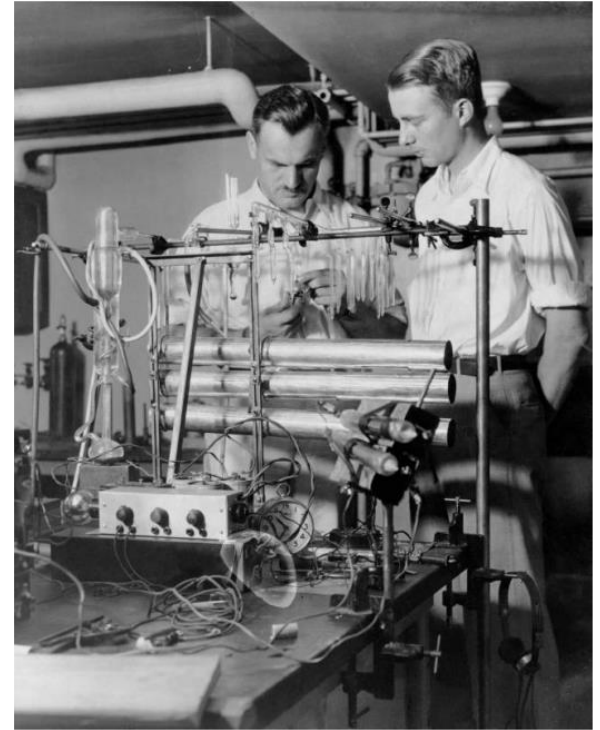


Evidência experimental para teoria quântica da luz

Radiação do corpo negro



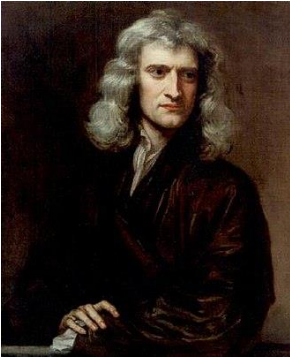
Dispersão de Compton



O efeito fotoelétrico



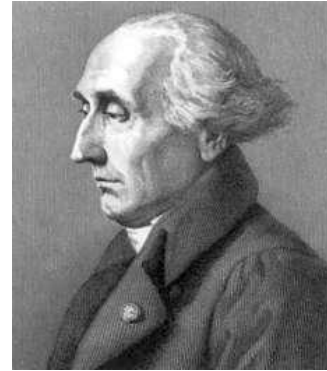
Física Clássica Partículas



Issac Newton



William Hamilton



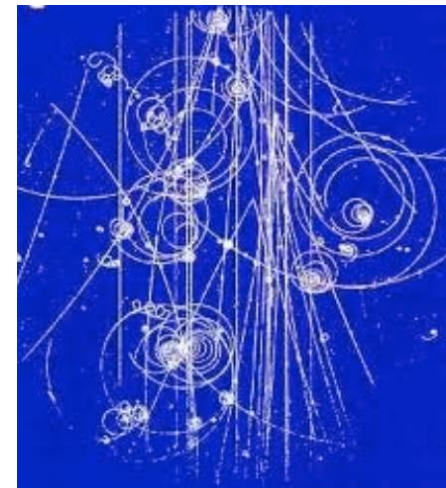
Joesph-Louis Lagrange

Mecânica

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$$

Dado a posição e momento linear duma partícula, ao conhecer as forças que atuam nela é possível prever a sua trajetória futura

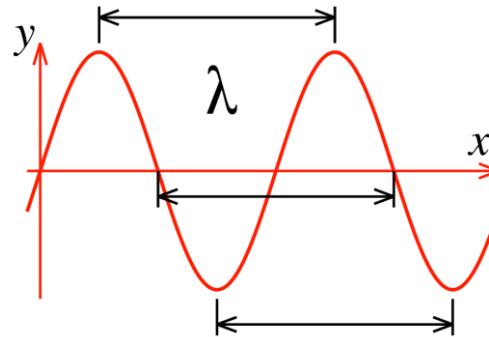
Suficiente bom para enviar um homem á lua



Ondas – perturbação não localizada



- amplitude,
- comprimento de onda, λ
- frequência, f
- direção de propagação



Tempo para propagar um comprimento de onda

período $T = \frac{1}{f}$

velocidade $v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$



Energia $\sim (\text{Amplitude})^2$

Ondas Eletromagnéticas



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

1864 : deduz 4 equações que descrevem EM

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

$$\nabla \cdot B = 0$$

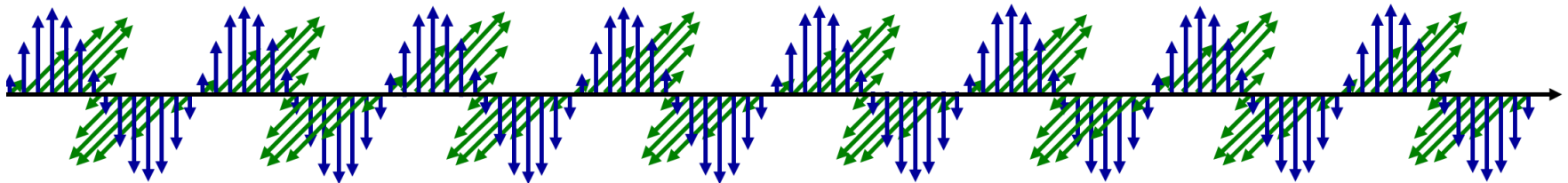
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

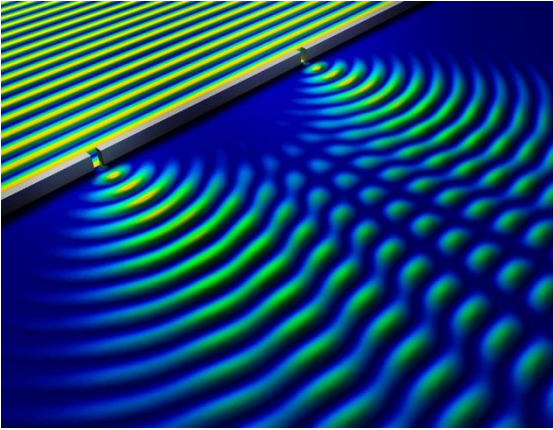
Uma teoria só que
descreve os fenómenos de
eletricidade, magnetismo e
ótica

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

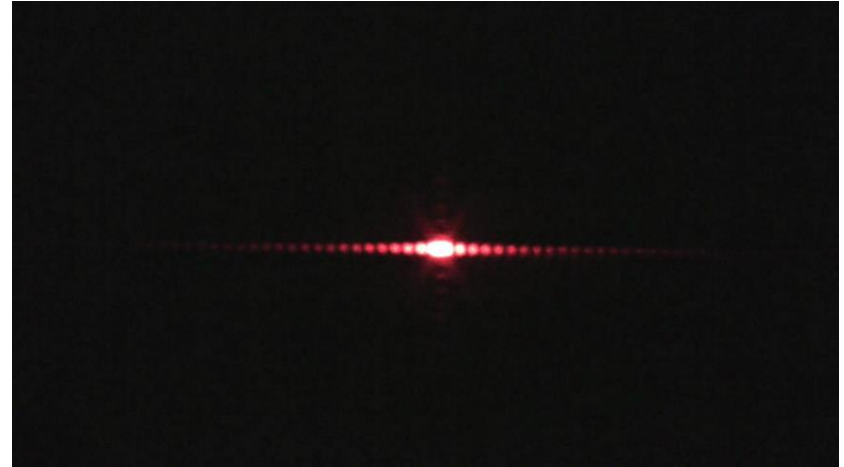
Luz é uma onda Eletromagnético !



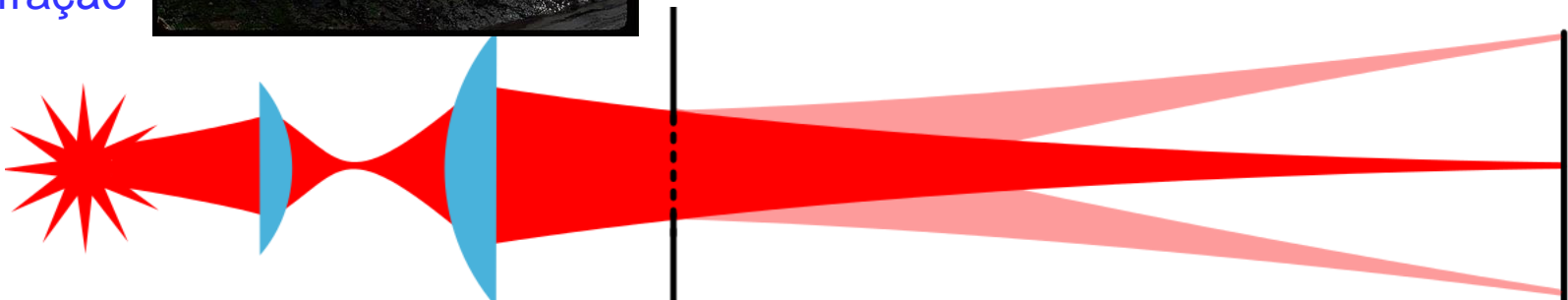
Efeitos ondulatórios com luz



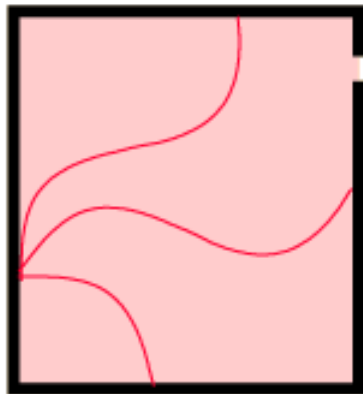
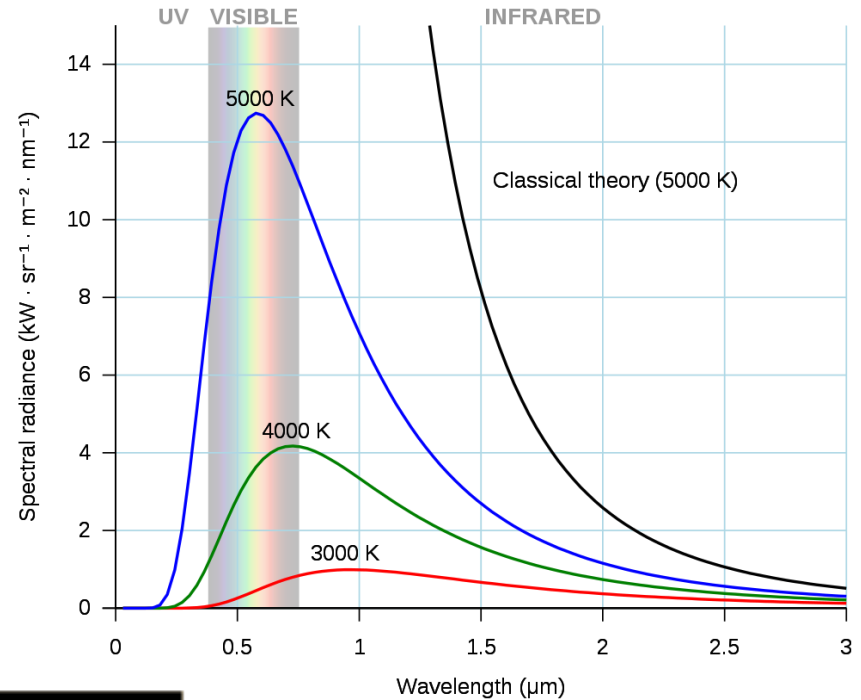
Dupla fenda interferência



Difração



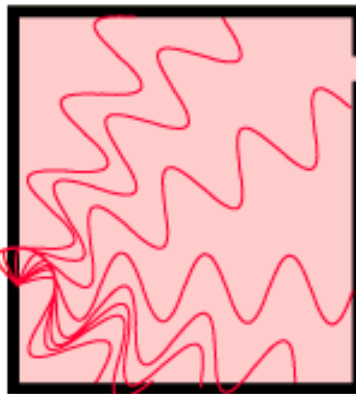
As primeiras fissuras na fundação clássica



Number of modes
per unit frequency
per unit volume

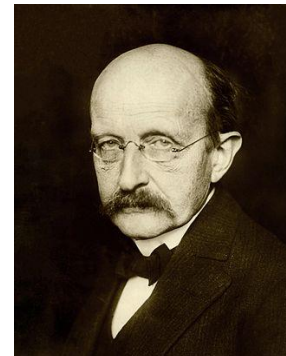
$$\frac{8\pi f^2}{c^3}$$

For higher frequencies
you can fit more modes
into the cavity. For
double the frequency,
four times as many
modes.



Cada modo ocupado
tem uma energia média

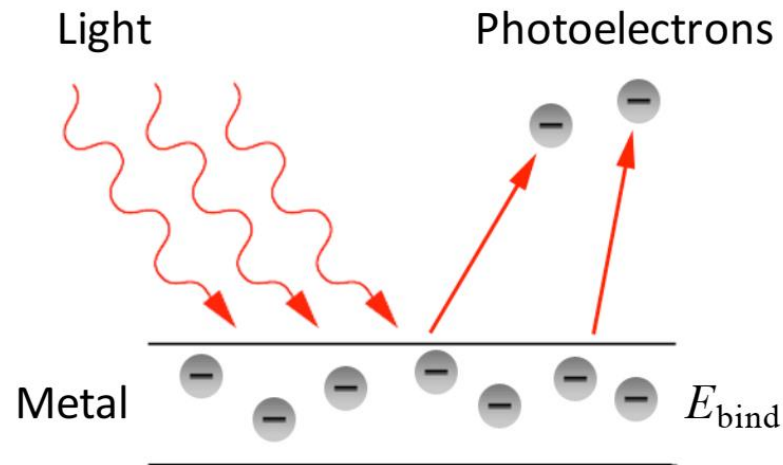
$$k_B T$$



Corpo negro só
absorve (emite)
radiação em
pacotes de
energia $\Delta E = hf$

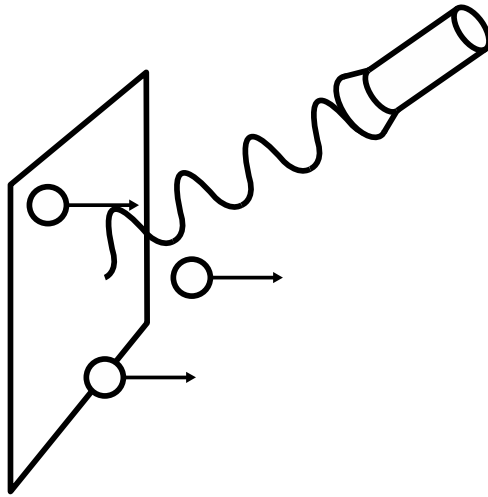
Efeito fotoelétrico

Quando luz com uma frequência suficientemente elevada incide num metal
elétrons são libertados



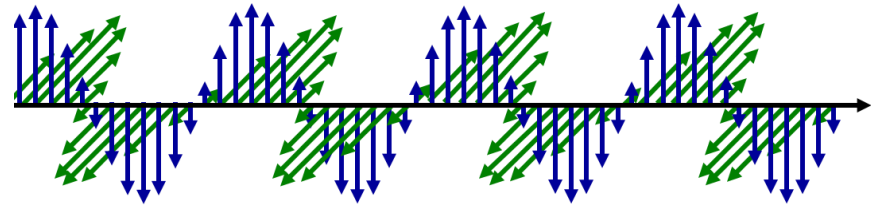
Efeito observado pelo
Heinrich Hertz (entre outros)
1887

Intuição Clássica

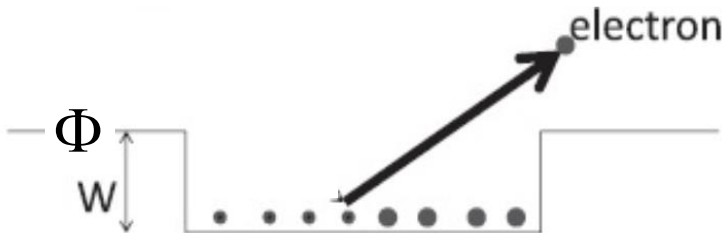


Densidade da energia duma onda é proporcional ao seu amplitude ao quadrado

$$U = \frac{\epsilon_0}{2} |E|^2 + \frac{1}{2\mu_0} |B|^2$$



Num metal: eletrões na banda de condução são livres de deslocar em resposta a um campo



Luz mais intensa, campo E maior
eletrões mais acelerados

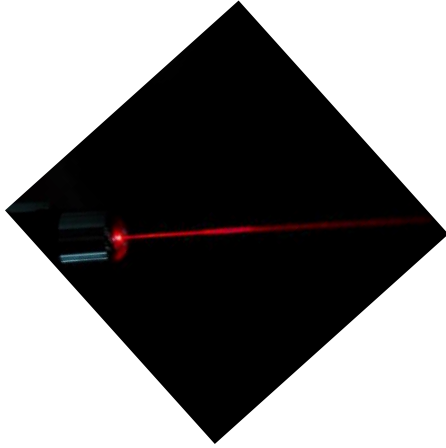
Espera quando a Intensidade \uparrow

- o N^o de e- detetados \uparrow
- a energia cinética máxima dos e- \uparrow
- taxa independente de λ

Primeiro eletrões emitidos depois um intervalo $\Delta t \sim E_{\text{ligação}} / (I \times \text{área}_{\text{efectiva}})$

Alguns numeros

Apontador laser de 1mW incidente em sódio (Na)



$$E_{\text{ligação}} \approx 2.3 \text{ eV}$$

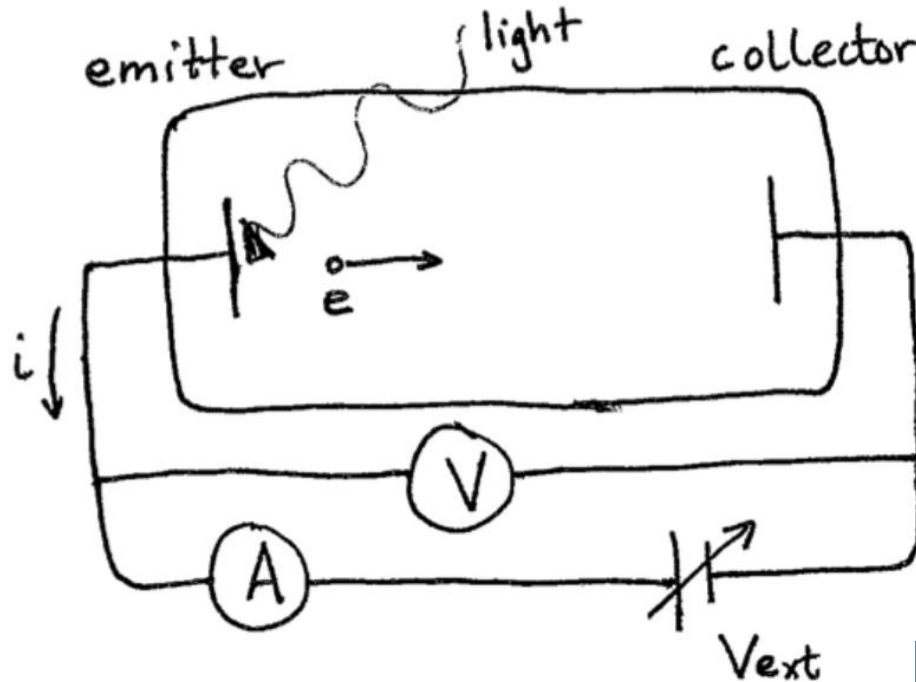
$$I_{\text{Laser}} \approx \frac{1 \times 10^{-3} \text{ W}}{\pi (10^{-3} \text{ m})^2} \approx 320 \text{ W} / \text{m}^2$$

$$r_{\text{Na}} \approx 0.5 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$a_{\text{efec}} \approx \pi (r_{\text{Na}})^2 \approx 7.9 \times 10^{-21} \text{ m}^2$$

$$\Delta t \approx \frac{2.3 \text{ eV} (1.6 \times 10^{-19} \text{ J} / \text{eV})}{(320 \text{ W} / \text{m}^2) (7.9 \times 10^{-21} \text{ m}^2)} \approx 0.15 \text{ s}$$

Medir a energia cinética máxima

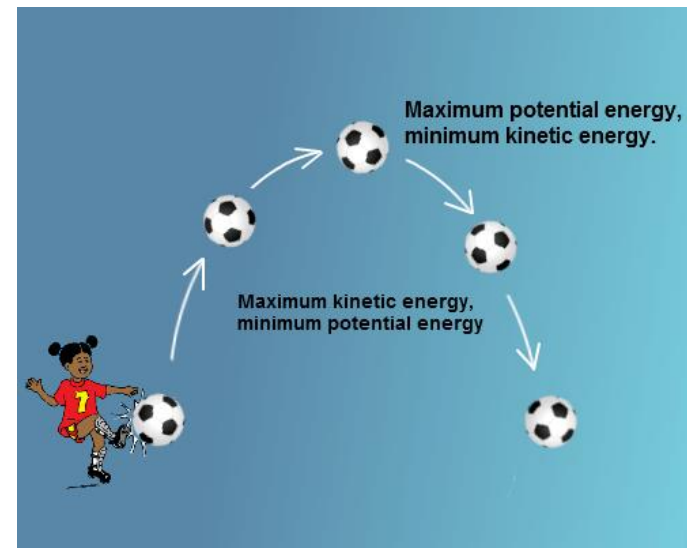


Ao passar do emissor (cátodo) para o coletor (ânodo) os elétrons perdem uma energia

$$\Delta E = e\Delta V_{ext}$$

Aumentar ΔV_{ext} até que a corrente $\rightarrow 0$

$$KE_{m\acute{a}x} = e\Delta V_{corte}$$

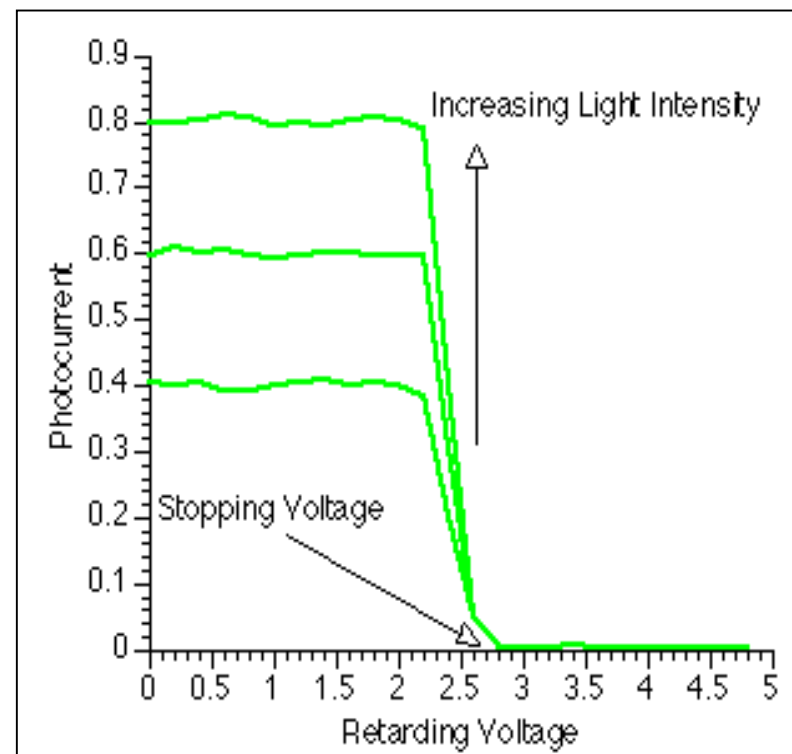
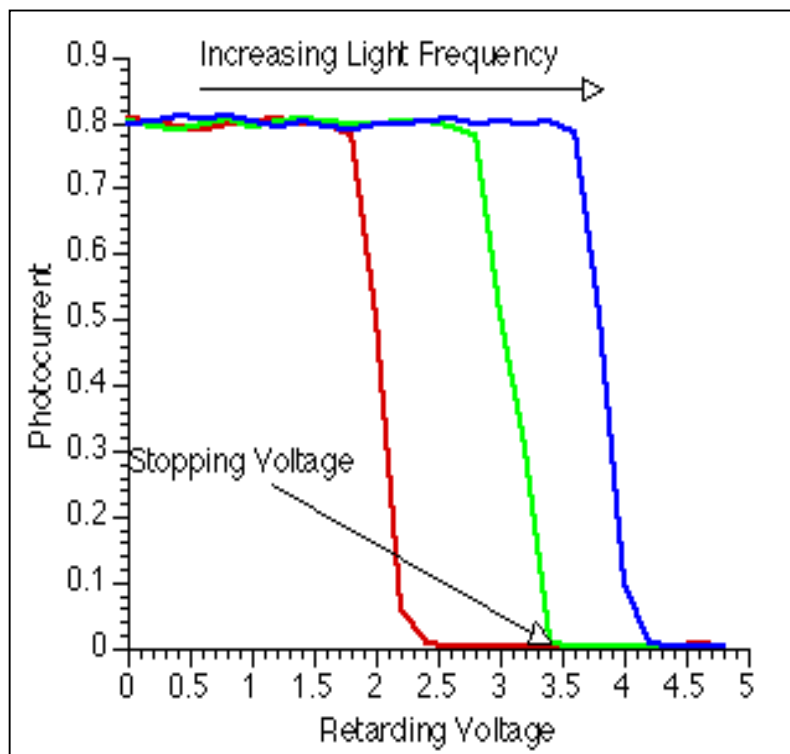


Simulação PHET

The screenshot displays the PHET Interactive Simulations interface for the "Photoelectric Effect (1.10)" simulation. The top navigation bar includes links for SIMULATIONS, TEACHING, RESEARCH, ACCESSIBILITY, and a DONATE button. The simulation title "Photoelectric Effect (1.10)" is shown in the top left, along with the University of Colorado Boulder logo. The main simulation area features a vacuum tube with two metal plates. A light source on the left emits a purple beam of light onto the left plate. A control panel on the right allows adjusting the light's intensity (set to 69%) and wavelength (set to 400 nm). A color spectrum bar below the wavelength control shows the range from UV to IR. The vacuum tube is connected to a circuit with a battery (0.60 V) and a current meter displaying "Current: 0,097". Blue dots representing electrons are shown moving from the left plate to the right plate. The right sidebar contains a "Target" dropdown menu set to "Sodium", a checkbox for "Show only highest energy electrons", and a "Graphs" section with three checkboxes: "Current vs battery voltage", "Current vs light intensity", and "Electron energy vs light frequency". The bottom of the interface has a play/pause button.

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/photoelectric>

Observações Experimentais



Emissão é quase instantânea (escala temporal $\sim 10^{-9}$ s)

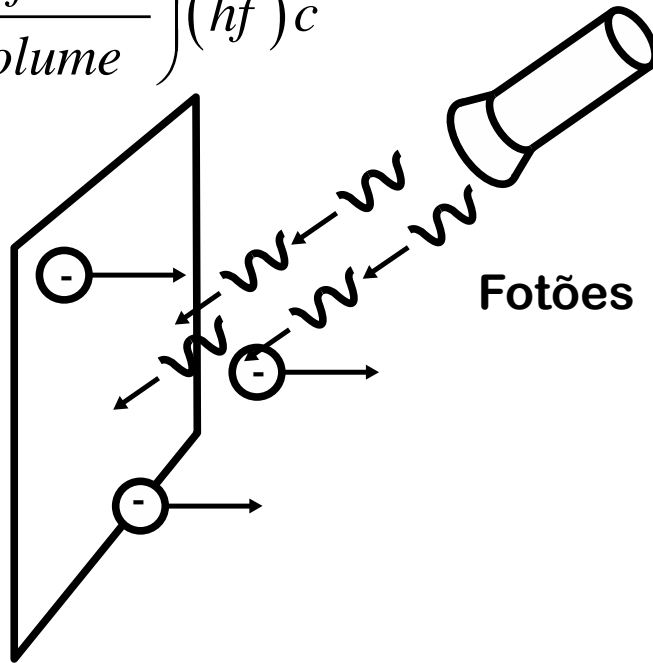
- A voltagem de corte varia com f e não a intensidade da luz
- Quanto maior f , maior a energia cinética máxima dos elétrons
- Existe um f mínima necessária para libertar elétrons
(se $f < f_{\text{Min}}$ elétrons não são detetadas mesmo para intensidades elevadas)
- A foto-corrente aumenta com maiores intensidades

Einstein 1905

Tomou a ideia de quantização da energia a sério

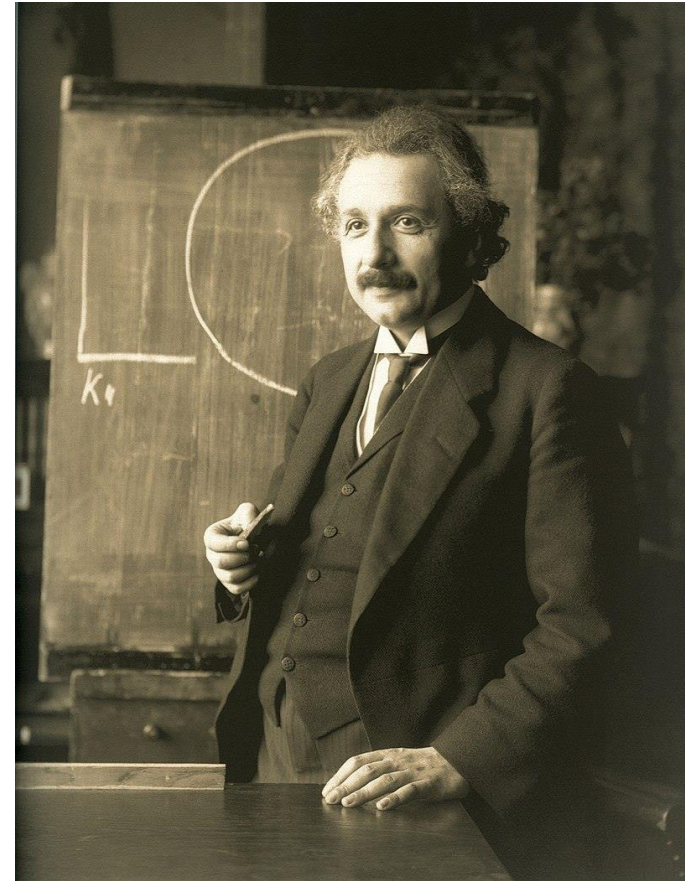
$$E_{\text{fotão}} = hf$$

$$\text{Intensidade} = \left(\frac{N^{\circ} \text{ fotões}}{\text{Volume}} \right) (hf) c$$



Nobel Prize 1921

("for the theory of the photoelectric effect and other significant contributions")



1905 “o ano milagroso”

↓ Theory of the Photoelectric Effect (p.132)

5. *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen;* von A. Einstein.

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß nach der molekularkinetischen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Körper von mikroskopisch sichtbarer Größe infolge der Molekularbewegung der Wärme Bewegungen von solcher Größe ausführen müssen, daß diese Bewegungen leicht mit dem Mikroskop nachgewiesen werden können. Es ist möglich, daß die hier zu behandelnden Bewegungen mit der sogenannten „Brownischen Molekularbewegung“ identisch sind; die mir erreichbaren Angaben über letztere sind jedoch so ungenau, daß ich mir hierüber kein Urteil bilden konnte.

6. *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;* von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwell'schen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der

↓ Explanation of the Brownian Motion (p. 549)

Special Theory of Relativity (p.891)

3. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper;* von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

Published in the same volume of
“Annalen der Physik”, volume 17 (1905)

Previsões do Modelo

$$E_{\text{fotão}} = hf = KE_{\text{max}} + \Phi$$

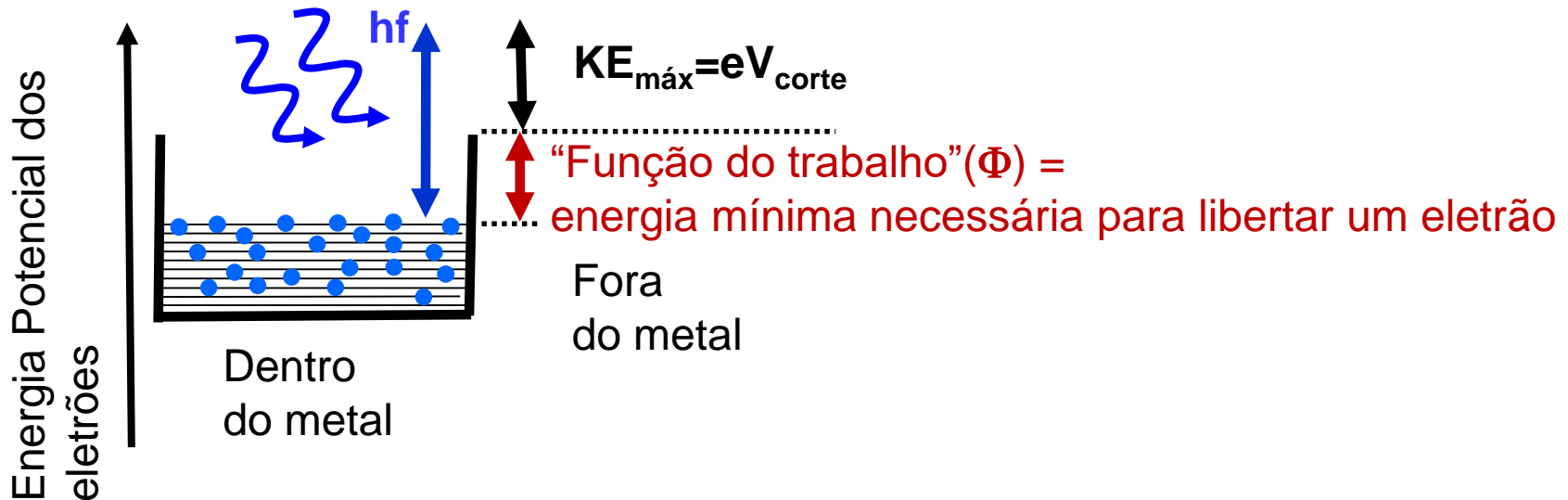
Energia incidente

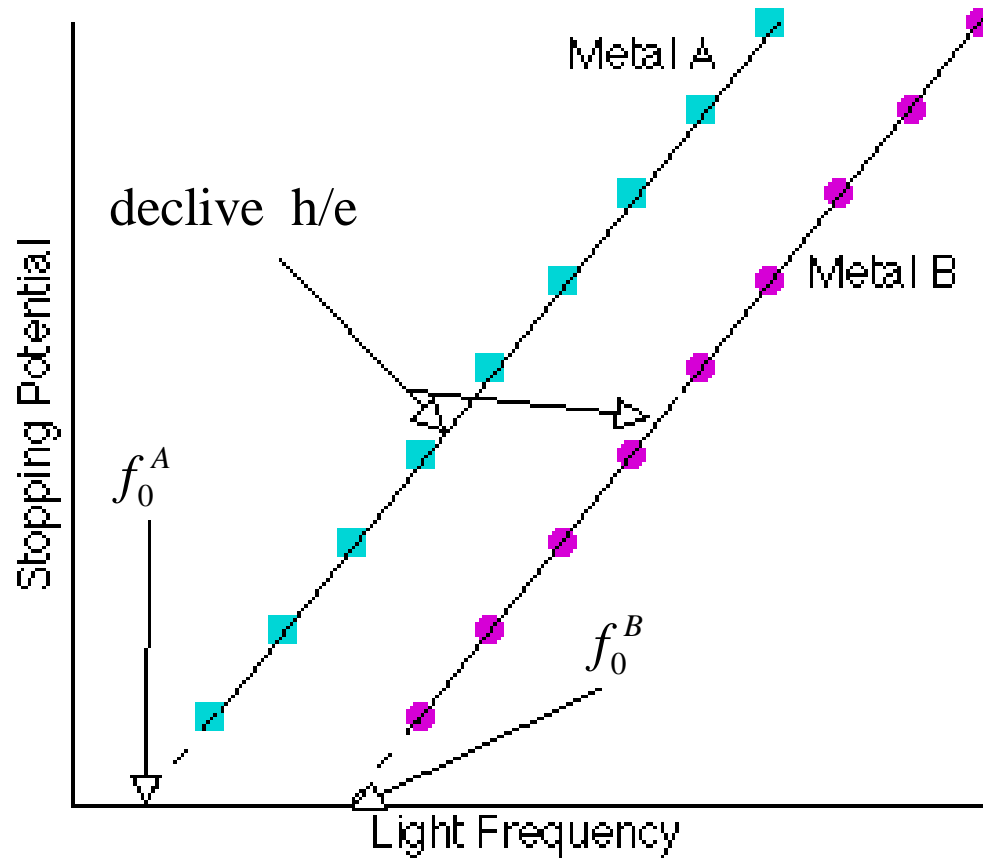
Energia mínima necessária para libertar um eletrão

Energia que sobra

$$KE_{\text{max}} = eV_{\text{corte}}$$

$$eV_{\text{corte}} = hf - \Phi \qquad V_{\text{corte}} = \frac{h}{e} f - \frac{\Phi}{e}$$



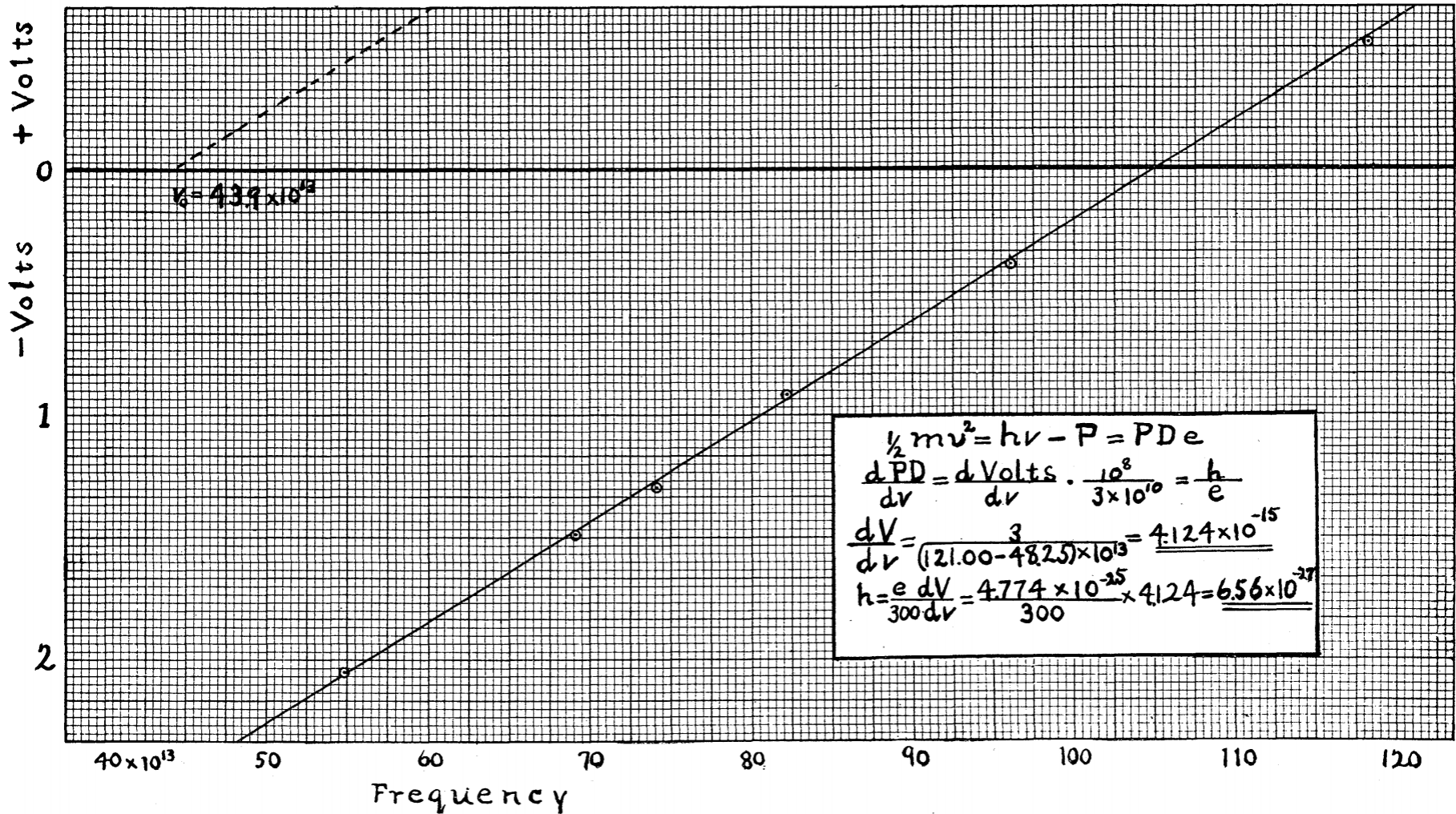


$$V_{\text{corte}} = \frac{h}{e} f - \frac{\Phi}{e}$$

Declive h/e

Função trabalho $\Phi = hf_0$

Valores para Na



$$\nu \Leftrightarrow f$$

Média de 10 ensaios

$$h = 6.569 \times 10^{-27} \text{ erg. sec.}$$

$$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Valor aceito hoje em dia

Li

