrente) se torna constante *(compatível com o fato que todos os elétrons que estão saindo por efeito de incidência da luz, estão chegando no coletor formando a corrente).*

Características Experimentais do Efeito Fotoelétrico - continuação

2.b Quando se coloca um potencial negativo no coletor, a corrente fotoelétrica diminui até que cessa para certo valor de “potencial retardador” que se chama **potencial de corte** (*porque corta a corrente fotoelétrica que existia!*) e o seu valor absoluto é escrito como V_0 .

*Isto indica que **há elétrons saindo com diferentes energias cinéticas entre zero e eV_0 .***

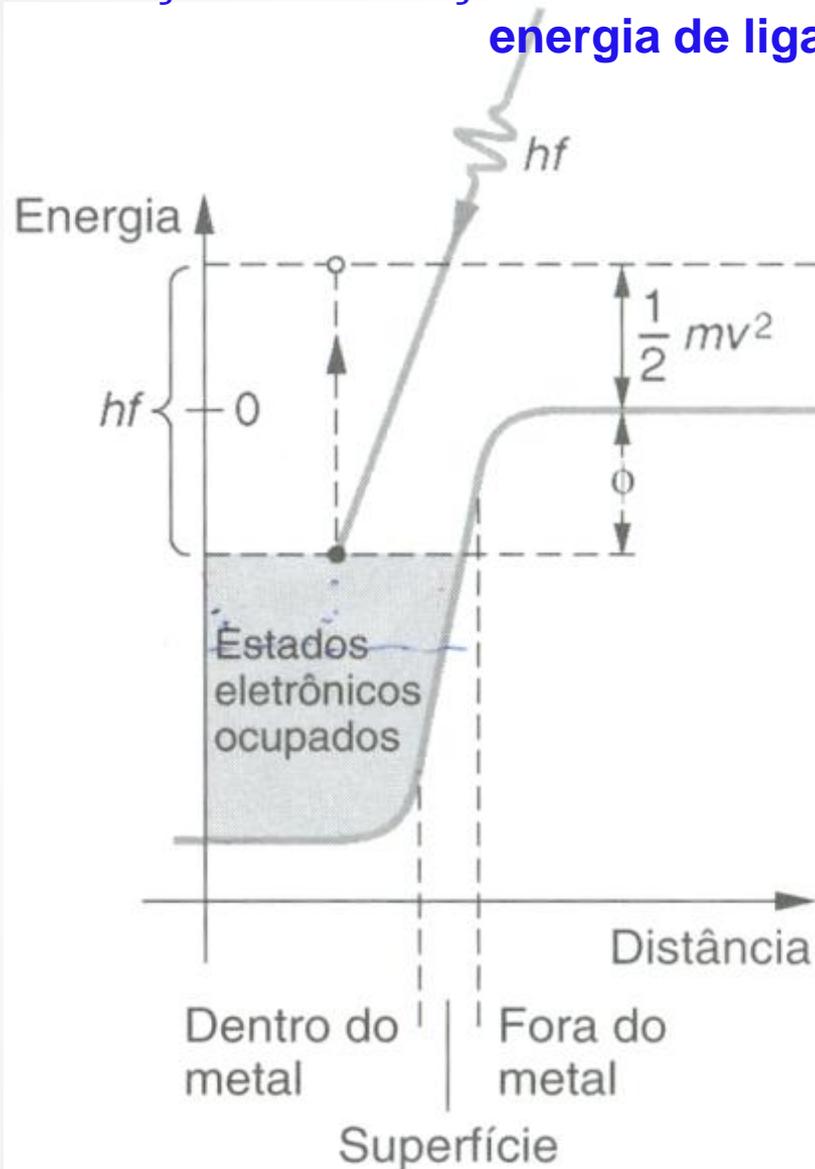
2c. O valor de V_0 **depende da frequência** da radiação para um dado material e **independe da intensidade** da radiação. ☠ **EM DESACORDO COM A FÍSICA CLÁSSICA.** Por outro lado, para uma dada intensidade, depende do material emissor – este aspecto **EM ACORDO COM A FÍSICA CLÁSSICA.**

3. O valor da corrente fotoelétrica no patamar é proporcional à intensidade do feixe incidente, mas diferente para cada material. **EM ACORDO COM A FÍSICA CLÁSSICA**

Características Experimentais do Efeito Fotoelétrico - continuação

- 4. Não** há emissão de corrente fotoelétrica, nem mesmo para **altíssimas intensidades** de feixe incidente, para **frequências menores do que certo valor** ν_0 , chamado de **frequência de corte**. A frequência de corte depende do material emissor. ☠ **EM DESACORDO COM A FÍSICA CLÁSSICA.**
- 5. A corrente** fotoelétrica de um dado material **existe para quaisquer frequências maiores do que a frequência de corte**, mesmo para **intensidades baixíssimas do feixe** de radiação incidente. ☠ **EM DESACORDO COM A FÍSICA CLÁSSICA.**

A energia de ligação dos elétrons de condução em um metal e a representação da absorção de um fóton de energia hf por um elétron de energia de ligação $-\phi$.



Energia potencial dos elétrons de condução nas proximidades da superfície do metal. Um elétron com menor energia de ligação $-\phi$ absorve um fóton de energia hf e, de acordo com a lei de conservação de energia, a energia cinética do elétron após deixar o metal é a máxima possível e deve ser $hf - \phi$. Elétrons mais ligados saem com energias cinéticas menores.

A proposta de Einstein para o efeito fotoelétrico

- Um fóton é absorvido por um elétron.

- A conservação de energia no processo: $\varepsilon_f + \varepsilon_e^{lig} = \varepsilon_e^{cin}$

ou:
$$\varepsilon_f = h\nu = \varepsilon_e^{cin} + \left| \varepsilon_e^{lig} \right|$$

- A conservação da energia para o elétron menos ligado ao material que sai com a energia cinética máxima ou **equação de Einstein para o efeito fotoelétrico:**

$$h\nu = \varepsilon_e^{cin\max} + \left| \varepsilon_e^{lig\min} \right| = eV_o + \phi$$

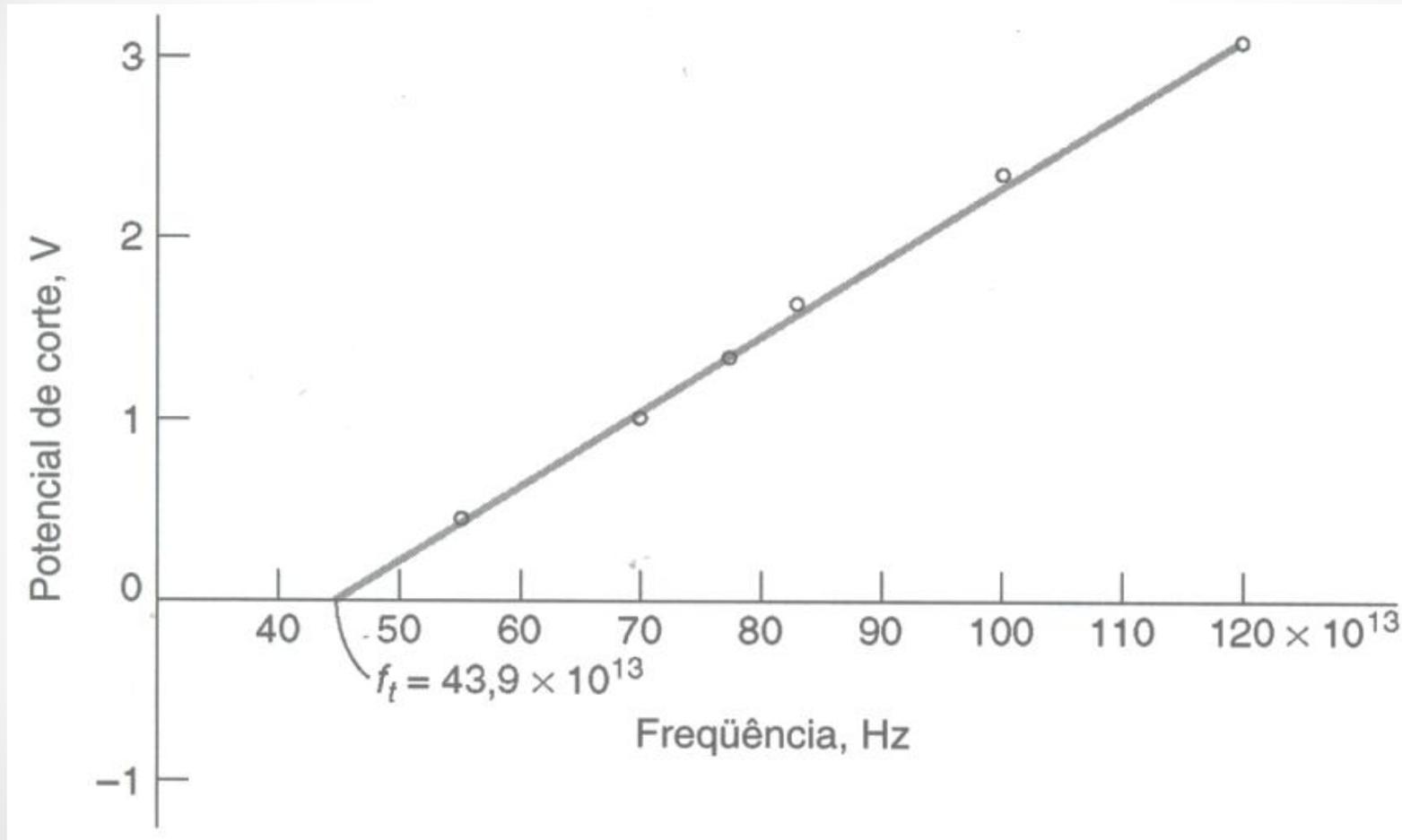
- A frequência de corte (do efeito) ν_o em um material acontece quando a energia cinética máxima é nula e o fóton só tem energia para arrancar os elétrons menos ligados:

$$h\nu_o = \phi$$

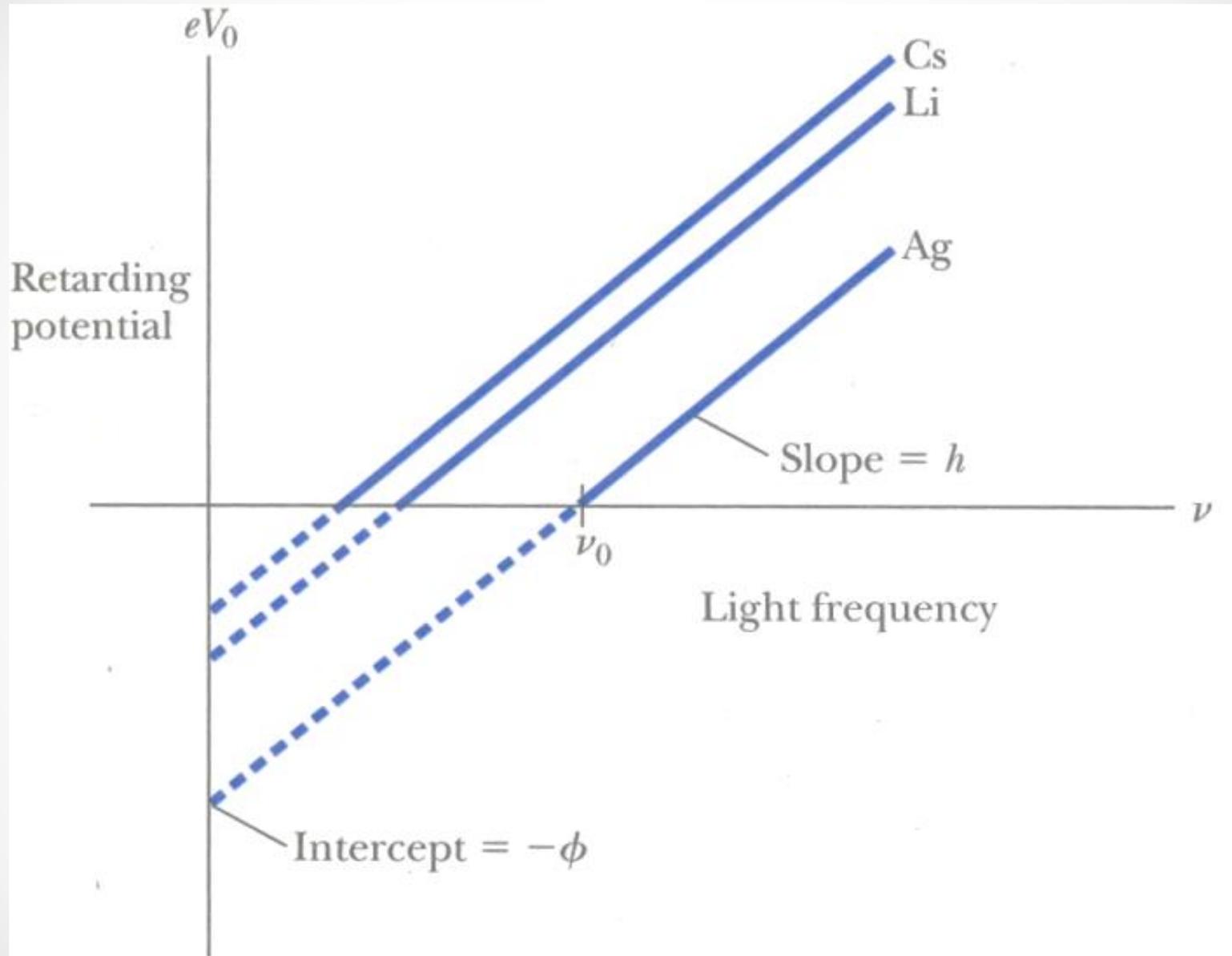
Consequências da proposta de Einstein para o que se observa no efeito fotoelétrico

- **Um fóton é absorvido por um elétron.**
- Se um fóton tem energia suficiente para arrancar o elétron ele sai. Se saem muitos ou poucos elétrons (o que determina a corrente fotoelétrica, é se há muitos ou poucos fótons chegando na unidade de tempo, definidos pela intensidade do feixe.
- Os elétrons que saem com a maior energia cinética são os que tinham a menor energia de ligação ($-\phi$). Mas elétrons com outras energias de ligação maiores, até o valor máxima da energia do fóton, podem ser arrancados, sobrando para estes elétrons menores energia cinéticas do que eV_0 .
- Ainda que haja muitíssimos fótons, em função de altíssimas intensidades do feixe, se um fóton não tem energia para arrancar os elétrons daquele metal, não haverá corrente fotoelétrica. Existe uma frequência mínima associada à energia mínima de um fóton para arrancar os (poucos) elétrons com energia de ligação mínima $-\phi$.

Experimento realizado pela primeira vez por Milikan (1916) - medida direta da equação de Einstein para o efeito fotoelétrico.



Medida direta da constante de Planck e da frequência de corte



Efeito fotoelétrico – Aplicação

Um feixe monocromático de radiação eletromagnética de comprimento de onda de 2000 angstroms e intensidade de $0,5\text{W/m}^2$ incide sobre uma placa de alumínio, cuja função trabalho é de $4,2\text{eV}$.

- a) Determine a energia dos fótons e o número médio de fótons emitidos por unidade de área e de tempo por essa fonte.
- b) Diga em palavras as razões físicas que permitem haver emissão de corrente fotoelétrica com este feixe incidindo neste metal.
- c) Determine o potencial de corte neste caso, e diga o significado físico desta grandeza.
- d) Determine a energia cinética máxima e a energia cinética mínima dos elétrons que saem do material por efeito fotoelétrico, assim como as respectivas energias de ligação destes elétrons quando no interior do alumínio. Justifique.
- e) Estes elétrons tem velocidades relativísticas quando saem do material? Justifique.
- f) Qual é a frequência mínima para que ocorra o efeito fotoelétrico no alumínio? Justifique.
- g) Determine o momento linear dos fótons responsáveis pela emissão da corrente fotoelétrica e o(s) momento(s) linear(es) dos elétrons emitidos nesta "colisão". **Como fica a conservação do momento linear nesta "colisão". Justifique.**

Visão fotônica e visão humana- Aplicação

O olho humano é sensível a **um pulso de luz** que contenha no mínimo da ordem de 100 fótons.

- a) Determine a energia de um pulso visível na luz amarela. O pulso de luz azul tem maior, menor ou igual energia? Justifique.
- b) Estime o mínimo da intensidade de pulso de luz que sensibiliza o olho humano. A íris humana tem diâmetro da ordem de 5mm.
- c) Como você explica o fato de um ser humano não ser visto por outro com luz (radiação eletromagnética) própria, apesar de alguns serem brilhantes a outros do ponto de vista humano?
- d) Quando se aquece materiais que podem chegar a altas temperaturas, como o vidro ou metais, primeiro ele é visto (por humanos) como avermelhado, e para temperaturas ainda mais altas, como "brilhante". Explique este fato com base ao seu conhecimento de emissão por efeito de temperatura, ou emissão de corpo negro. *Obs. Entre 600C e 700C (transforme em K!) um corpo é observado por um humano como vermelho escuro.*