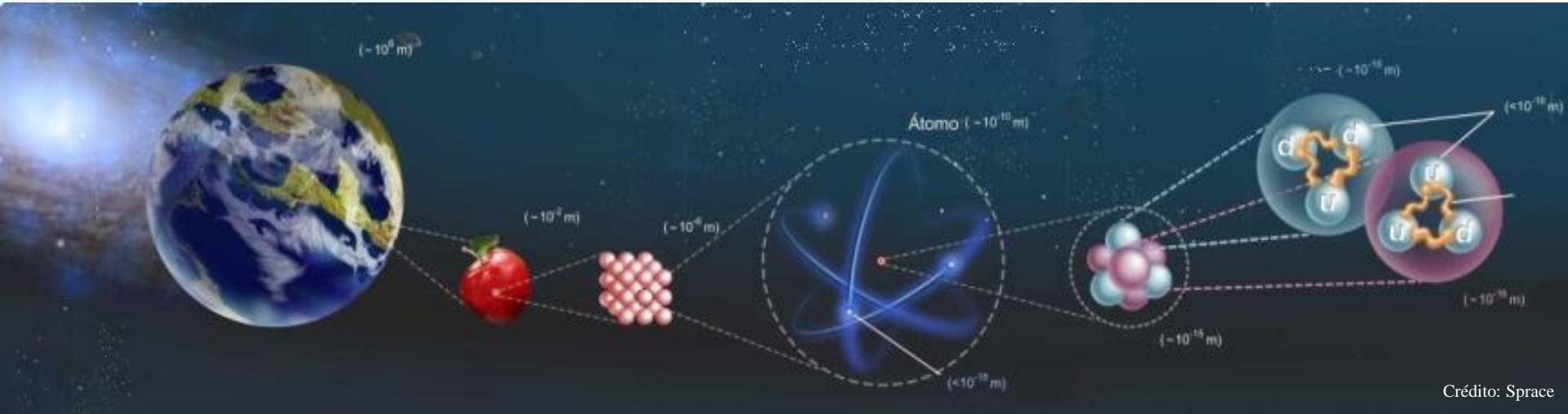




Universidade Federal do ABC

BCK0103: FÍSICA QUÂNTICA

1º Quadrimestre de 2024



Prof. Marcelo Augusto Leigui de Oliveira
CCNH – UFABC
leigui@ufabc.edu.br

Ondas e Partículas

Ondas e Partículas

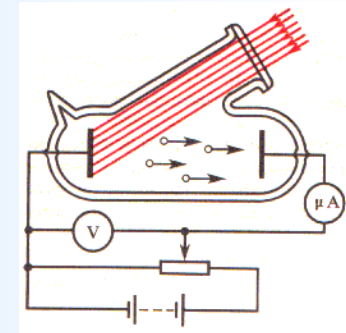
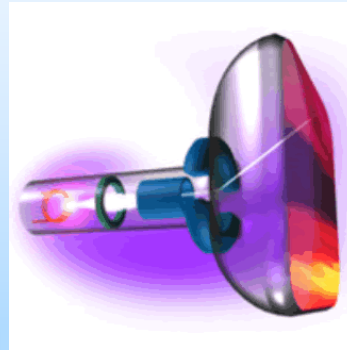
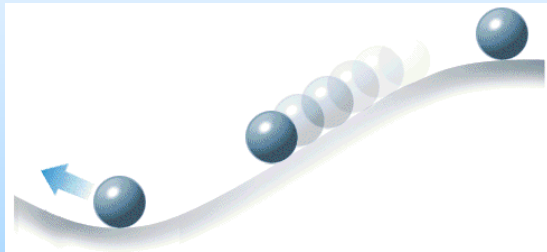
Partículas: pequenas distribuições de matéria capazes de transportar energia.

Ondas: largas distribuições de energia que se propagam sem transportar matéria.

Ondas e Partículas

Partículas: pequenas distribuições de matéria capazes de transportar energia.

Ex: pedra em vôo, carro numa estrada, elétrons num tubo de raios catódicos, fóton (efeito fotoelétrico).

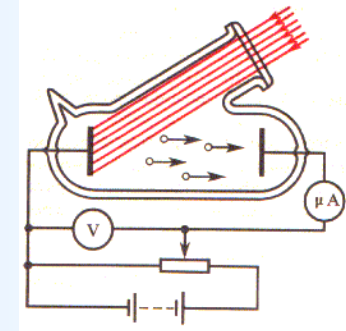
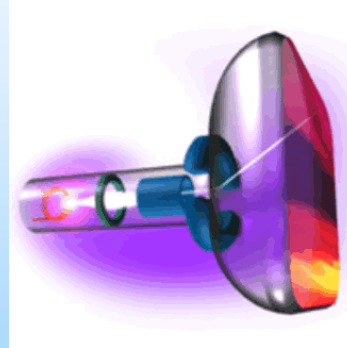
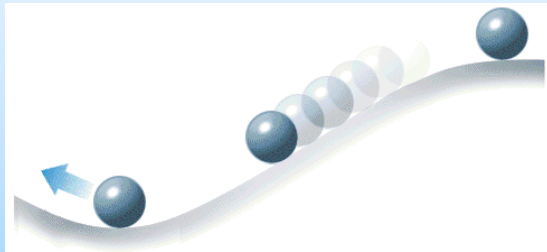


Ondas: largas distribuições de energia que se propagam sem transportar matéria.

Ondas e Partículas

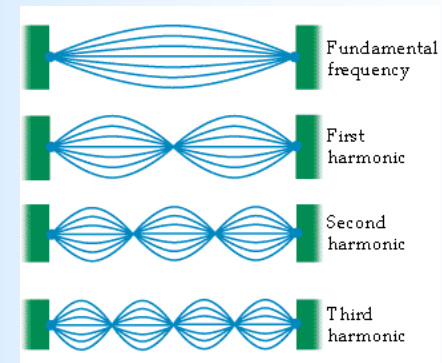
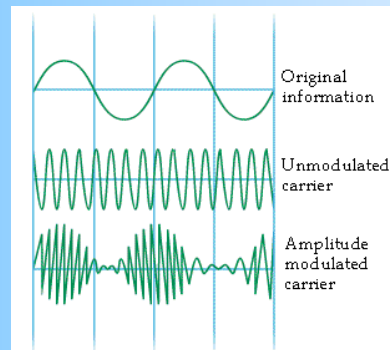
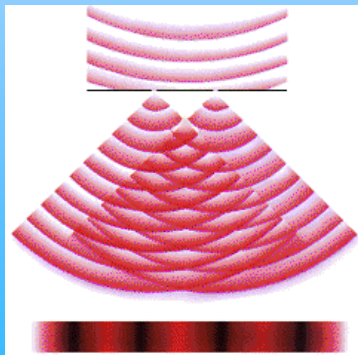
Partículas: pequenas distribuições de matéria capazes de transportar energia.

Ex: pedra em vôo, carro numa estrada, elétrons num tubo de raios catódicos, fóton (efeito fotoelétrico).



Ondas: largas distribuições de energia que se propagam sem transportar matéria.

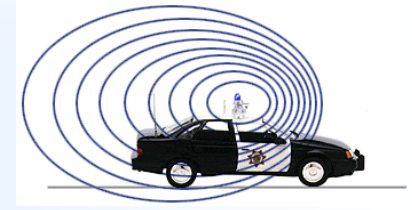
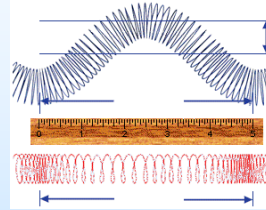
Ex: onda numa corda, som, elétron numa rede cristalina, luz.



Tipos de Ondas

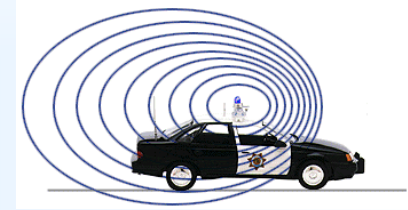
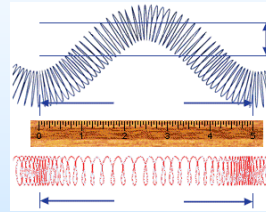
Tipos de Ondas

1. Ondas mecânicas: ondas que se propagam num meio material. Ex: ondas numa corda, som, ondas sísmicas.

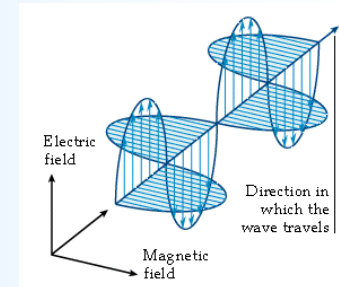
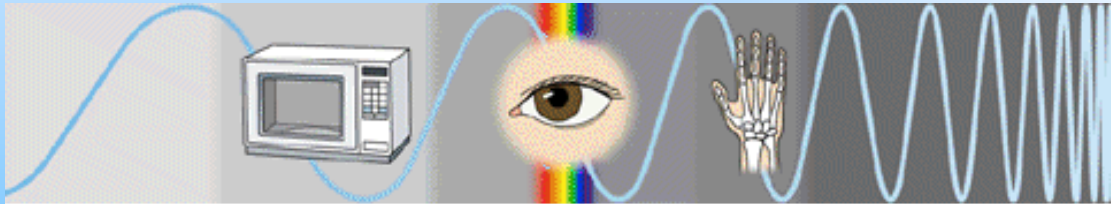


Tipos de Ondas

1. Ondas mecânicas: ondas que se propagam num meio material. Ex: ondas numa corda, som, ondas sísmicas;

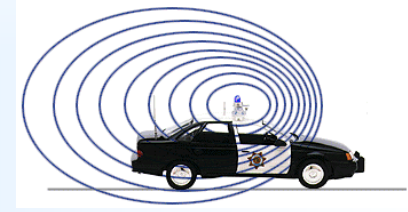
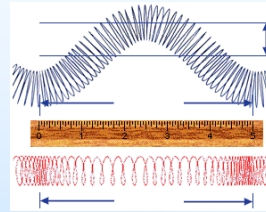


2. Ondas eletromagnéticas: oscilações de **E** e **B** que se propagam no vácuo a velocidade $c=299\,792\,458$ m/s ou em meios materiais.

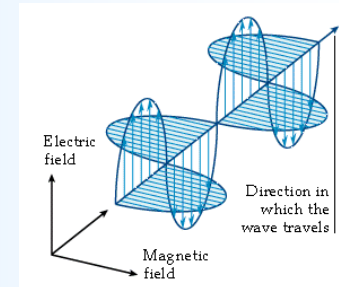
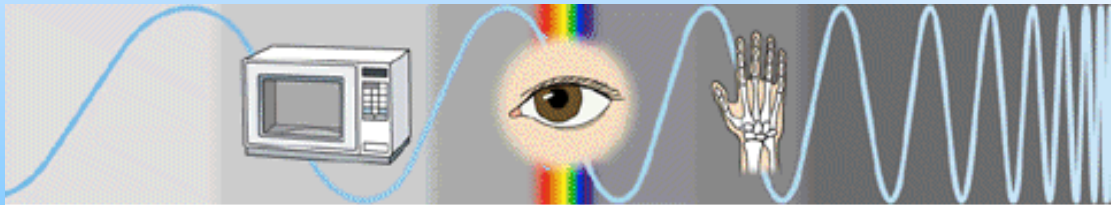


Tipos de Ondas

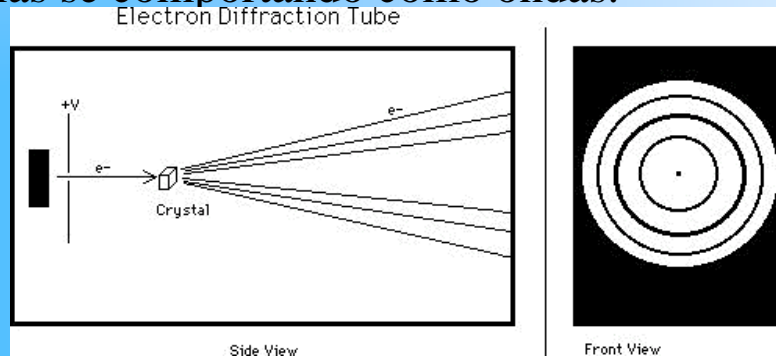
1. Ondas mecânicas: ondas que se propagam num meio material. Ex: ondas numa corda, som, ondas sísmicas;



2. Ondas eletromagnéticas: oscilações de **E** e **B** que se propagam no vácuo a velocidade $c=299\,792\,458$ m/s ou em meios materiais;



3. Ondas de matéria: partículas fundamentais (prótons, elétrons, etc) ou átomos e moléculas se comportando como ondas.



$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{mv}$$

Dualidade onda-partícula

Dualidade onda-partícula

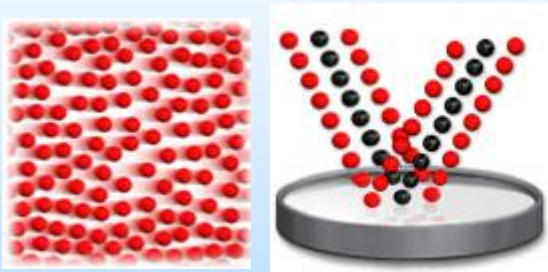
Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma “multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados”.



Isaac Newton (1642-1727)

Dualidade onda-partícula

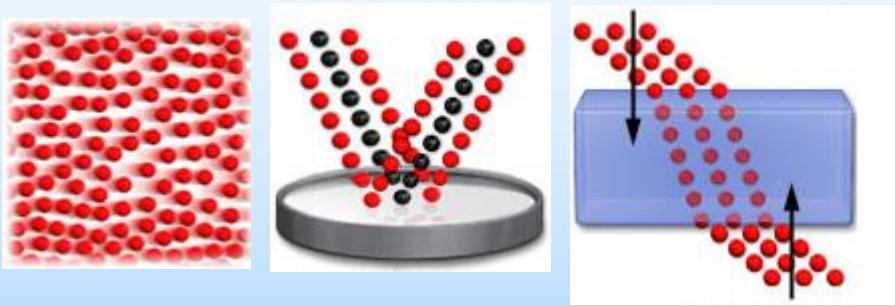
Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma “multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados”.



Isaac Newton (1642-1727)

Dualidade onda-partícula

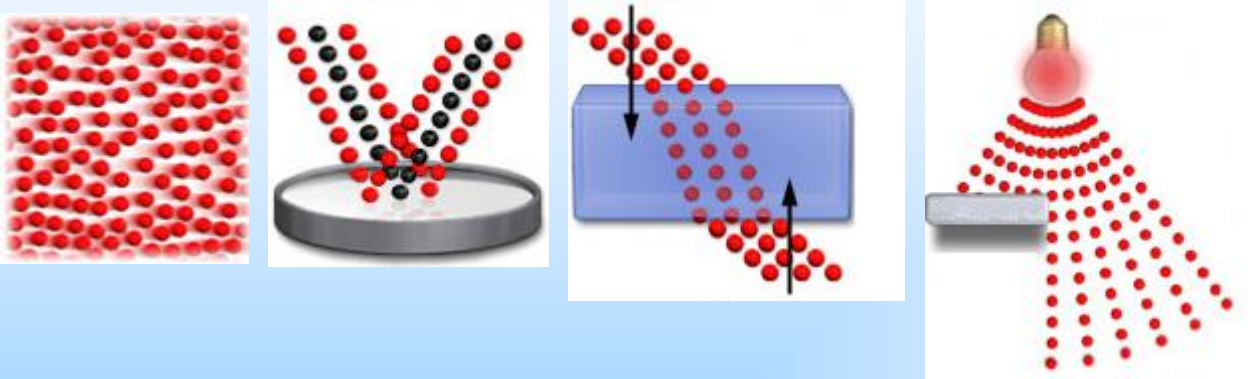
Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma “multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados”.



Isaac Newton (1642-1727)

Dualidade onda-partícula

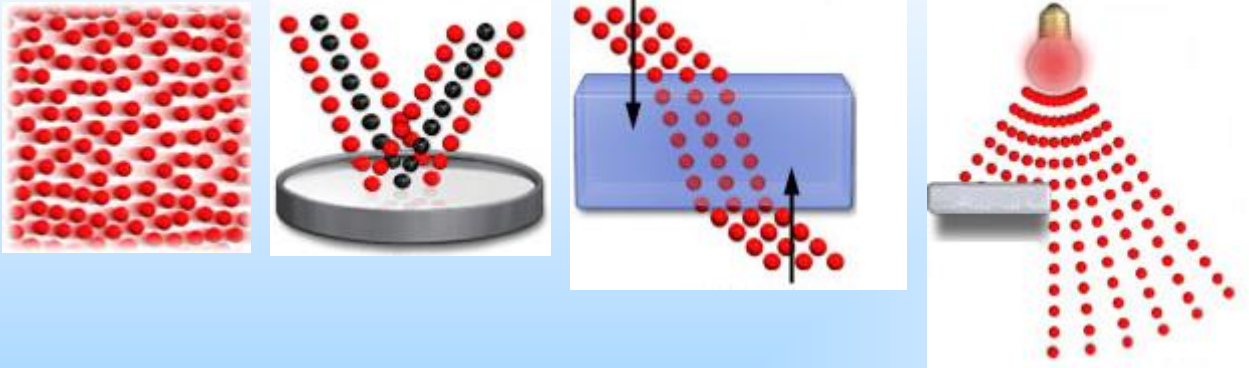
Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma “multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados”.



Isaac Newton (1642-1727)

Dualidade onda-partícula

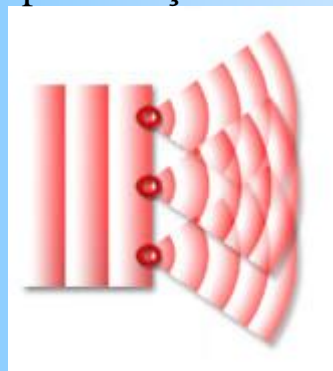
Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma “multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados”.



Isaac Newton (1642-1727)



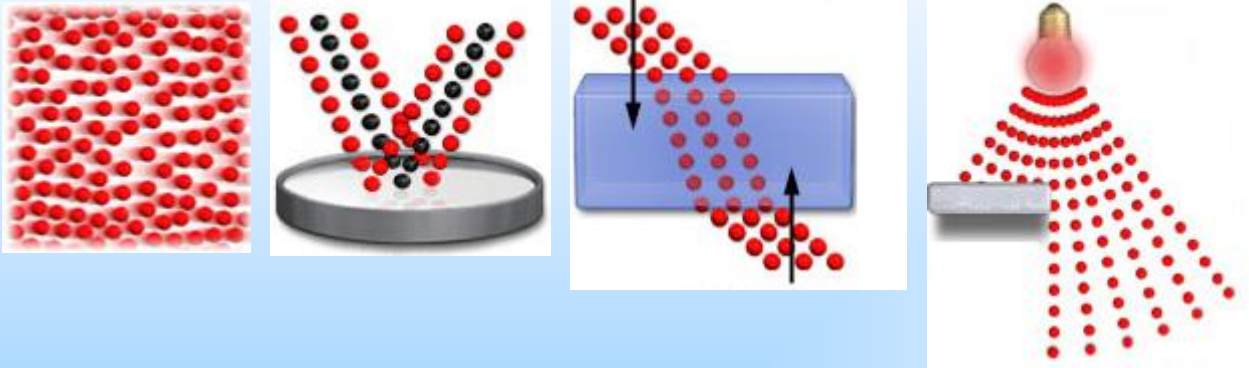
Teoria ondulatória: publicou *Traté de la lumière* de 1690, onde assumiu que o espaço era preenchido por um meio (éter) e que as perturbações do meio que constituíam a luz eram passadas para suas vizinhas que se tornam novas fontes de perturbação.



Christiaan Huygens (1629 - 1695)

Dualidade onda-partícula

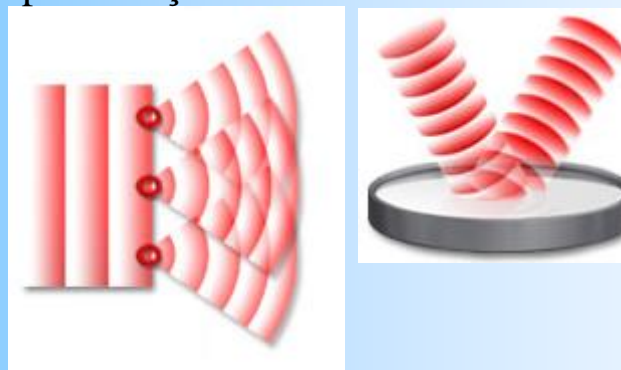
Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma “multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados”.



Isaac Newton (1642-1727)



Teoria ondulatória: publicou *Traté de la lumière* de 1690, onde assumiu que o espaço era preenchido por um meio (éter) e que as perturbações do meio que constituíam a luz eram passadas para suas vizinhas que se tornam novas fontes de perturbação.



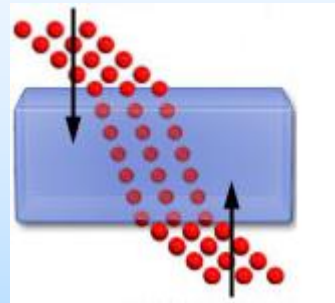
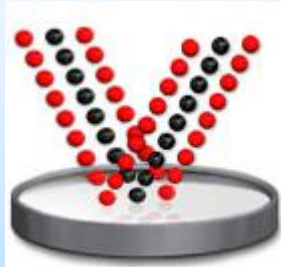
Christiaan Huygens (1629 - 1695)

Dualidade onda-partícula

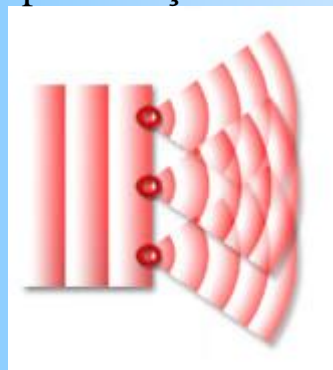


Isaac Newton (1642-1727)

Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma “multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados”.



Teoria ondulatória: publicou *Traté de la lumière* de 1690, onde assumiu que o espaço era preenchido por um meio (éter) e que as perturbações do meio que constituíam a luz eram passadas para suas vizinhas que se tornam novas fontes de perturbação.



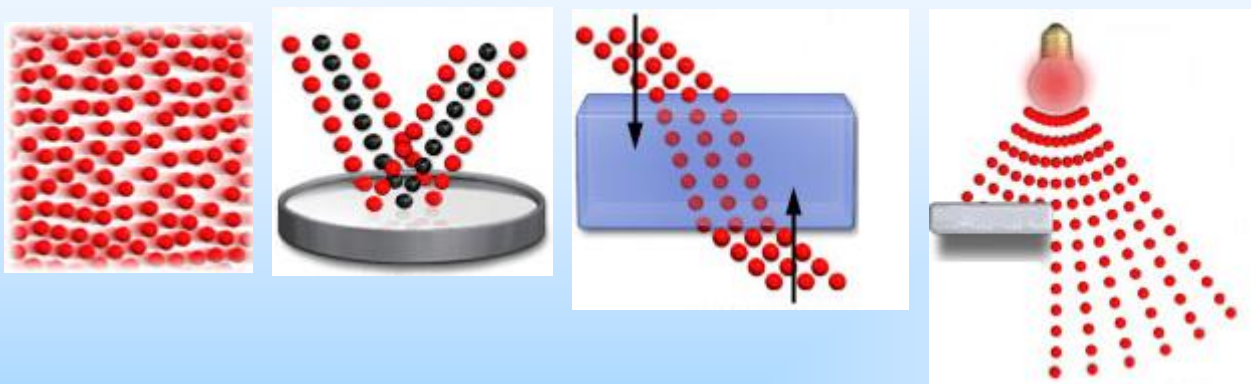
Christiaan Huygens (1629 - 1695)

Dualidade onda-partícula



Isaac Newton (1642-1727)

Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma “multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados”.



Christiaan Huygens (1629 - 1695)

Teoria ondulatória: publicou *Traté de la lumière* de 1690, onde assumiu que o espaço era preenchido por um meio (éter) e que as perturbações do meio que constituíam a luz eram passadas para suas vizinhas que se tornam novas fontes de perturbação.



Dualidade onda-partícula

1801 o experimento da dupla fenda de Young:



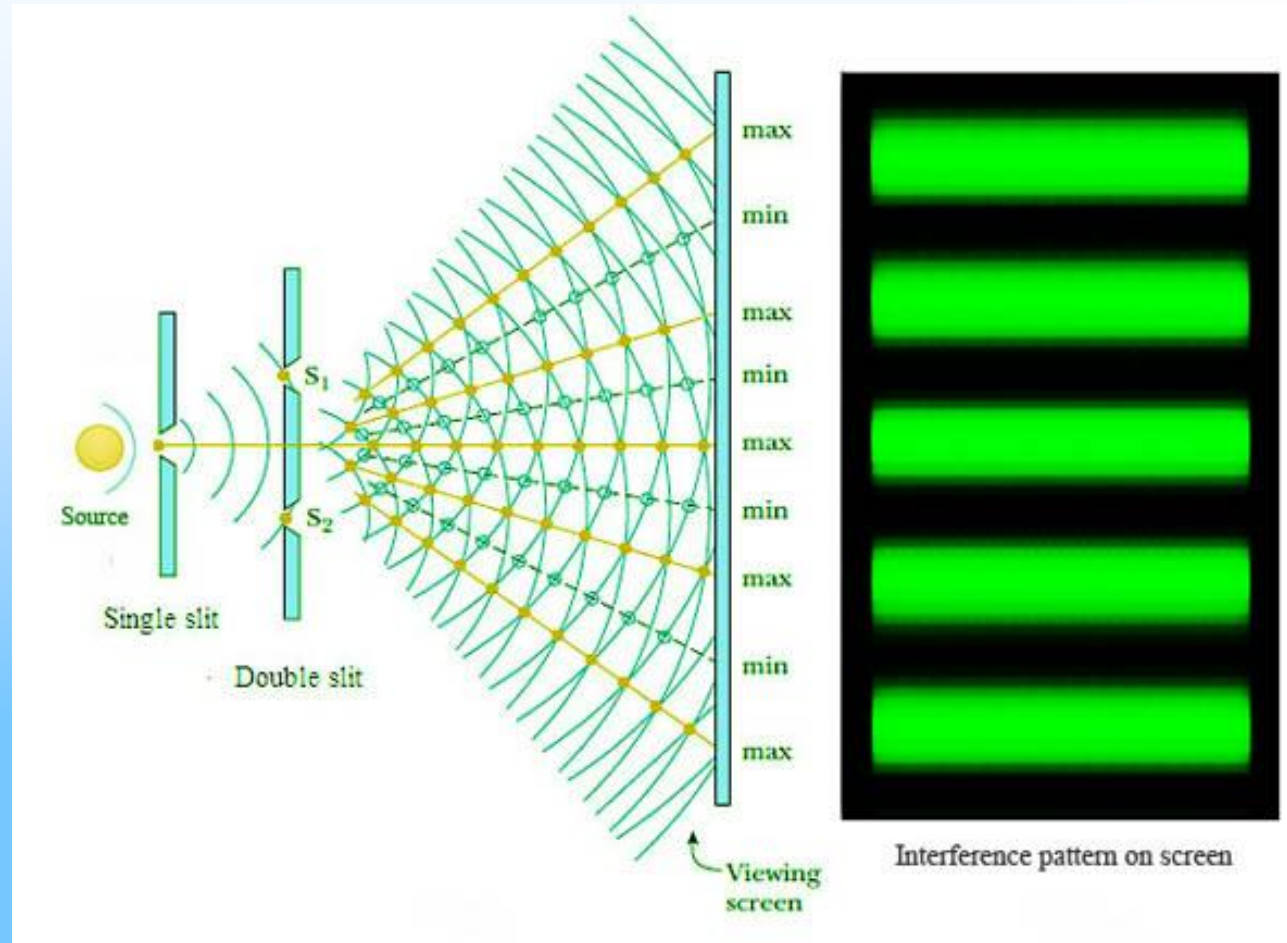
Thomas Young(1773 - 1829)

Dualidade onda-partícula

1801 o experimento da dupla fenda de Young:



Thomas Young(1773 - 1829)

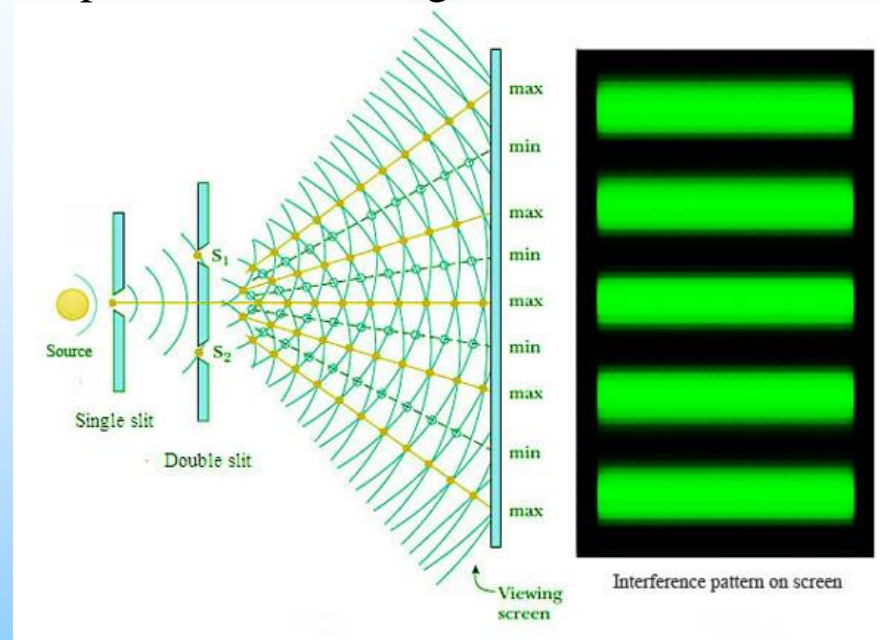


Dualidade onda-partícula

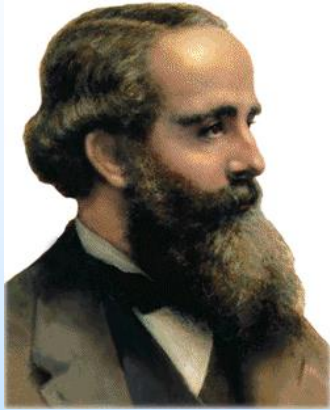
1801 o experimento da dupla fenda de Young:



Thomas Young(1773 - 1829)



Dualidade onda-partícula



James C. Maxwell
(1831 - 1879)

1864 Maxwell parte das 4 equações fundamentais do eletromagnetismo

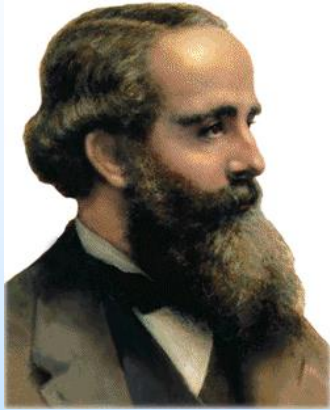
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Dualidade onda-partícula



James C. Maxwell
(1831 - 1879)

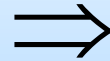
1864 Maxwell parte das 4 equações fundamentais do eletromagnetismo e verifica que delas pode-se deduzir 2 equações de onda.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

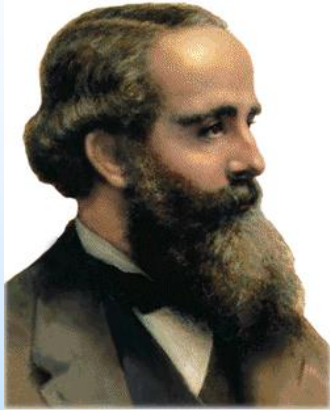
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$



$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

Dualidade onda-partícula



James C. Maxwell
(1831 - 1879)

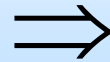
1864 Maxwell parte das 4 equações fundamentais do eletromagnetismo e verifica que delas pode-se deduzir 2 equações de onda.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

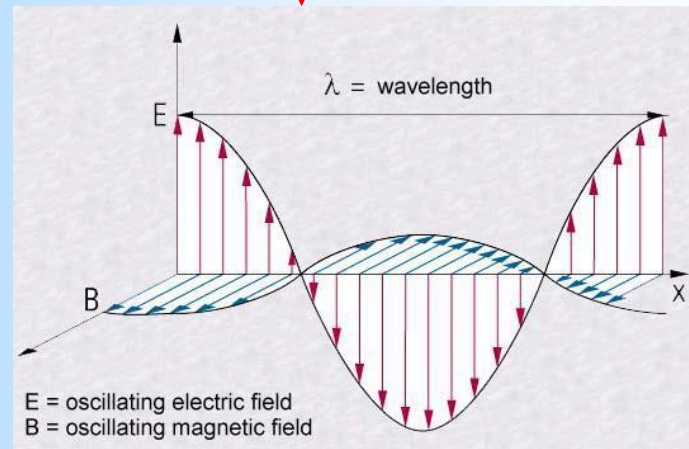
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$



$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

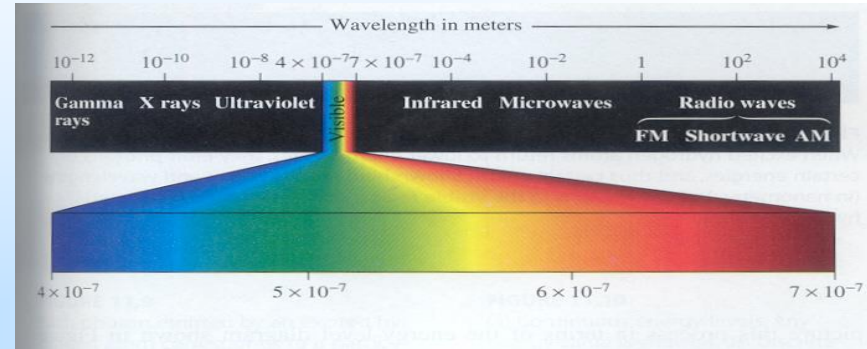
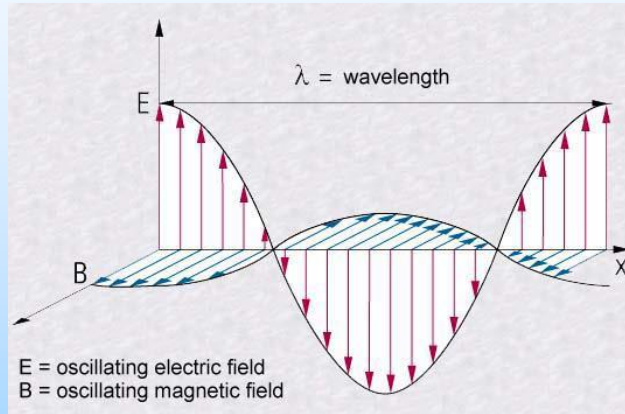


Efeito fotoelétrico



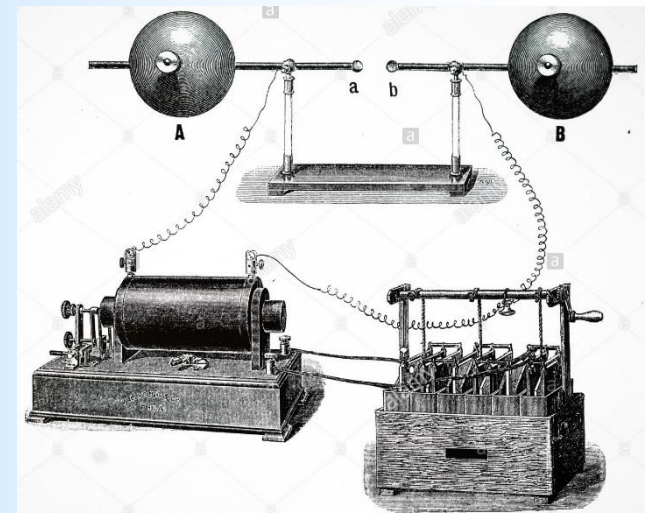
James Clerk Maxwell
(1831 - 1879)

1864 Maxwell deduziu as equações de ondas eletromagnéticas:



Heinrich R. Hertz
(1857 - 1894)

1887 Hertz demonstra a existência das ondas eletromagnéticas.

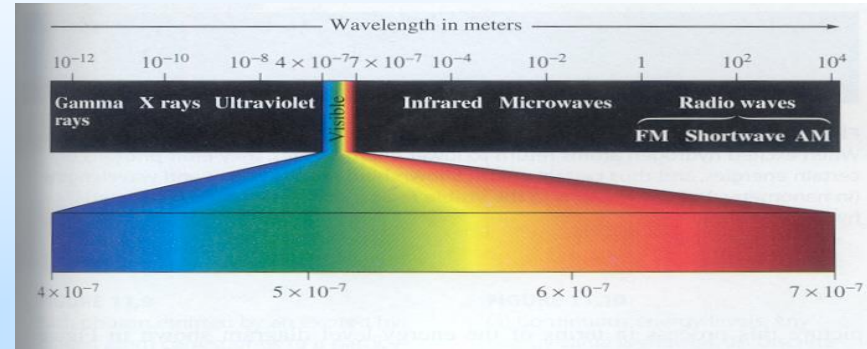
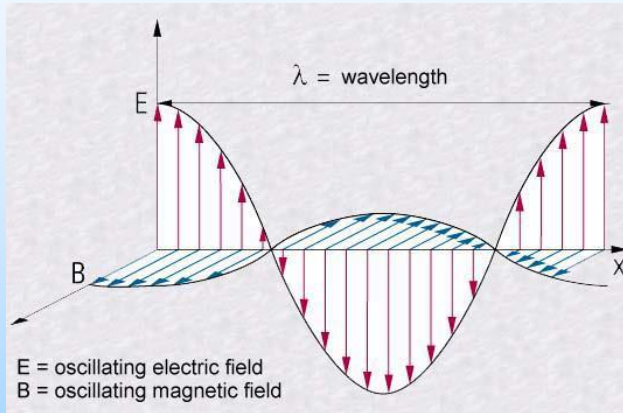


Efeito fotoelétrico



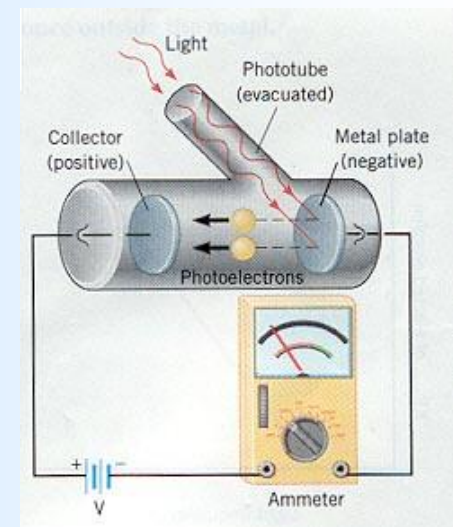
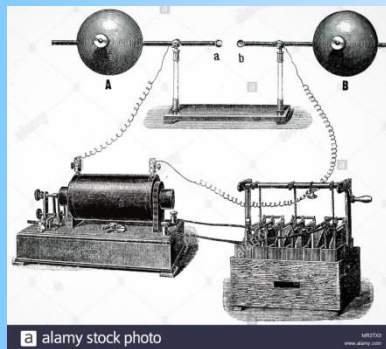
James Clerk Maxwell
(1831 - 1879)

1864 Maxwell deduziu as equações de ondas eletromagnéticas:



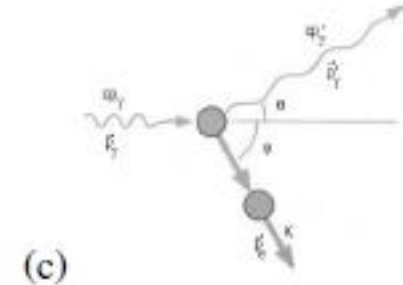
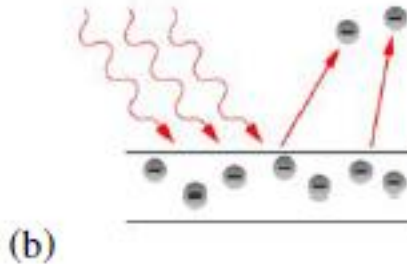
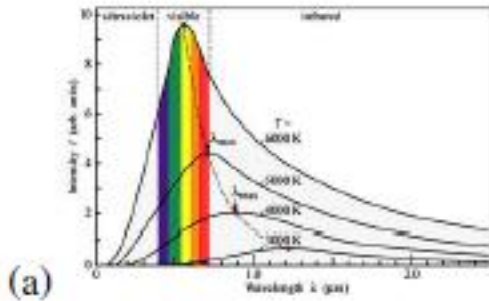
Heinrich R. Hertz
(1857 - 1894)

1887 Hertz demonstra a existência das ondas eletromagnéticas e descobre o **efeito fotoelétrico**.



Dualidade onda-partícula

Na virada do século XX começam a surgir evidências do comportamento corpuscular da luz:



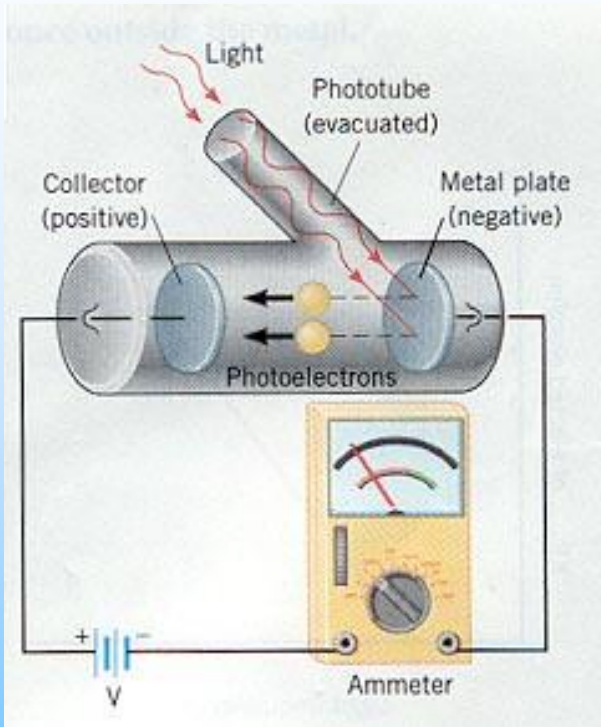
Radiação de corpo negro

Efeito fotoelétrico

Efeito Compton

Efeito fotoelétrico

Efeito fotoelétrico

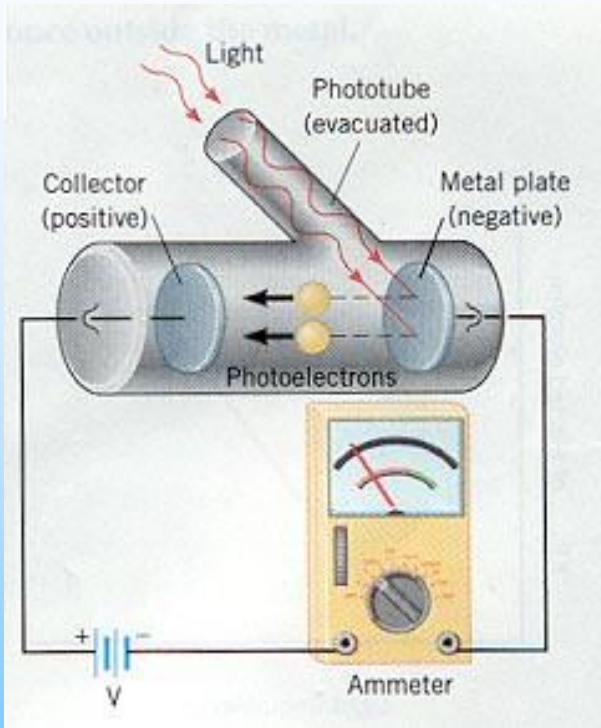


1897++ Lenard estuda sistematicamente o efeito fotoelétrico.



Philipp E. A.
von Lenard
(1862-1947)

Efeito fotoelétrico



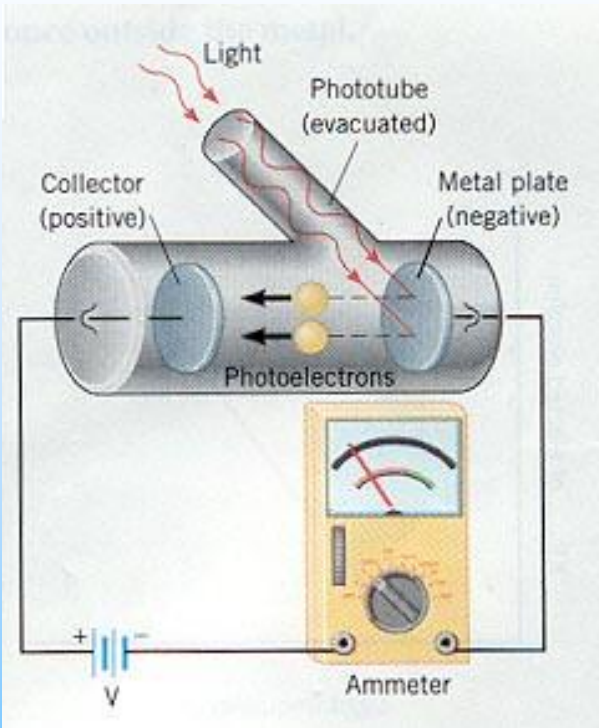
1897++ Lenard estuda sistematicamente o efeito fotoelétrico:

- A emissão ocorre a alto vácuo, portanto, os portadores de carga não são íons gasosos.



Philipp E. A.
von Lenard
(1862-1947)

Efeito fotoelétrico



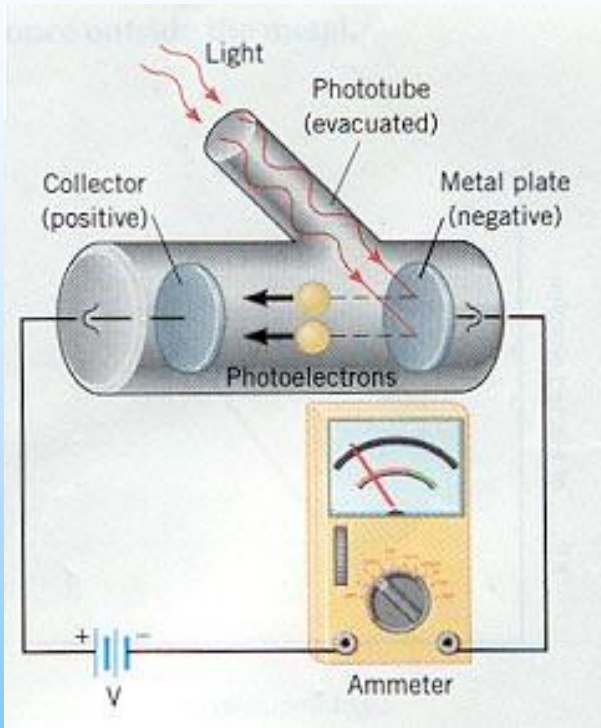
1897++ Lenard estuda sistematicamente o efeito fotoelétrico:

- A emissão ocorre a alto vácuo, portanto, os portadores de carga não são íons gasosos;
- A ação de um campo magnético confirma a carga negativa dos portadores.



Philipp E. A.
von Lenard
(1862-1947)

Efeito fotoelétrico

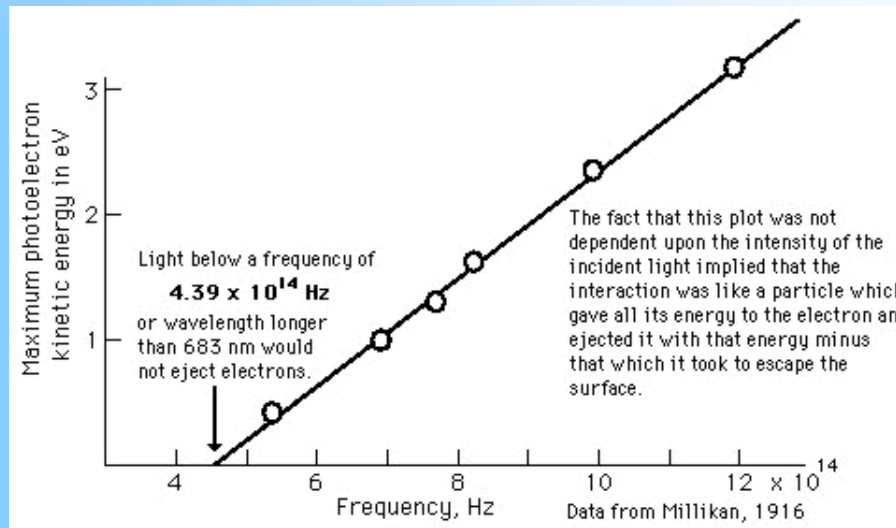


1897++ Lenard estuda sistematicamente o efeito fotoelétrico:

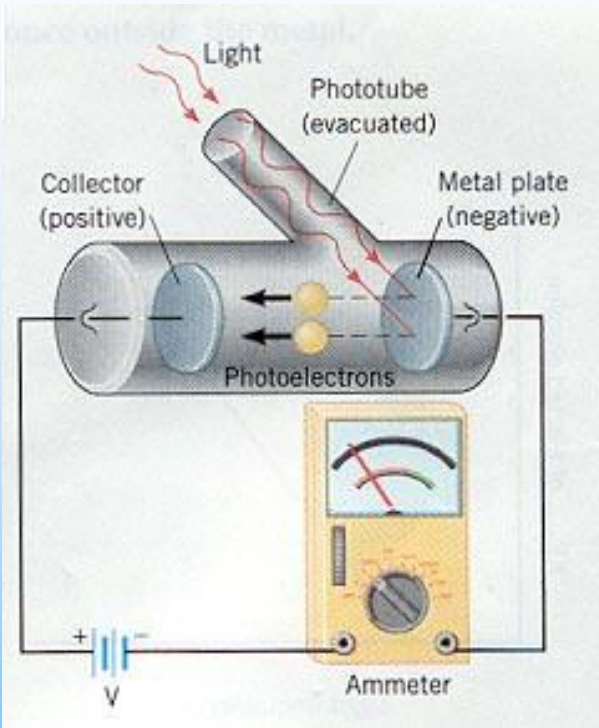
- A emissão ocorre a alto vácuo, portanto, os portadores de carga não são íons gasosos;
- A ação de um campo magnético confirma a carga negativa dos portadores;
- Existe um limiar de frequência para o efeito ocorrer, ou **frequência de corte**, em $\sim 10^{14}$ Hz.



Philipp E. A. von Lenard (1862-1947)



Efeito fotoelétrico



1897++ Lenard estuda sistematicamente o efeito fotoelétrico:

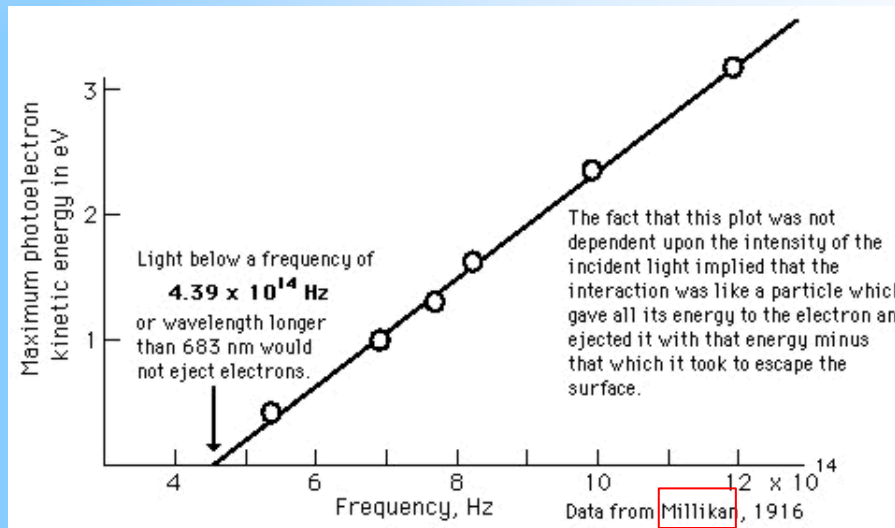
- A emissão ocorre a alto vácuo, portanto, os portadores de carga não são íons gasosos;
- A ação de um campo magnético confirma a carga negativa dos portadores;
- Existe um limiar de frequência para o efeito ocorrer, ou **frequência de corte**, em $\sim 10^{14}$ Hz.



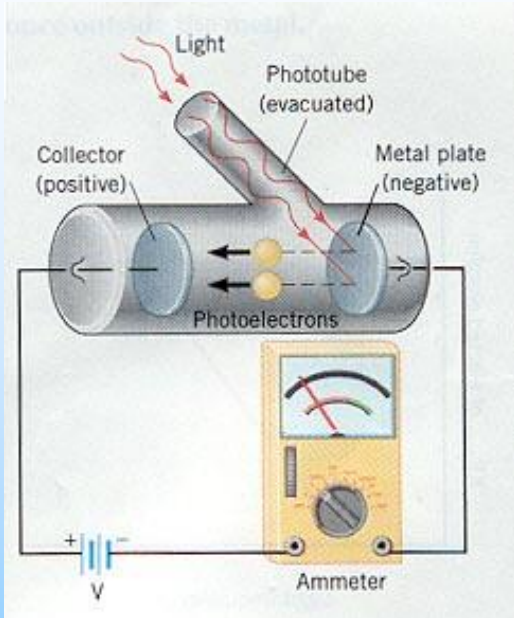
Philipp E. A. von Lenard (1862-1947)



1905



Efeito fotoelétrico



1897++ Lenard estuda sistematicamente o efeito fotoelétrico:

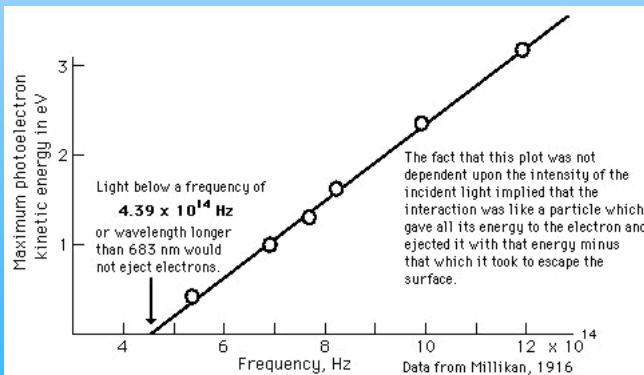
- A emissão ocorre a alto vácuo, portanto, os portadores de carga não são íons gasosos;
- A ação de um campo magnético confirma a carga negativa dos portadores;
- Existe um limiar de frequência para o efeito ocorrer, ou **frequência de corte**, em $\sim 10^{14}$ Hz.



Philipp E. A.
von Lenard
(1862-1947)

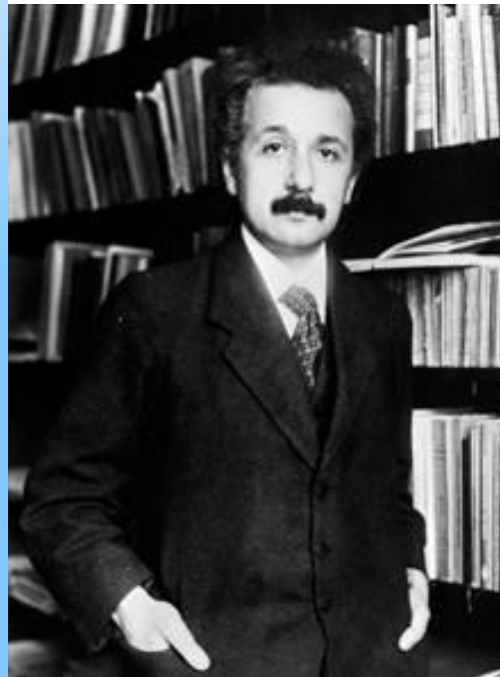


1905

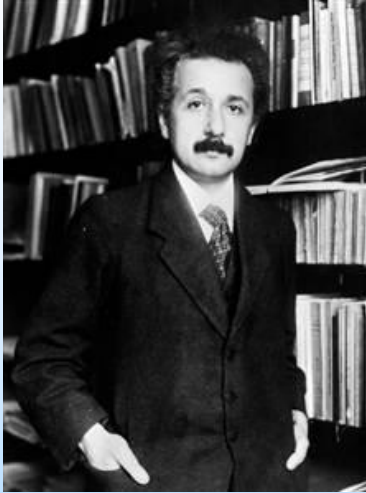


► Por que os metais geram cargas elétricas quando iluminados por radiação de frequência ultravioleta, mas não quando iluminados por frequências menores?

A ideia de Einstein



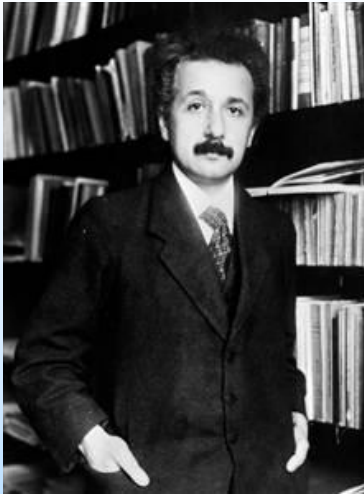
Efeito fotoelétrico



Albert Einstein
(1879-1955)

1905 Einstein considera que se a radiação eletromagnética é quantizada, a luz deve se comportar como partícula na interação com a matéria, e explica o efeito fotoelétrico.

Efeito fotoelétrico



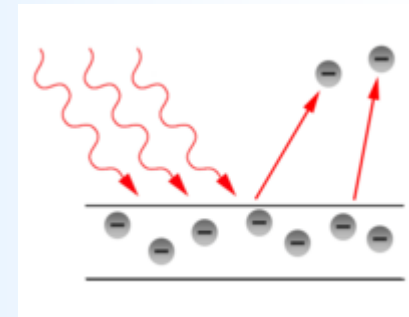
Albert Einstein
(1879-1955)

1905 Einstein considera que se a radiação eletromagnética é quantizada, a luz deve se comportar como partícula na interação com a matéria, e explica o efeito fotoelétrico:

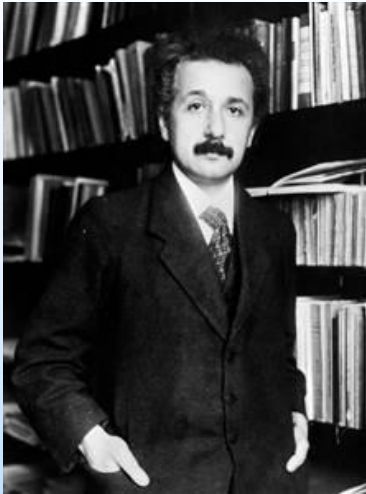
O fóton tem energia:

$$E = hf,$$

onde f é a frequência e h a constante de Planck.



Efeito fotoelétrico



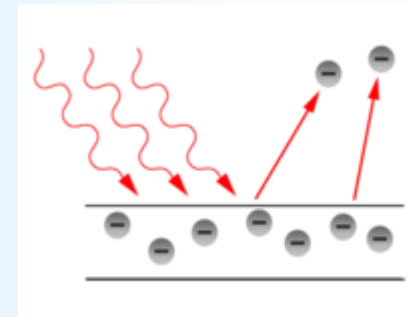
Albert Einstein
(1879-1955)

1905 Einstein considera que se a radiação eletromagnética é quantizada, a luz deve se comportar como partícula na interação com a matéria, e explica o efeito fotoelétrico:

O fóton tem energia:

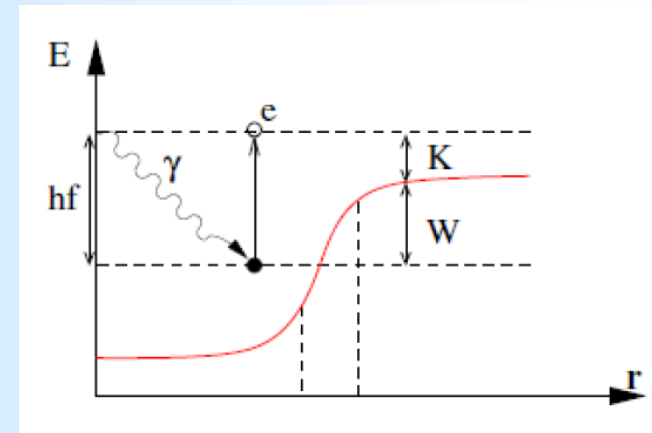
$$E = hf,$$

onde f é a frequência e h a constante de Planck.

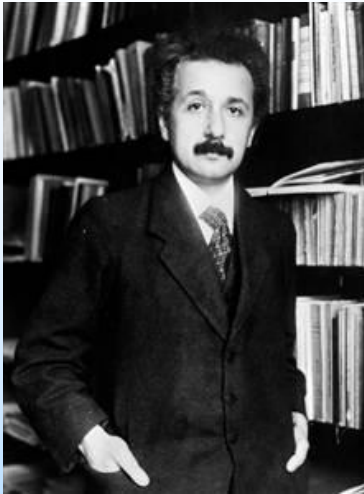


Na interação com a superfície do metal, parte da energia do fóton é gasta para arrancar os elétrons do metal (ϕ) e parte é convertida em energia cinética dos elétrons (K):

$$E = hf = K + W$$



Efeito fotoelétrico



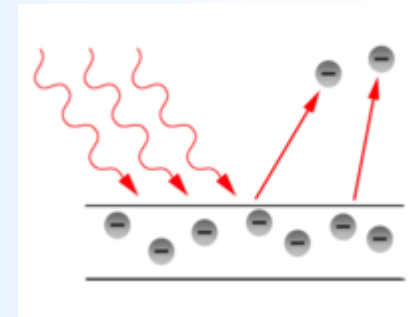
Albert Einstein
(1879-1955)

1905 Einstein considera que se a radiação eletromagnética é quantizada, a luz deve se comportar como partícula na interação com a matéria, e explica o efeito fotoelétrico:

O fóton tem energia:

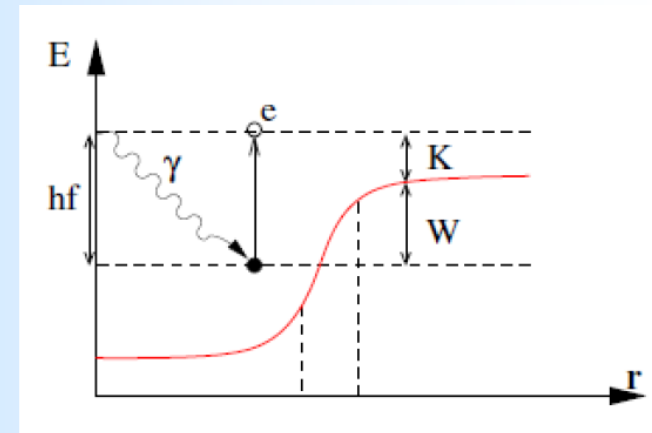
$$E = hf,$$

onde f é a frequência e h a constante de Planck.

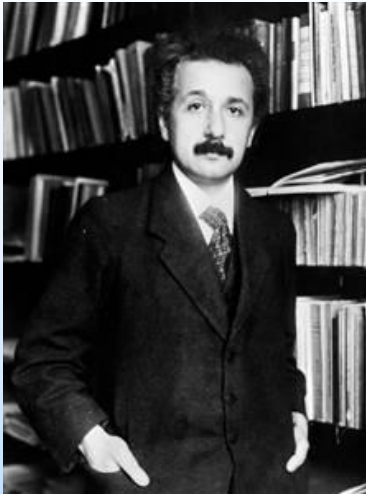


Na interação com a superfície do metal, parte da energia do fóton é gasta para arrancar os elétrons do metal (ϕ) e parte é convertida em energia cinética dos elétrons (K):

$$E = hf = K + W \Rightarrow K = hf - W.$$



Efeito fotoelétrico



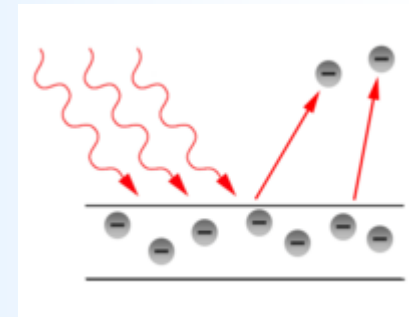
Albert Einstein
(1879-1955)

1905 Einstein considera que se a radiação eletromagnética é quantizada, a luz deve se comportar como partícula na interação com a matéria, e explica o efeito fotoelétrico:

O *fóton* tem energia:

$$E = hf,$$

onde f é a frequência e h a constante de Planck.



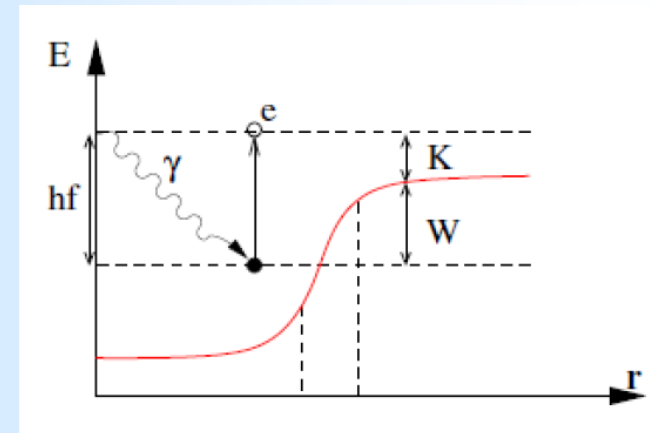
Na interação com a superfície do metal, parte da energia do fóton é gasta para arrancar os elétrons do metal (ϕ) e parte é convertida em energia cinética dos elétrons (K):

$$E = hf = K + W \Rightarrow K = hf - W.$$

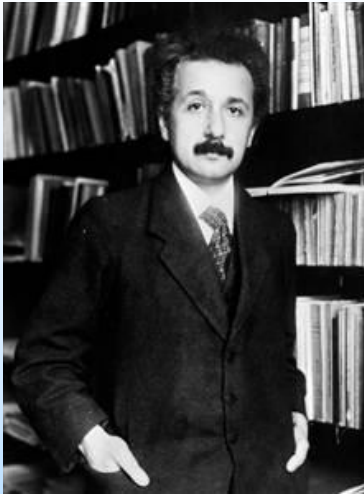
Então, os elétrons com a máxima energia cinética:

$$K_{max} = hf - W_0$$

gastam a menor quantidade de energia, W_0 , conhecida como **função trabalho**.



Efeito fotoelétrico



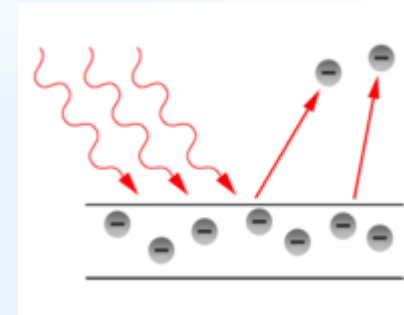
Albert Einstein
(1879-1955)

1905 Einstein considera que a luz deve se comportar como partícula no efeito fotoelétrico.

O fóton tem energia:

$$E = hf,$$

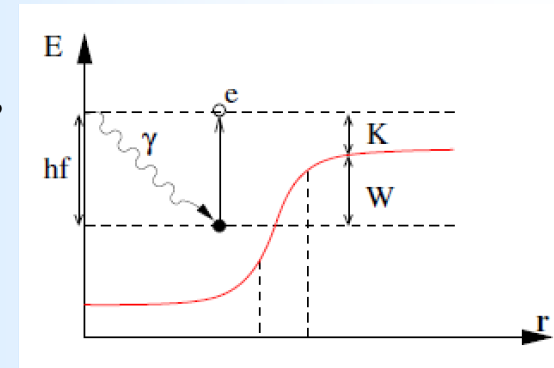
onde f é a frequência e h a constante de Planck.



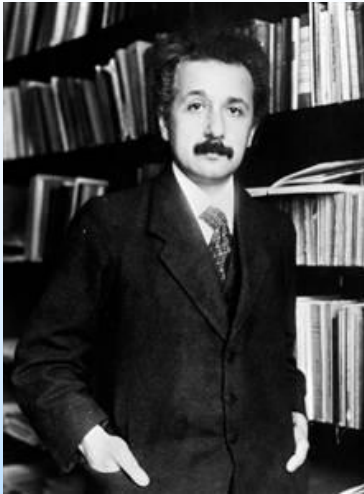
Na interação com a superfície do metal, parte da energia do fóton é gasta para arrancar os elétrons do metal (ϕ) e parte é convertida em energia cinética dos elétrons (K):

$$E = hf = K + W \Rightarrow K_{max} = hf - W_0,$$

onde W_0 é a **função trabalho**.



Efeito fotoelétrico



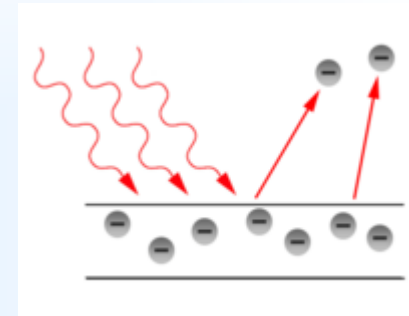
Albert Einstein
(1879-1955)

1905 Einstein considera que a luz deve se comportar como partícula no efeito fotoelétrico.

O fóton tem energia:

$$E = hf,$$

onde f é a frequência e h a constante de Planck.



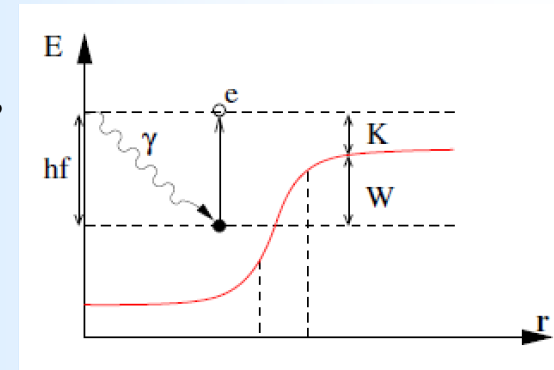
Na interação com a superfície do metal, parte da energia do fóton é gasta para arrancar os elétrons do metal (ϕ) e parte é convertida em energia cinética dos elétrons (K):

$$E = hf = K + W \Rightarrow K_{max} = hf - W_0,$$

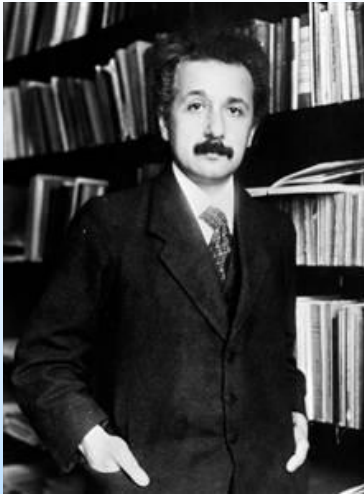
onde W_0 é a **função trabalho**.

Para elétrons com máxima energia cinética nula:

$$K_{max} = hf_0 - W_0 = 0$$



Efeito fotoelétrico



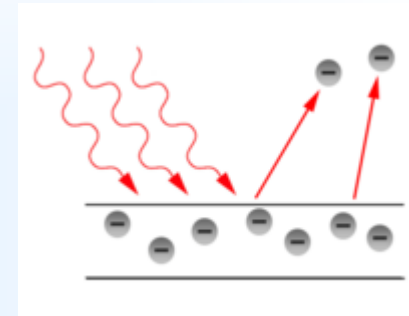
Albert Einstein
(1879-1955)

1905 Einstein considera que a luz deve se comportar como partícula no efeito fotoelétrico.

O fóton tem energia:

$$E = hf,$$

onde f é a frequência e h a constante de Planck.



Na interação com a superfície do metal, parte da energia do fóton é gasta para arrancar os elétrons do metal (ϕ) e parte é convertida em energia cinética dos elétrons (K):

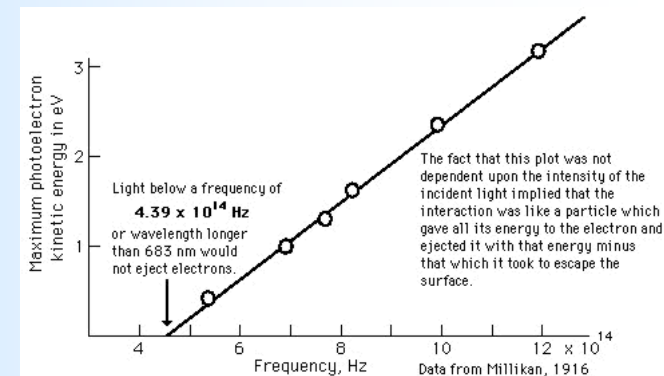
$$E = hf = K + W \Rightarrow K_{max} = hf - W_0,$$

onde W_0 é a **função trabalho**.

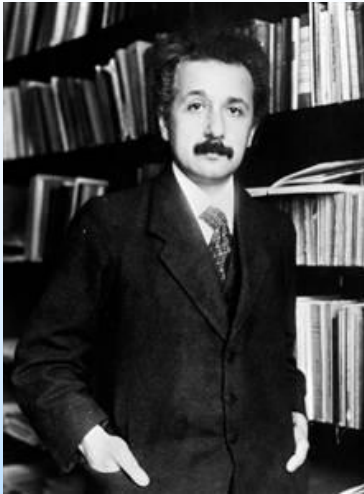
Para elétrons com máxima energia cinética nula:

$$K_{max} = hf_0 - W_0 = 0 \Rightarrow f_0 = \frac{W_0}{h},$$

onde f_0 é a **frequência de corte**.



Efeito fotoelétrico



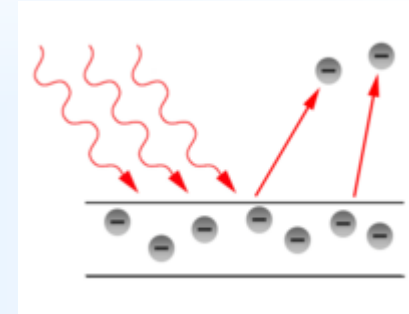
Albert Einstein
(1879-1955)

1905 Einstein considera que a luz deve se comportar como partícula no efeito fotoelétrico.

O fóton tem energia:

$$E = hf,$$

onde f é a frequência e h a constante de Planck.



Na interação com a superfície do metal, parte da energia do fóton é gasta para arrancar os elétrons do metal (ϕ) e parte é convertida em energia cinética dos elétrons (K):

$$E = hf = K + W \Rightarrow K_{max} = hf - W_0,$$



1921 onde W_0 é a **função trabalho**.

Para elétrons com máxima energia cinética nula:

$$K_{max} = hf_0 - W_0 = 0 \Rightarrow f_0 = \frac{W_0}{h},$$

onde f_0 é a **frequência de corte**.

