

Instituto de Física *USP*

Física V - Aula 11

Professora: Mazé Bechara

AVISOS

1. A aula de 21/3, quinta-feira será uma aula de aplicações. **Excepcionalmente não haverá a sessão monitoria às 13h.**
2. Na página da disciplina: o TEC2, a presença nas três primeiras semanas, a anotação de quem entregou e de quem não entregou o tec 1.
3. *Alunos sem nome na lista de presença que entregaram o tec 1, por favor, resolvam sua situação na seção de alunos até 23/4. Não serão corrigidos os tec2 dos alunos sem nome na lista de presença.*
4. Os tecs devem ser entregues em papel. Não serão aceitos, a partir do TEC 2, os trabalhos enviados por e.mail.

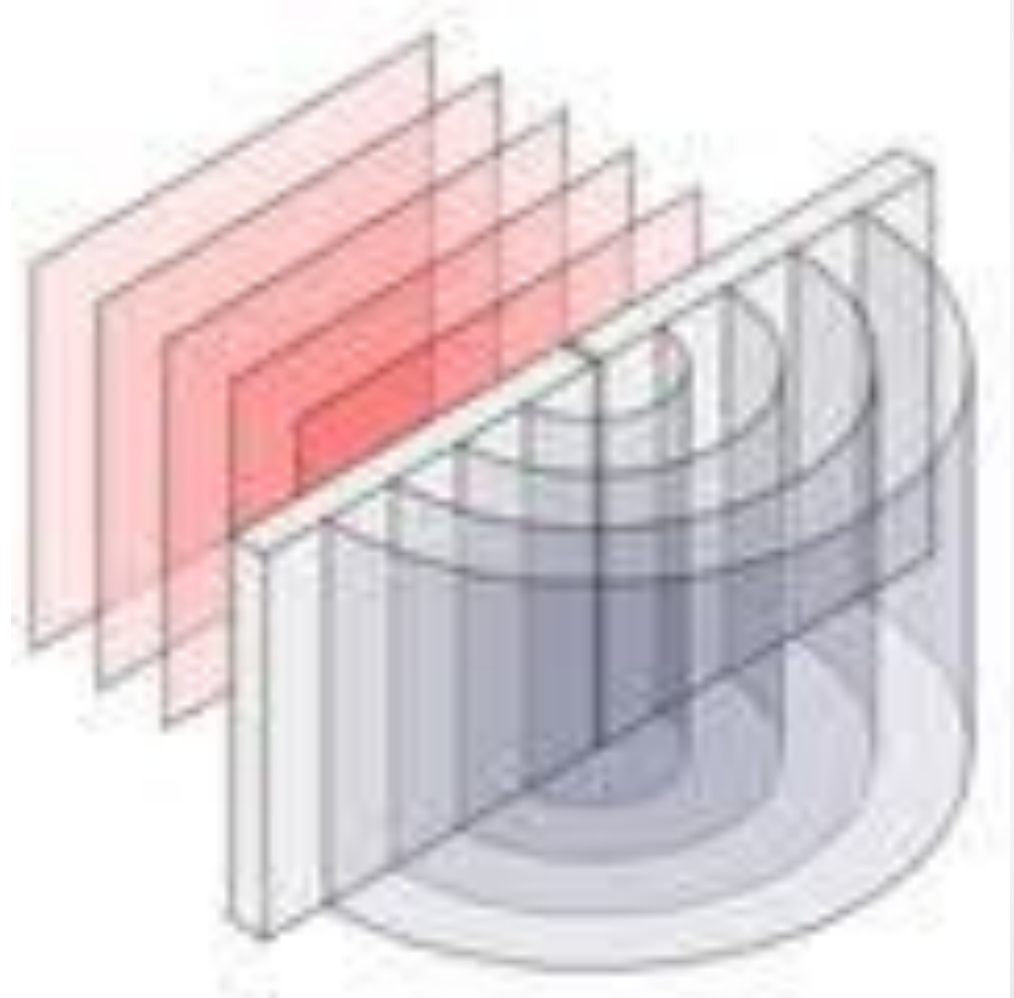
Aula 11 – A proposta de Einstein para a luz e o efeito fotoelétrico

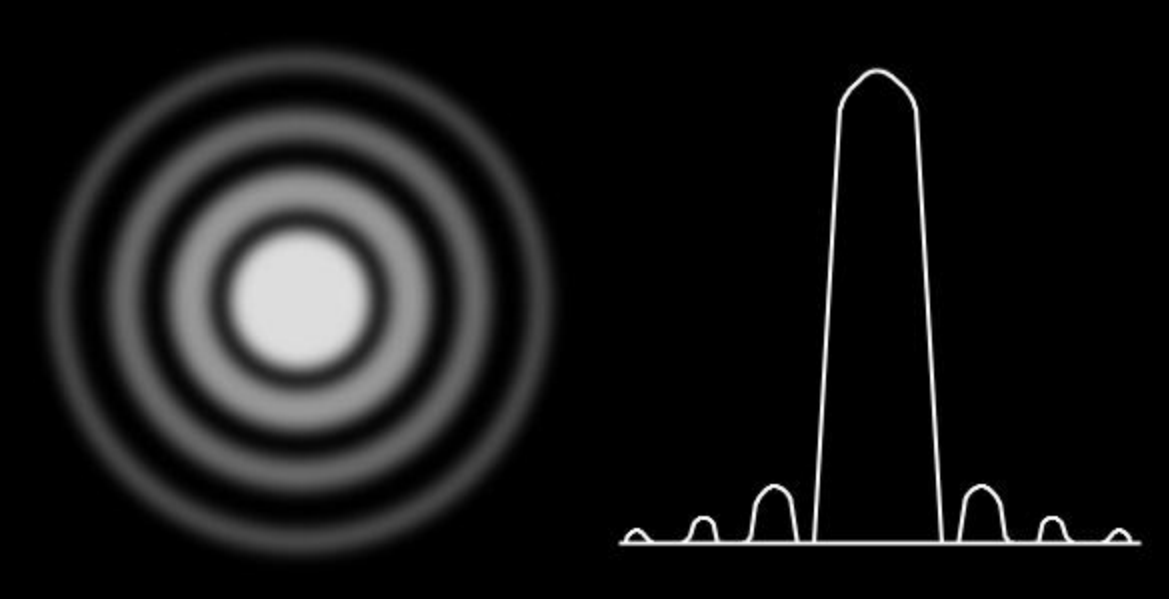
1. **A proposta de Einstein de granulação na energia da onda eletromagnética: as partículas da onda - os fótons.** Distinguindo a quantização de Einstein da de Planck.
2. **Visão fotônica:**
 1. A compatibilidade entre as visões de Maxwell e Einstein na intensidade das fontes – o número médio de fótons por unidade de tempo e área nas frentes da onda eletromagnética monocromáticas.
 2. A difração e o caráter dual da radiação eletromagnética.
 3. Aplicação
3. **Efeito fotoelétrico:**
 1. **O que é, o que se observa.**
 2. 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. Como a **proposta de Einstein** permite a descrição de todas as características observadas no efeito fotoelétrico.

Ondas Eletromagnéticas *planas e cilíndricas*

Onda cilíndrica quando a espessura da fenda é muito menor do que o comprimento de onda.

Em um anteparo plano muito distante da fenda (raio de curvatura muito grande na frente de onda), a intensidade é praticamente constante.

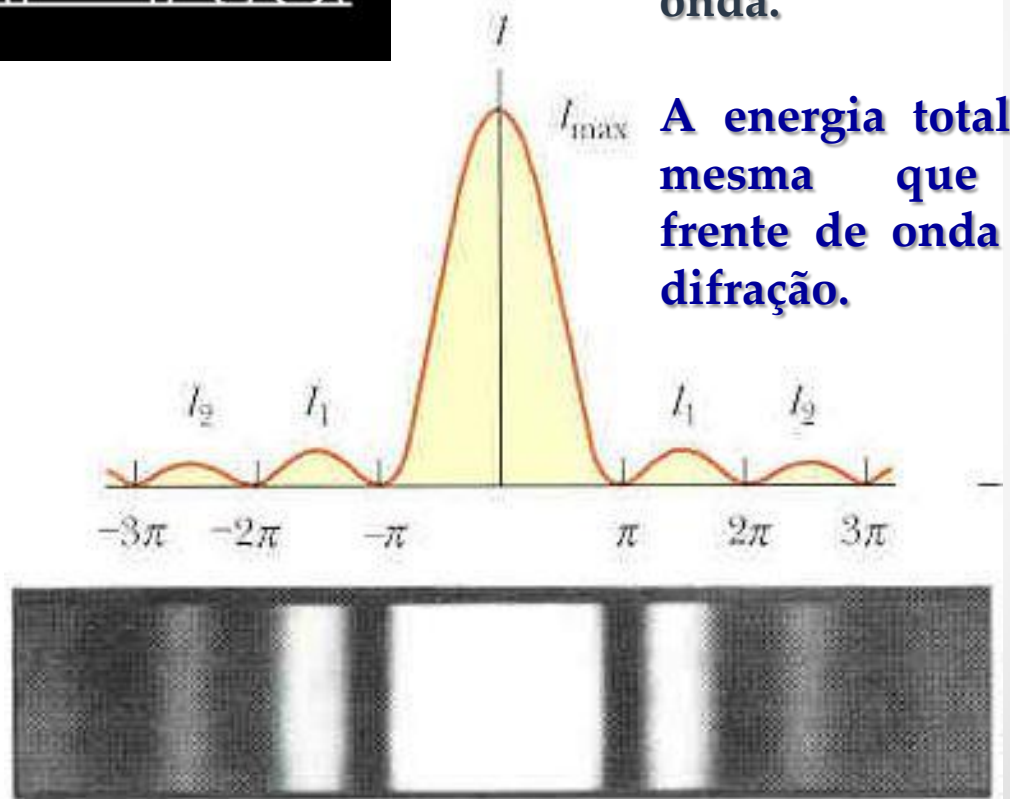




A “impressão digital” de uma onda: padrões de interferência.

Nas figuras são mostrados os padrões de difração de OEM, por um orifício circular (acima) e por uma fenda vertical (ao lado).

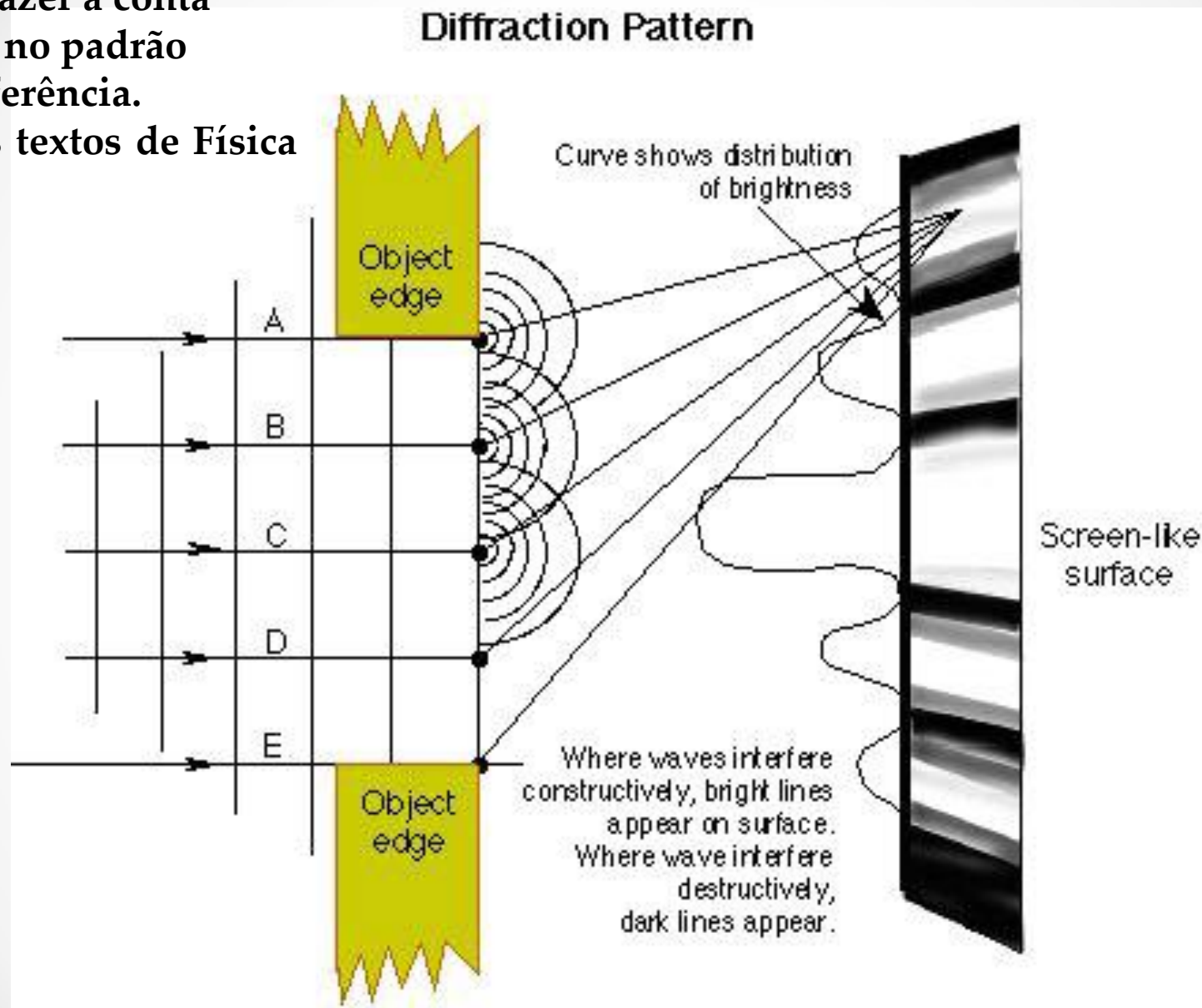
A figura em um anteparo plano longe da fonte de onda cilíndrica quando a largura da fenda é da ordem de grandeza do comprimento de onda.



A energia total é a mesma que na frente de onda sem difração.

Para se fazer a conta
e chegar no padrão
de interferência.

Veja nos textos de Física
IV.



Albert Einstein (1879 –1955) – físico alemão - prêmio Nobel de Física em 1921



Foto de
Einstein por
volta de 1905

Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz

HÁ UMA profunda diferença formal entre os conceitos teóricos que os físicos formaram a respeito dos gases e de outros corpos ponderáveis e a teoria de Maxwell dos processos eletromagnéticos no assim chamado espaço vazio. Embora consideremos o estado de um corpo como completamente determinado pelas posições e velocidades de um número muito grande mas ainda assim finito de átomos e elétrons, fazemos uso de funções espaciais contínuas para determinar o estado eletromagnético de um volume no espaço, de modo que um número finito de quantidades não pode ser considerado como suficiente para a determinação completa do estado eletromagnético do espaço. De acordo com a teoria de Maxwell, a energia é considerada uma função espacial contínua para todos os fenômenos puramente eletromagnéticos, e, portanto, também para a luz, enquanto, de acordo com o ponto de vista atual dos físicos, a energia de um corpo ponderável deve ser representada como uma soma sobre os átomos e elétrons. A energia de um corpo ponderável não pode ser dividida em um número arbitrariamente grande de partes arbitrariamente pequenas, mas, de acordo com a teoria de Maxwell (ou, de modo mais geral, de acordo com qualquer teoria ondulatória), a energia de um raio de luz, emitido de uma fonte puntiforme, espalha-se continuamente sobre um volume sempre crescente.

A teoria ondulatória da luz, que opera com funções espaciais contínuas, provou-se sobremaneira adequada na

descrição de fenômenos puramente ópticos, e provavelmente nunca será substituída por outra teoria. Deve-se ter em mente, porém, que as observações ópticas referem-se a médias temporais, e não a valores instantâneos; e é bastante concebível, a despeito da confirmação experimental completa da teoria da difração, reflexão, refração, dispersão, etc., que a teoria da luz, operando com funções espaciais contínuas, leve a contradições quando aplicada aos fenômenos de emissão e transformação da luz.

De fato, parece-me que as observações da “radiação de corpo negro”, fotoluminescência, produção de raios catódicos por luz ultravioleta e outros fenômenos associados à emissão ou transformação da luz podem ser mais facilmente entendidas se admitirmos que a energia da luz é distribuída de forma descontínua no espaço. De acordo com a hipótese aqui considerada, na propagação de um raio de luz emitido por uma fonte puntiforme, a energia não é continuamente distribuída sobre volumes cada vez maiores de espaço, mas consiste em um número finito de quanta de energia, localizados em pontos do espaço que se movem sem se dividir e que podem ser absorvidos ou gerados somente como unidades integrais.

Neste trabalho, desejo apresentar a cadeia de raciocínios e citar os fatos que me levaram por esse caminho, na esperança de que a abordagem aqui apresentada venha a se mostrar útil para alguns pesquisadores em suas investigações.

**Do livro: O Ano Miraculoso de Einstein
cinco artigos que mudaram a face da Física**



A intensidade da luz – compatibilizando onda de Maxwell e fótons de Einstein

- Partículas nas frentes de ondas eletromagnéticas: com velocidade da luz, c no vácuo, e energia proporcional a frequência.

$$\varepsilon_f = h\nu$$
$$I = \left\langle \frac{dU_{EB}}{dA dt} \right\rangle_t = \left\langle \frac{dN_f}{dA dt} \right\rangle_t h\nu$$

- Para I constante, seja onda plana, esférica ou cilíndrica, a intensidade independe da frequência. Depende apenas da distância à fonte, no caso das ondas esféricas e cilíndrica. :

$$I = \left\langle \frac{|\vec{E}(\vec{r}, t) \times \vec{B}(\vec{r}, t)|}{\mu_0} \right\rangle_t = \frac{E^2(r)}{2\mu_0 c} \Rightarrow \left\langle \frac{dN_f}{dA dt} \right\rangle_t \propto \nu^{-1}$$

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

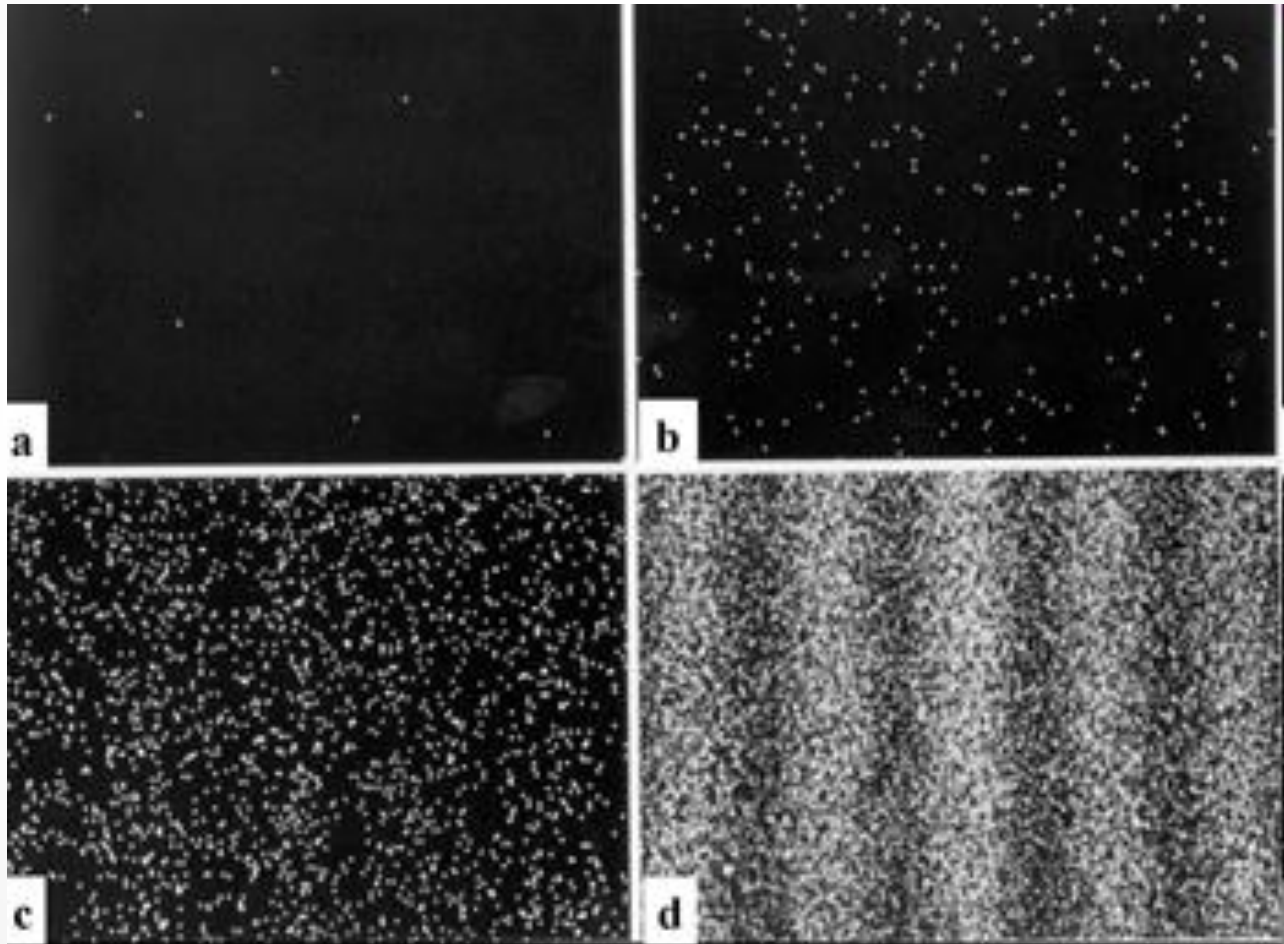
$$\varepsilon = h \nu = \frac{hc}{\lambda} = pc$$

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

Os fótons em um feixe de luz

1. Represente lado a lado em uma figura a distribuição espacial da energia de um feixe de luz de **intensidade I** e **frequência ν** quando incide em uma placa plana: **segundo Maxwell** e **segundo Einstein**. Justifique.
2. Represente agora lado a lado a distribuição de energia sobre a placa plana do feixe de **mesma intensidade I** e o **dobro de frequência (2ν)**: **segundo Maxwell** e **segundo Einstein**. Justifique.

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 fotoelétrico:** **energia eletromagnética incidindo em metais faz com que elétrons saiam do seu interior.**
- 2. Efeito termoiônico:** o metal recebe calor (que é onda eletromagnética...) que aumenta a energia cinética média do sistema, e pode ocorrer de elétrons de condução, elétrons “livre” do metal, adquirem energia suficiente para “escapar” de sua pequena ligação no metal.
- 3. Emissão secundária:** o elétron recebe, em colisão, energia de uma outra partícula que tem energia cinética “suficiente” e consegue escapar do matéria.
- 4. Emissão por campo:** um forte campo elétrico externo pode dar energia ao elétron para ele escapar do metal.

No caso dos metais os elétrons de condução “elétrons livres” são os mais fáceis de serem arrancados pois precisam receber menores energias para isto.

Emissão de elétrons por materiais.

Emissão mais fácil nos metais

No caso dos metais os elétrons de condução ou “elétrons livres” são os mais fáceis de serem arrancados pois precisam receber menores energias para isto.

Energias entre 2eV e 10eV são suficientes para haver emissão de elétrons nos metais. O valor mínimo de energia para arrancar elétrons de metais é chamada função trabalho.

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 particular 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

PENSE!

1. Pode ocorrer efeito fotoelétrico em outros materiais que não o metal?

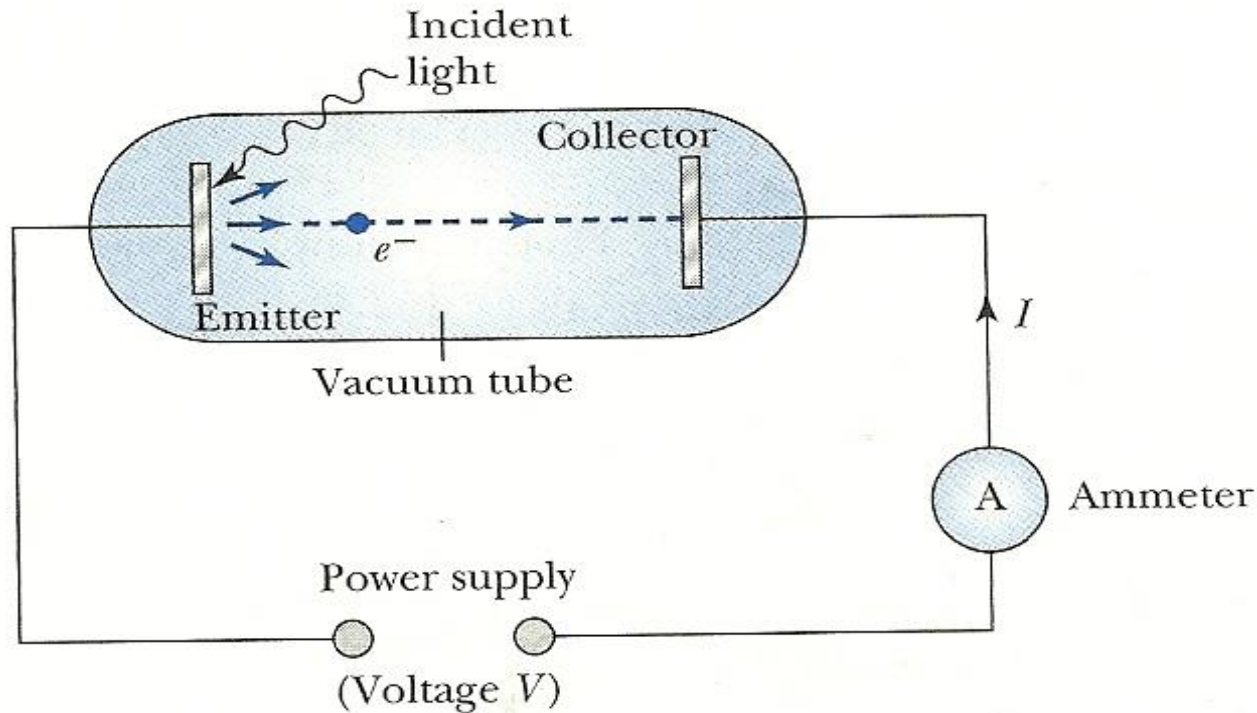
2. Se sim, em que condições?

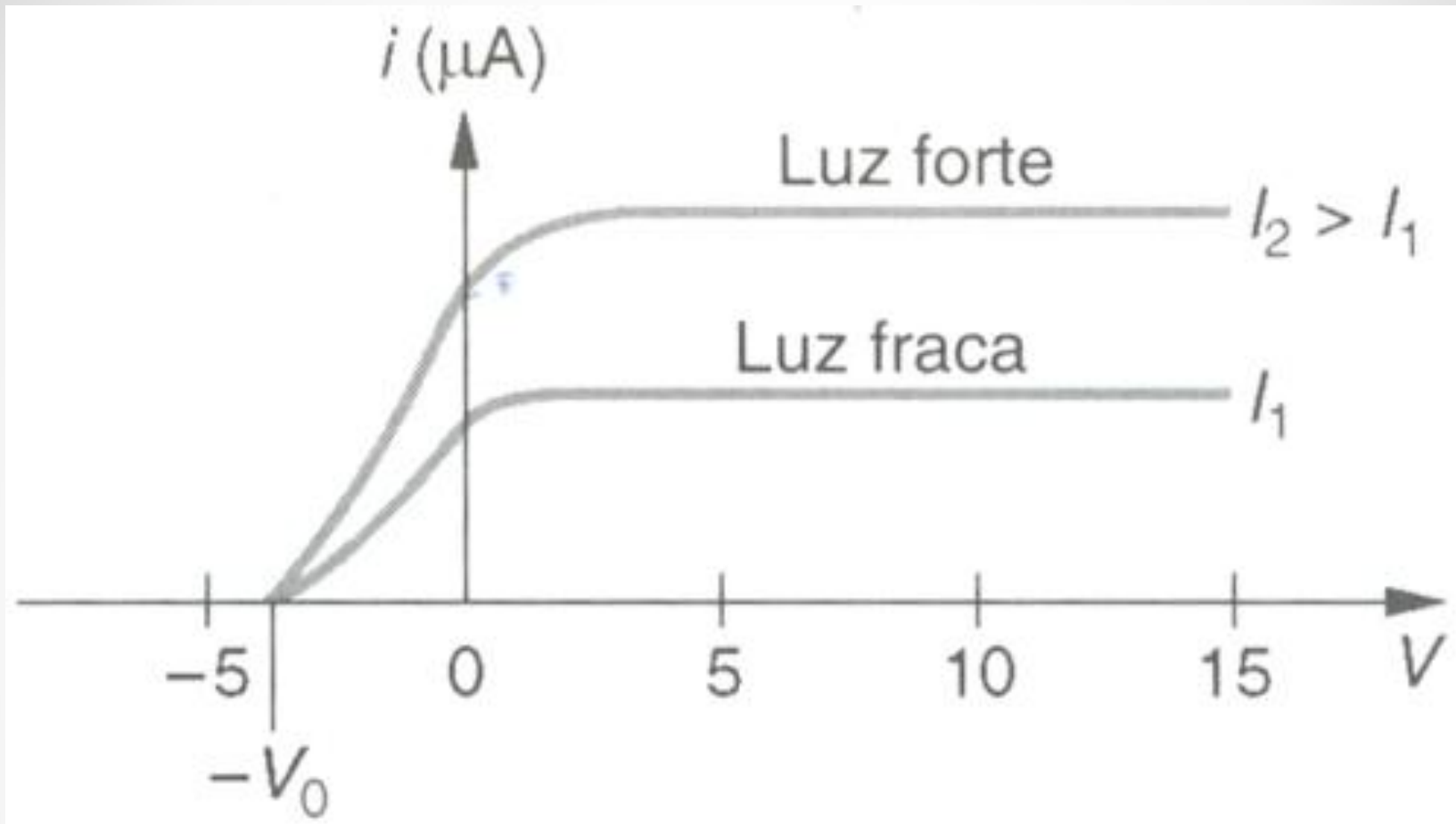
O efeito fotoelétrico – uma motivação da visão fotônica proposta por Einstein

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

Equipamento para medir efeito fotoelétrico

(Cuidado: diferente do usado no Laboratório de Física V!)



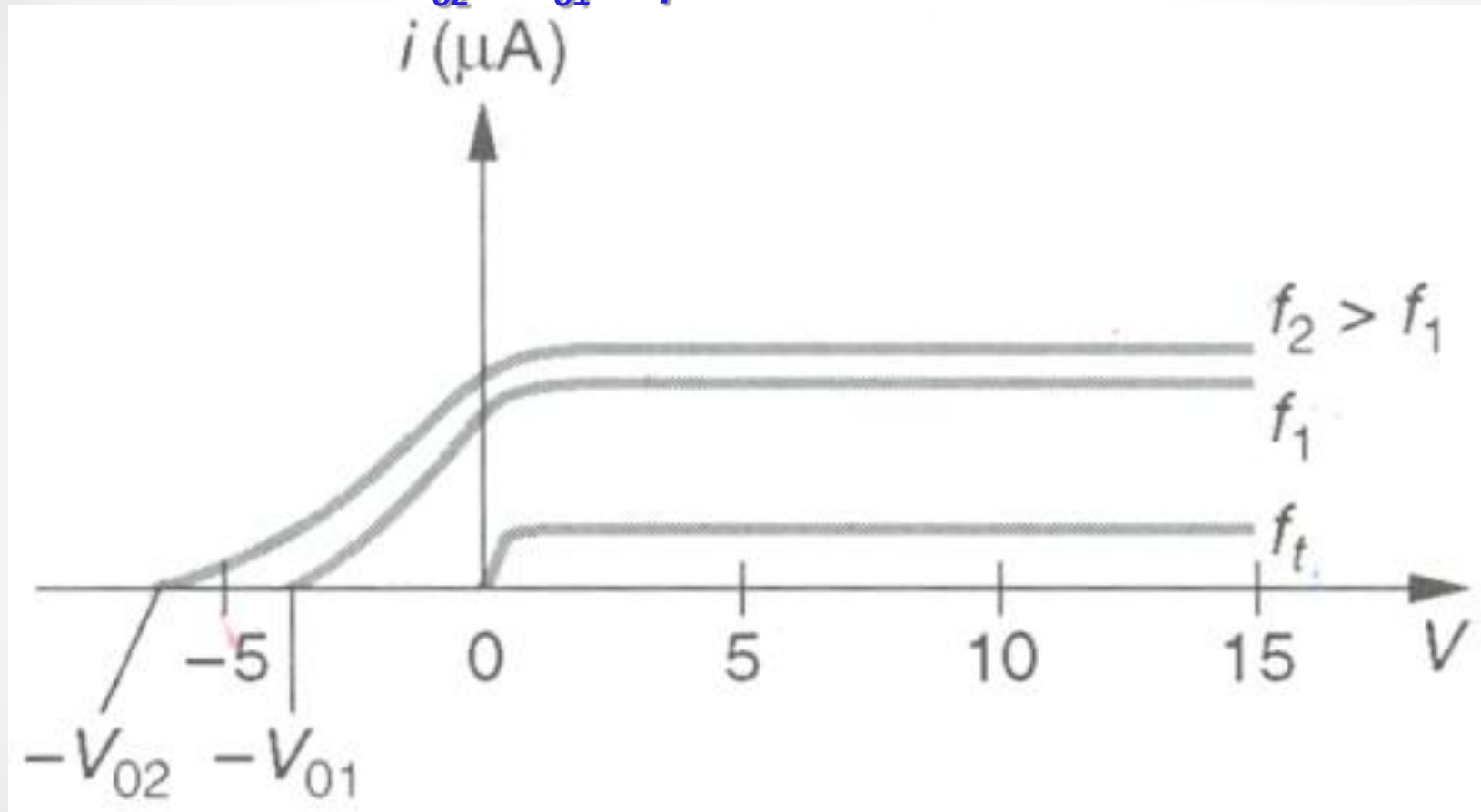


Corrente fotoelétrica i em função da diferença de potencial V entre emissor e coletor, para luz de frequência f e duas intensidades $I_2 > I_1$.

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.

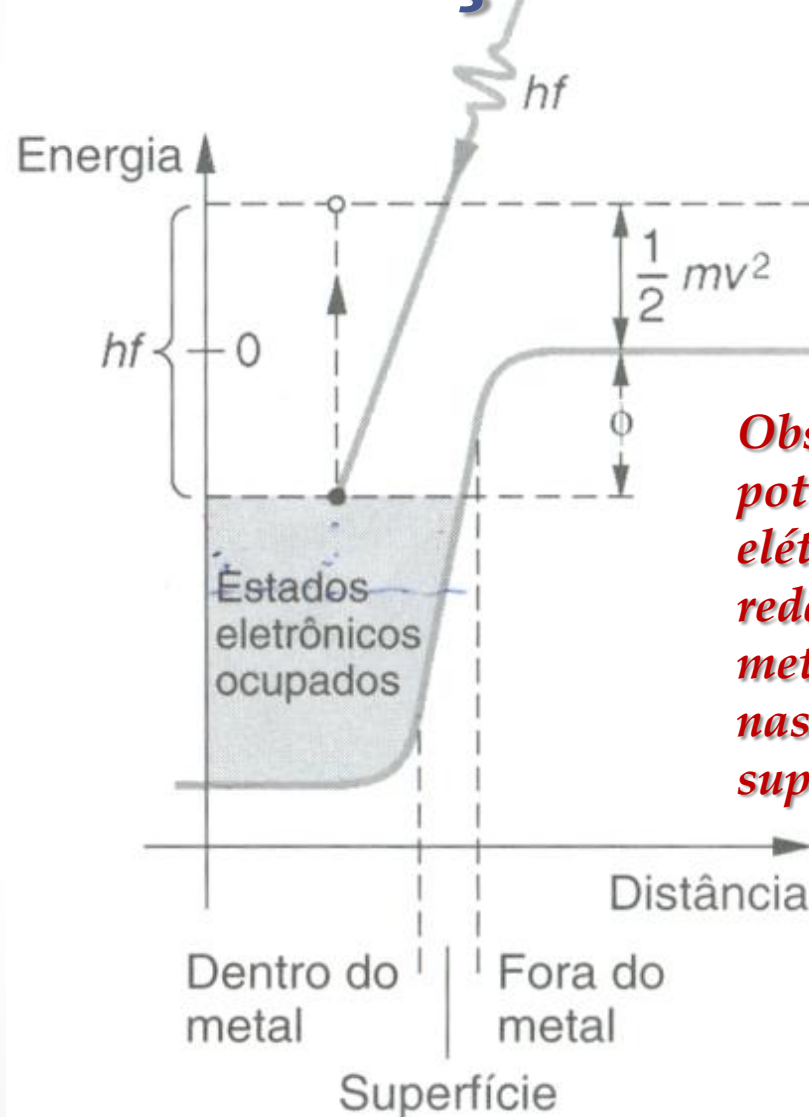
Corrente fotoelétrica i versus o potencial V no catodo emitida em experimentos com feixes de mesma intensidade mas diferentes frequências f , incidindo sobre mesmo material no emissor. Os valores V_{o2} e V_{o1} dependem do material



☠ **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

A energia potencial de ligação dos elétrons de condução em um metal



Observe que a energia potencial de interação dos elétrons de condução com a rede é constante dentro dos metais e varia rapidamente nas vizinhanças da superfície.

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:

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

- 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:
$$\varepsilon_f = h\nu = \varepsilon_e^{cin} + |\varepsilon_e^{lig}|$$

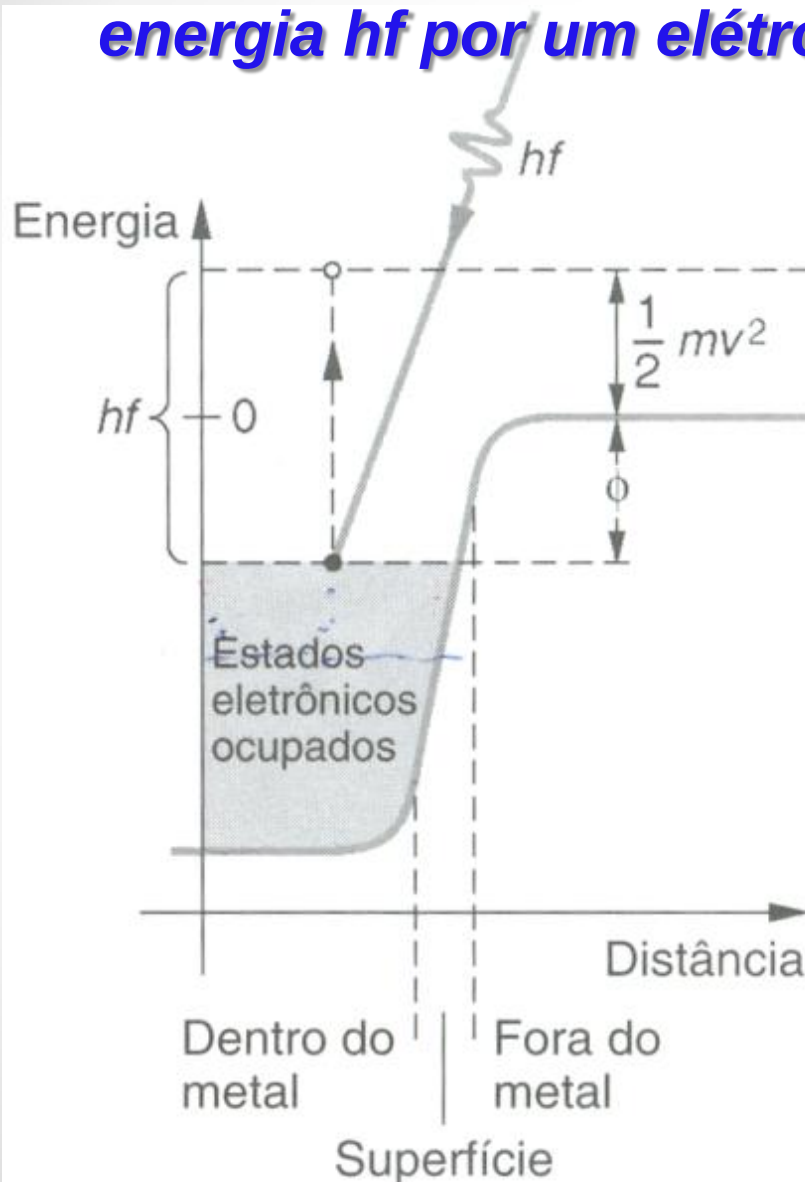
- A conservação da energia quando o elétron menos ligado sai do material, e ele sai com a cinética máxima entre os que saíram do material, ou a **equação de Einstein para o efeito fotoelétrico**:

$$h\nu = \varepsilon_e^{cinmax} + |\varepsilon_e^{ligmin}| = eV_o + \phi$$

- 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 $-\phi$.



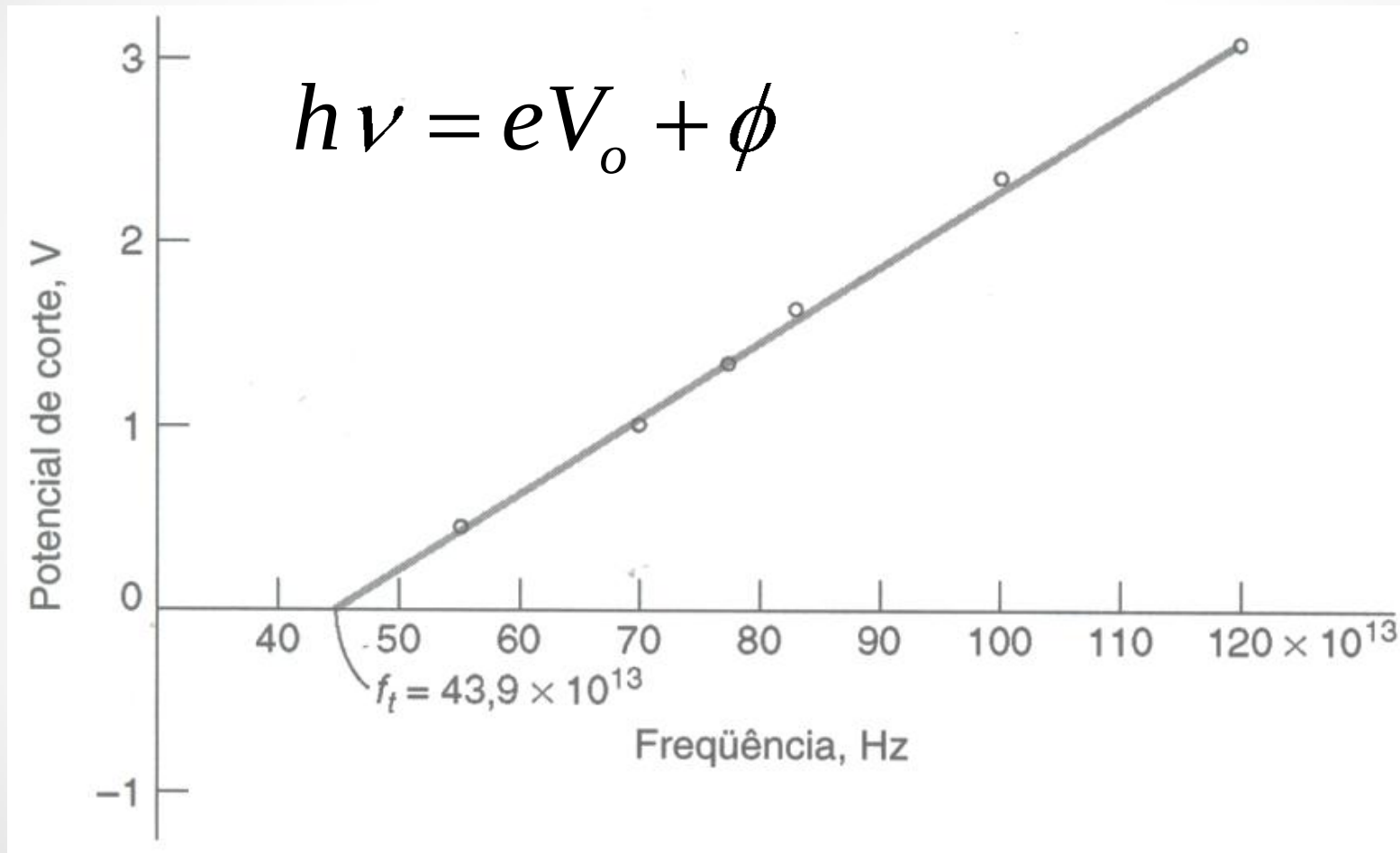
Energia potencial dos elétrons de condução nas proximidades da superfície do metal.

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. .

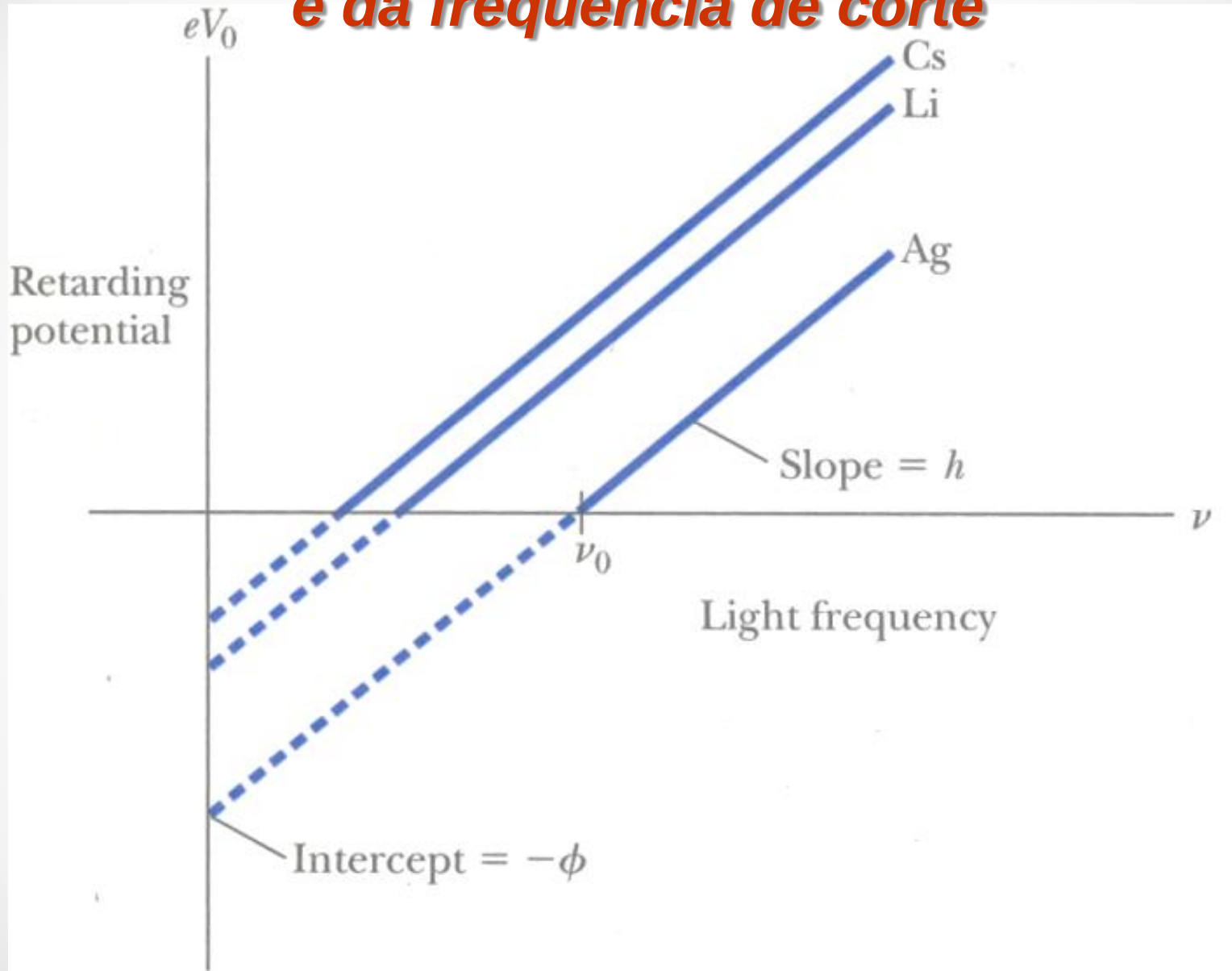
Consequências da proposta de Einstein para o que se observa do efeito fotoelétrico: *um fóton é absorvido por um elétron ligado*

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.**