

Instituto de Física USP

Física V - Aula 10

Professora: Mazé Bechara

Aula 10 – O efeito fotoelétrico

1. Visão fotônica: a difração e o caráter dual da radiação eletromagnética.
2. **O que é, o que se observa.**
3. Características da emissão fotoelétrica que podem, e as que não podem ser descritas pelo caráter ondulatório do feixe de luz.
4. **A proposta de Einstein** para descrever o efeito fotoelétrico – um fóton interagindo com um elétron ligado.
5. Como a **proposta de Einstein** permite a descrição de **todas** as características observadas no efeito fotoelétrico.
6. **Aplicação do efeito fotoelétrico.**

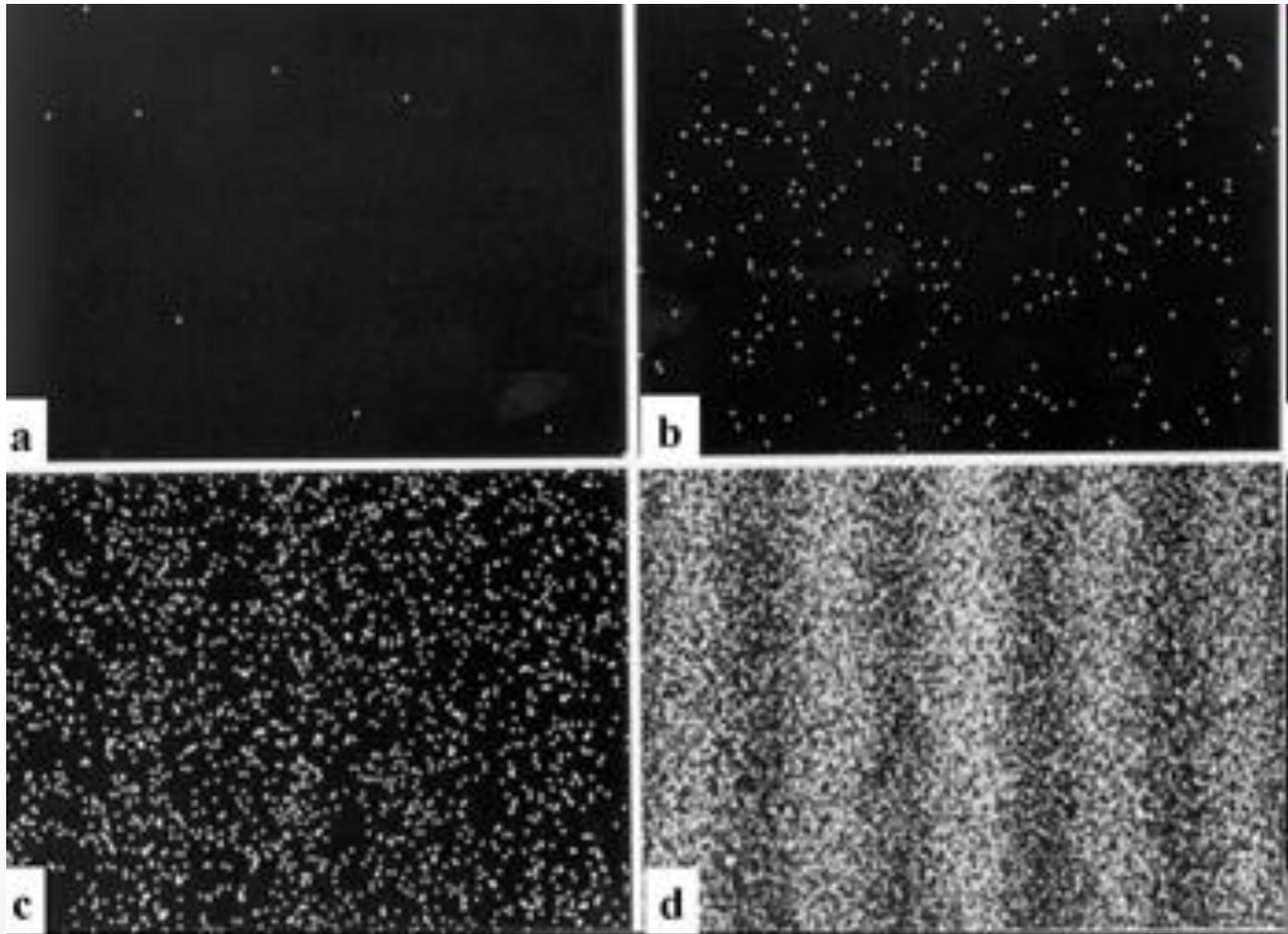
Fótons – partículas com energia (ε) e momento linear (p).

Relações entre as grandezas corpusculares (ε, p) e as
ondulatórias (ν, λ)

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = pc$$

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} = pc \quad \text{Fótons: } m_0 = 0$$

O padrão de difração por uma fenda por feixe monocromático de baixa intensidade (*tempo de exposição crescente de a a d*) – a compatibilidade do caráter ondulatório e corpuscular .



Emissão de elétrons por materiais.

Emissão mais fácil nos metais

- 1. Efeito termoiônico:** o metal recebe calor que é transferida ao elétron de condução, o elétron “livre” do metal, que adquire energia e escapa do metal.
- 2. Emissão secundária:** o elétron recebe, em colisão, energia de uma outra partícula que tem energia cinética “suficiente” e consegue escapar do materia.
- 3. Emissão por campo:** um forte campo elétrico externo pode dar energia ao elétron para ele escapar do metal.
- 4. Efeito fotoelétrico:** energia eletromagnética incidindo em metais faz com que elétrons saiam do seu interior.

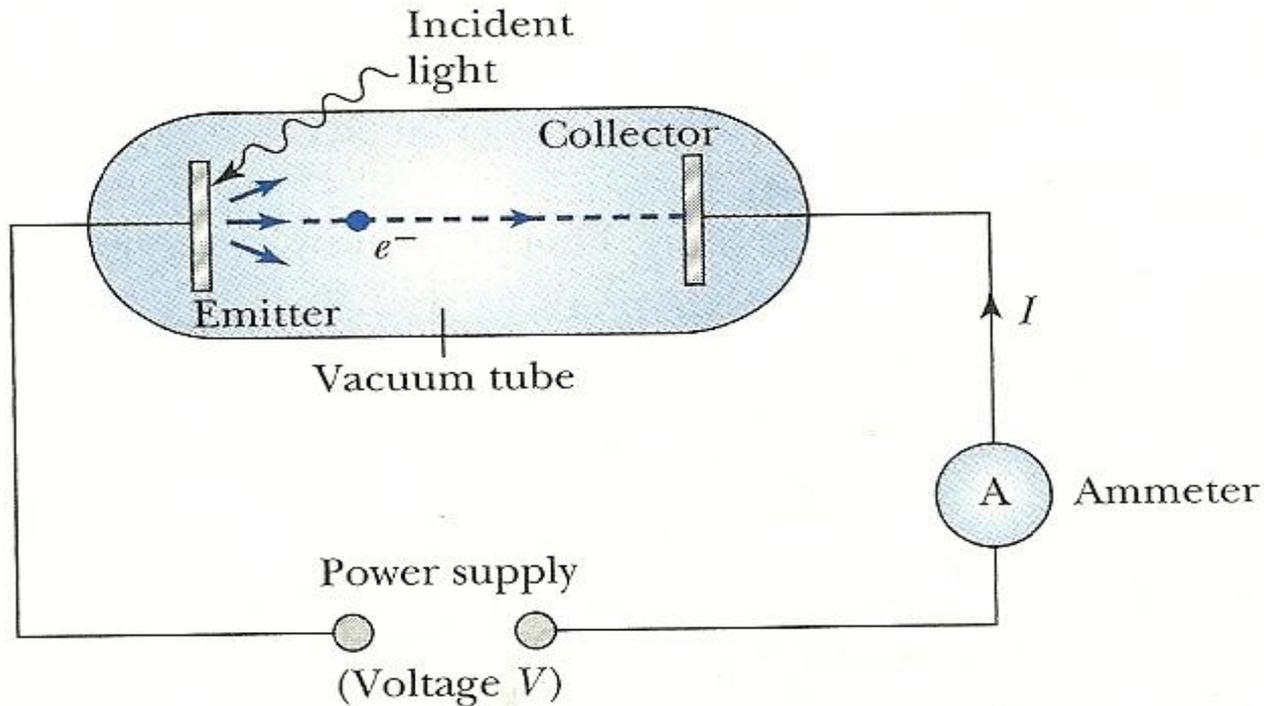
No caso dos metais os elétrons de condução “elétrons livres” são os mais fáceis de serem arrancados: precisam receber menor energia para isto.

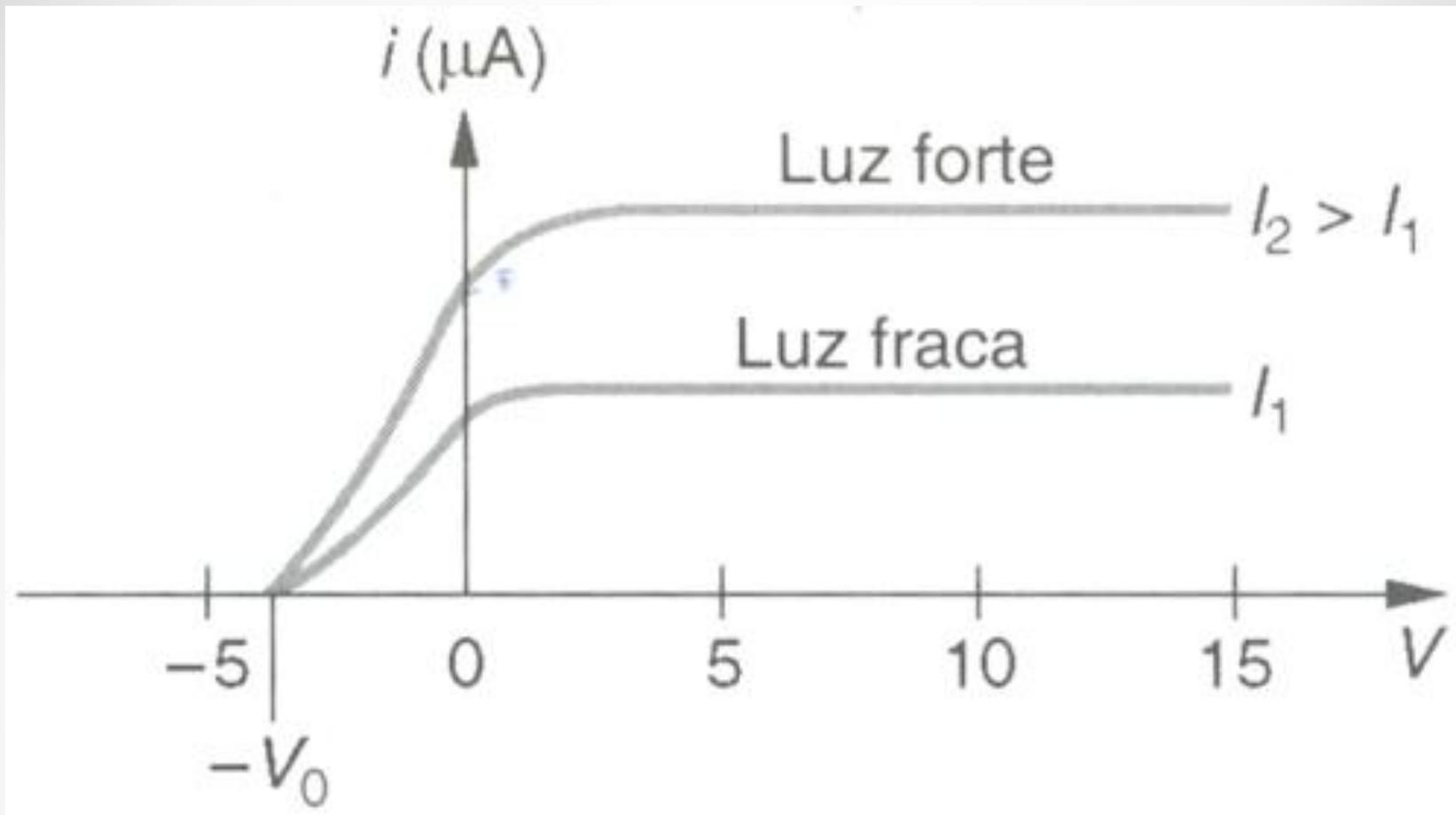
O efeito fotoelétrico – uma motivação da visão fotônica proposta por Einstein

- **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)**. **Ironias da ciência!**
- **O que é o efeito fotoelétrico:** emissão de elétrons por materiais por incidência de radiação eletromagnética.
- **Se o material é um metal, o efeito fotoelétrico é observado com clareza quando a radiação incidente tem frequência monocromática visível ou ultravioleta.**
- **Como se observa:** pela corrente (ordem de micro ampères) fotoelétrica criada e medida em um circuito que se fecha entre o material emissor de elétron e um coletor.

Equipamento para medir efeito fotoelétrico

(diferente do usado no Laboratório de Física V!)





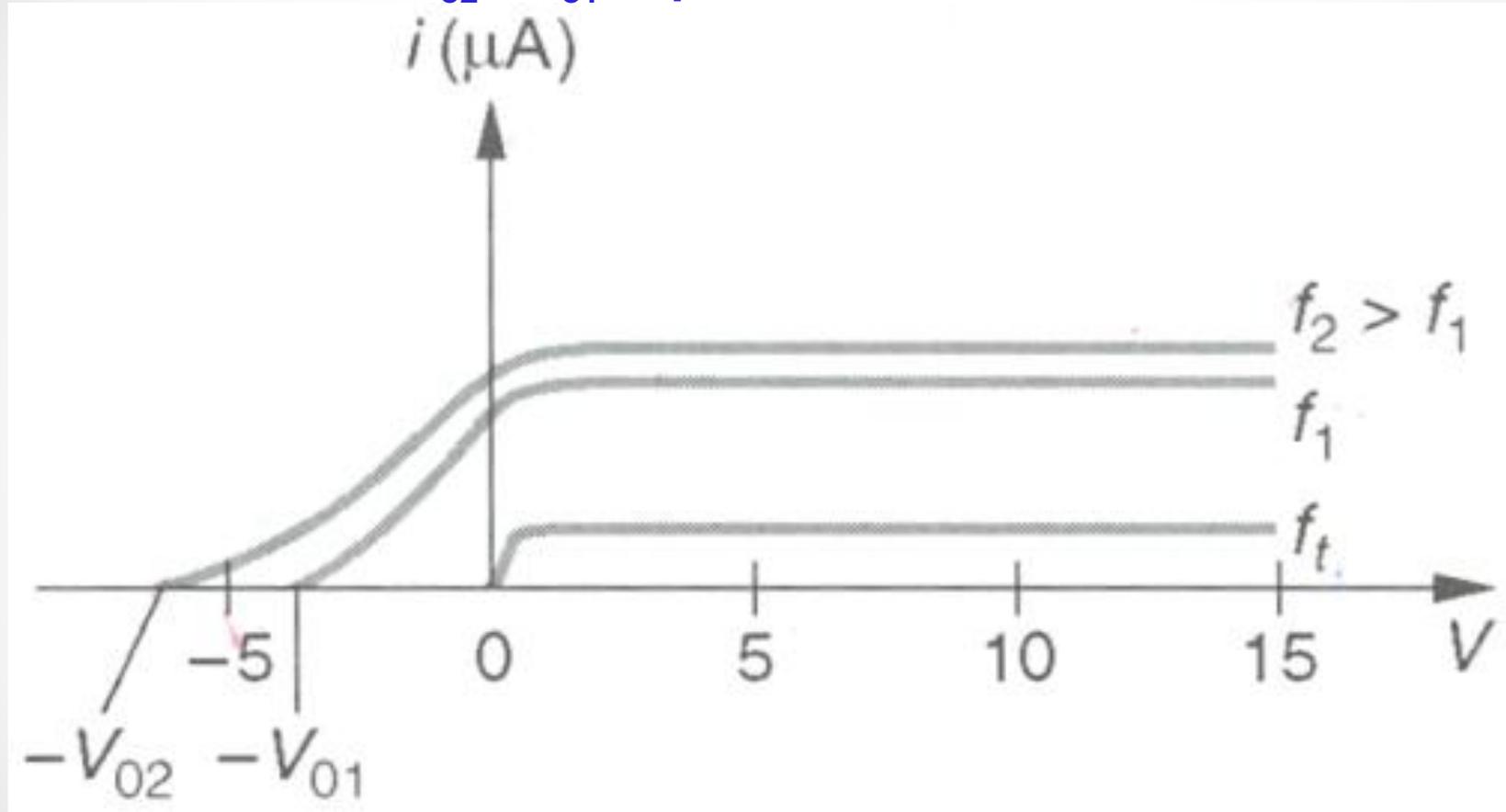
Corrente fotoelétrica i em função da diferença de potencial V entre emissor e coletor, para luz de frequência f e duas intensidades $I_2 > I_1$.

A tensão de corte V_0 é a mesma nos dois casos (mesmo emissor).

Obs. Para outro emissor o comportamento é similar com outro valor de potencial de corte e de correntes de saturação.

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



☠ **Cuidado: A figura 3.12 do Thornton & Rex, equivalente a este experimento, está errada!** Entenda porque a corrente de saturação cai com o decréscimo da frequência

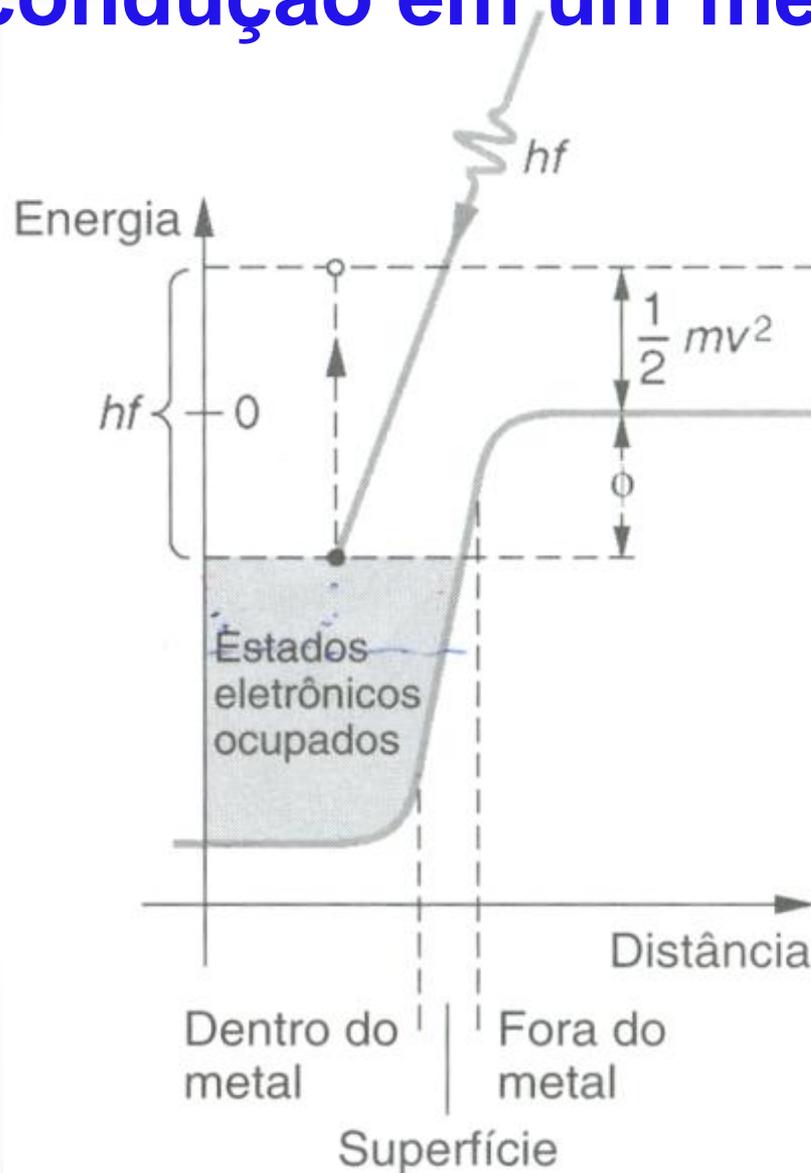
Figura do Tipler & Llewellyn

Função trabalho: a menor energia que dada a um material (metais na tabela) faz ele emitir elétrons. *Interpretação:* $-\phi$ é a mínima energia de ligação do elétron no partaicular metal.

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 energia de ligação dos elétrons de condução em um metal



O efeito fotoelétrico segundo o eletromagnetismo clássico

- Energia eletromagnética 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 arrancado do 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 arrancado ao material:

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

- Segundo a onda de 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 de saturação 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 . Pode ser estimado este tempo (feito em aula)  Resultado **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. **O número de elétrons emitidos por unidade de tempo (corrente) se torna constante mesmo aumentando o potencial acelerador de elétrons** *(compatível com o fato que todos os elétrons que estão saindo do metal por unidade de tempo, por efeito de incidência da luz, estão chegando no coletor formando a corrente constante).*

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 é $-V_0$. (*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 para um dado material. **☠ EM DESACORDO COM A FÍSICA CLÁSSICA.**

Por outro lado, para uma dada intensidade, o potencial de corte depende do material emissor EM ACORDO COM A FÍSICA CLÁSSICA.

3. O valor da **corrente fotoelétrica no patamar** é proporcional à intensidade do feixe incidente, e **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.**
- ☠ Ter frequência de corte está **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 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:
$$\varepsilon_f = h\nu = \varepsilon_e^{cin} + \left| \varepsilon_e^{lig} \right|$$

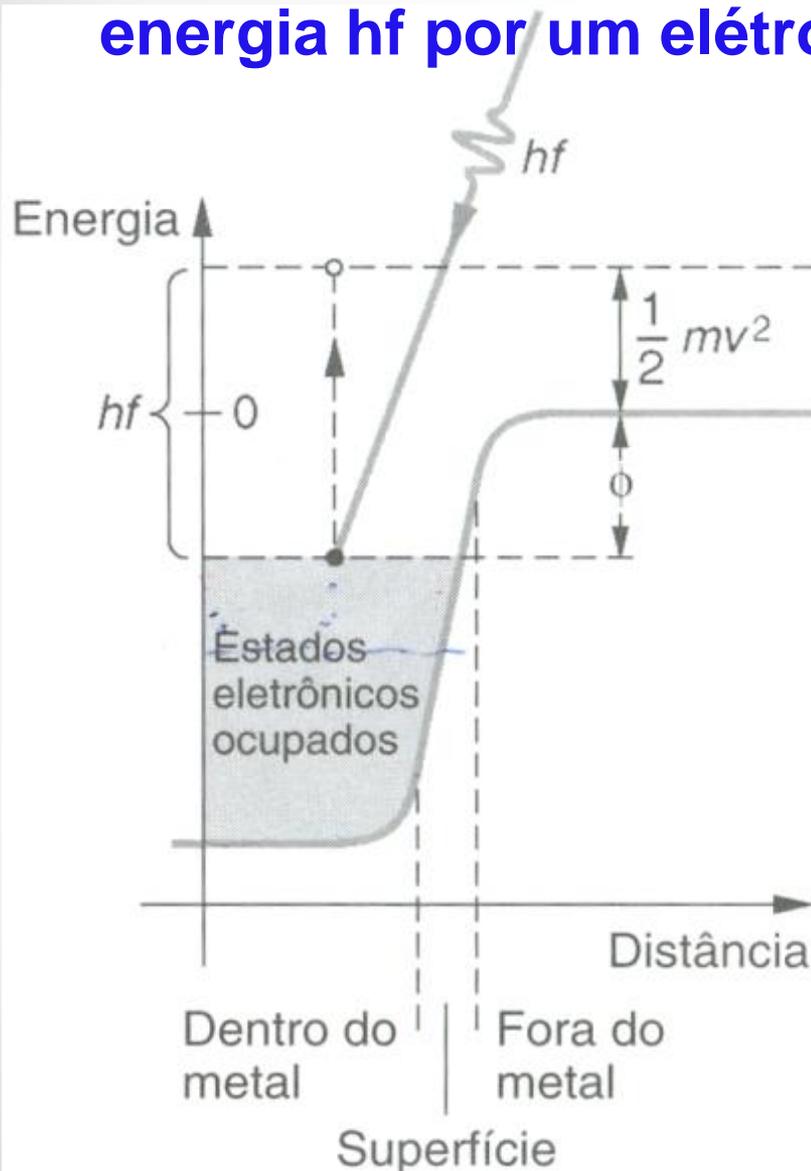
- A conservação da energia quando o elétron menos ligado sai do material, e ele sai com a cinética máxima entre os que saíram do material, ou a **equação de Einstein para o efeito fotoelétrico**:

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

- 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:

$$h\nu_o = \phi$$

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 $-\phi$.



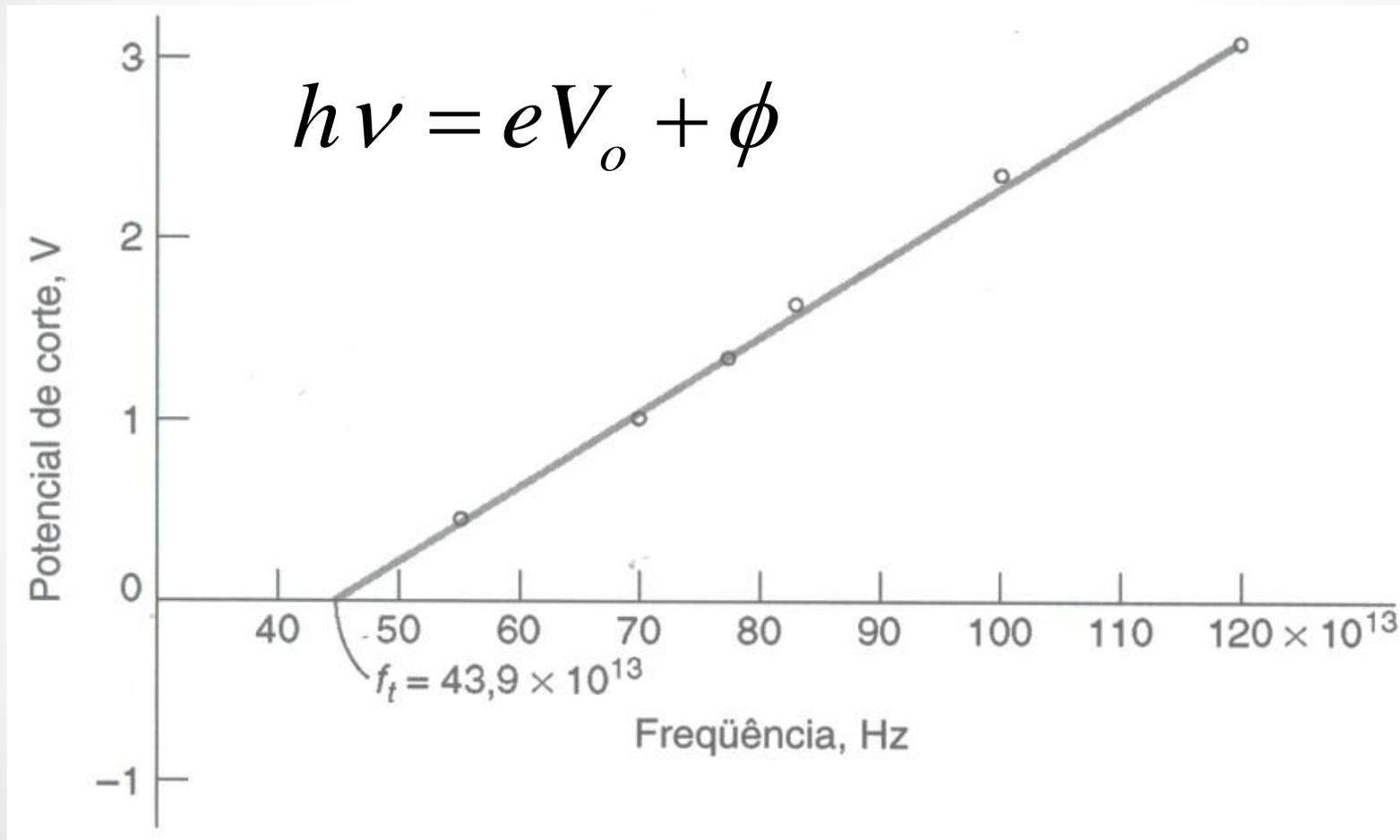
Energia potencial dos elétrons de condução nas proximidades da superfície do metal.

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: $hf - \phi = eV_o$. Elétrons mais ligados saem com energias cinéticas menores, até os que tem energia de ligação hf que absorve o fóton e sai com energia cinética nula. .

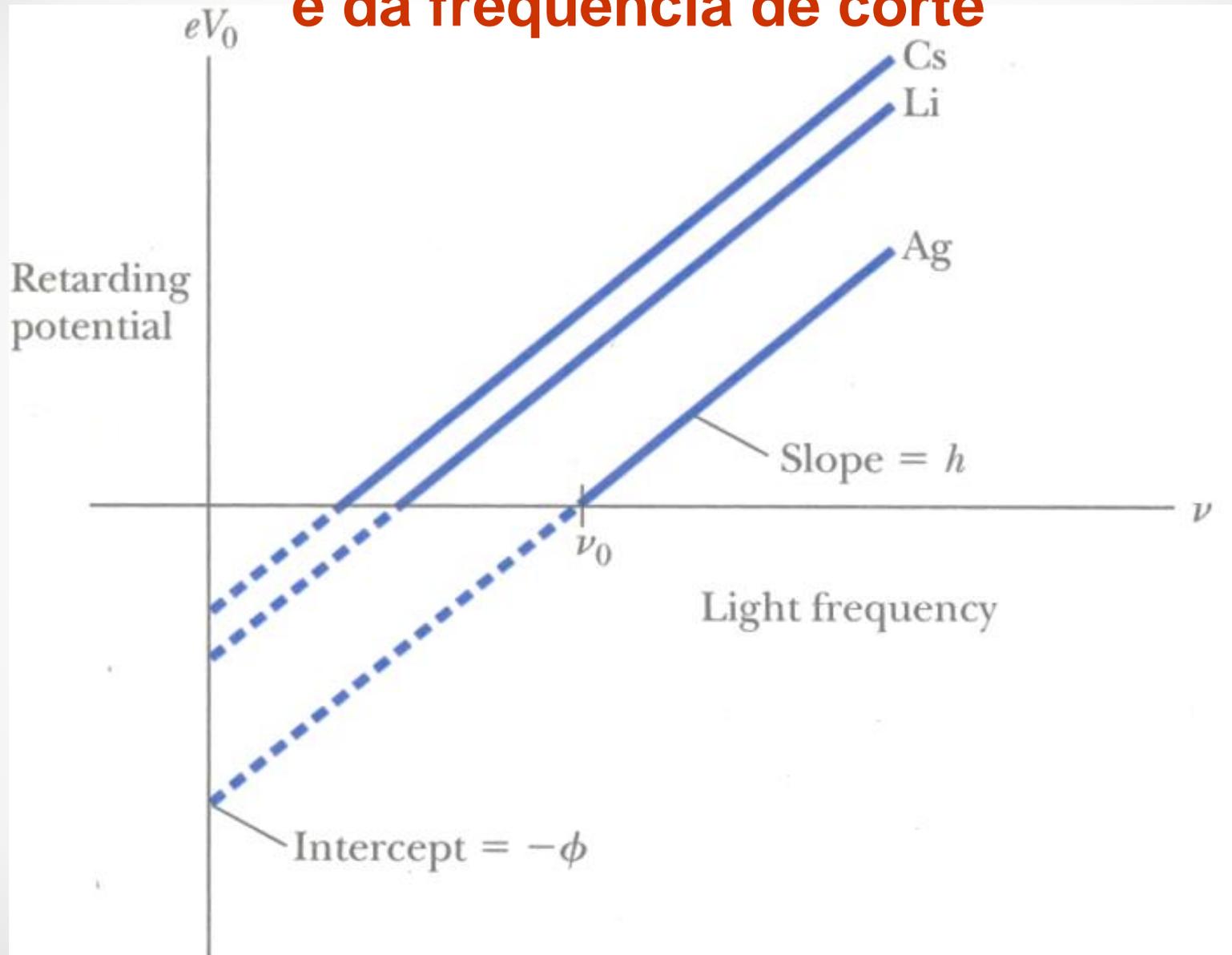
Consequências da proposta de Einstein para o que se observa do efeito fotoelétrico: **um fóton é absorvido por um elétron ligado**

1. 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.
2. Os elétrons que saem com a maior energia cinética são os que tinham a menor energia de ligação ($-\phi$). Mas elétrons com 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 .
3. 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 $-\phi$, típica do material .

Medida direta da equação de Einstein para o efeito fotoelétrico - realizada pela primeira vez por Milikan (1916).



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 esta fonte.
- b) **Explique, em palavras, as condições** para haver emissão de corrente fotoelétrica quando o feixe descrito acima incide na placa de alumínio, **segundo a proposta de Einstein**.
- 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 do feixe** para que ocorra o efeito fotoelétrico **no alumínio**? **Justifique**.
- g) **Determine o momento linear dos fótons (em eV/c) 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**.