

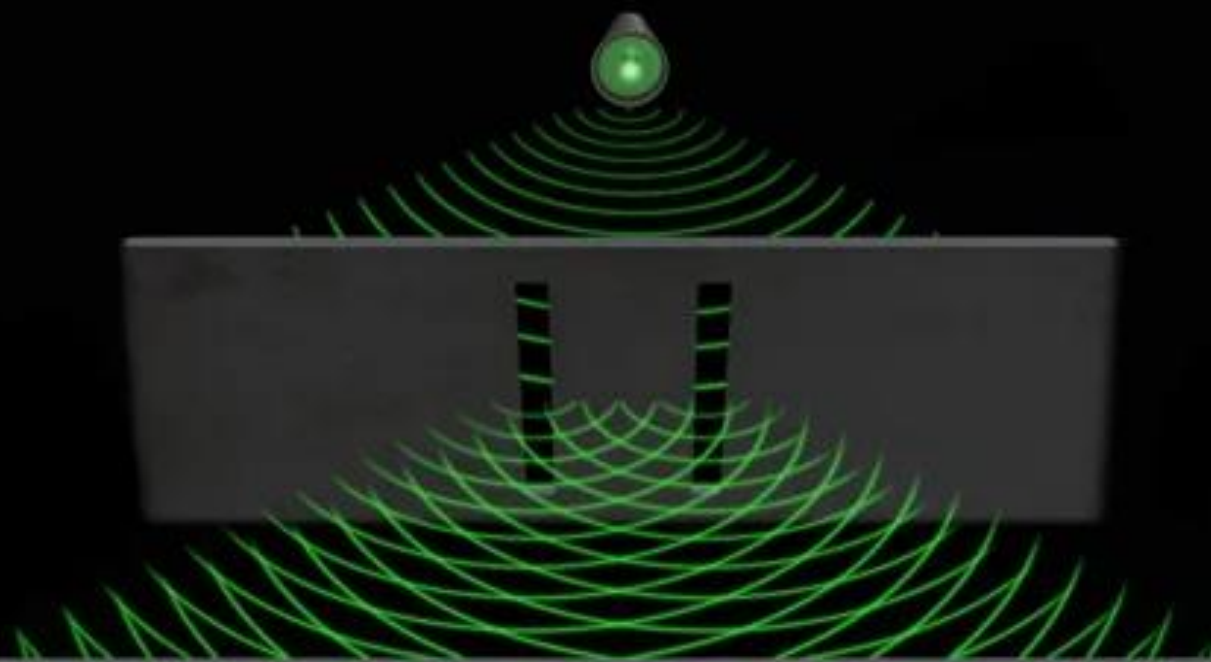


Universidade Federal do ABC



SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



Marcos no Desenvolvimento da Física

Marco #7: A teoria quântica

Prof. Marcelo Augusto Leigui de Oliveira

leigui@ufabc.edu.br

NA ANTIGUIDADE ...

•4 elementos empedoclianianos:

água, ar, terra e fogo;



•2 forças ou princípios:

amor (*philia*) e ódio (*ekthos*), ou seja, atração e repulsão;



• A luz viaja em **linha reta**.

Os raios são emitidos pelos olhos e interagem com os corpos iluminados.



Empedocle's.

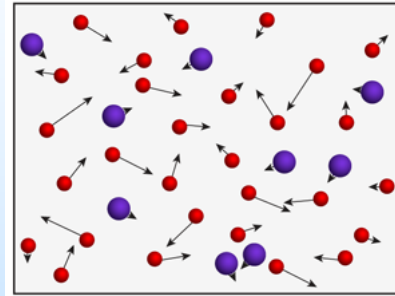
Empédocles (c 490 – c 430 a.C.)



Demócrito (c 460 – c 380 a.C.) e seu discípulo Leucipo (c 460 – c 370 a.C.)

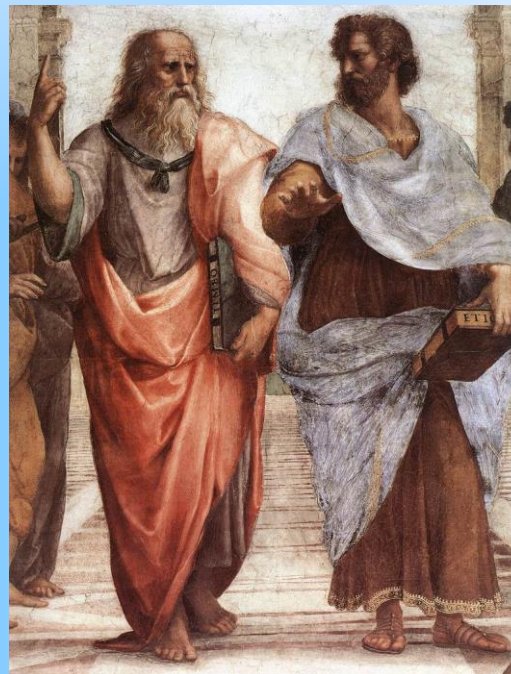


Os primeiros atomistas:
átomos (indivisíveis) em constante movimento no **vácuo**.



Platão (c 427 – c 347 a.C.) e seu discípulo Aristóteles (384 – c 322 a.C.)

• propõe um modelo geométrico para os 4 elementos:



- rejeita a hipótese atomística: a matéria deve ser **contínua** e o vácuo não é físico;
- 5 elementos: **terra, fogo, água, ar e éter**.
- a luz é uma **onda** e propaga-se num meio muito rarefeito: o **éter**;
- achava que a luz arranca “lascas” dos corpos iluminados;

NA ANTIGUIDADE ...

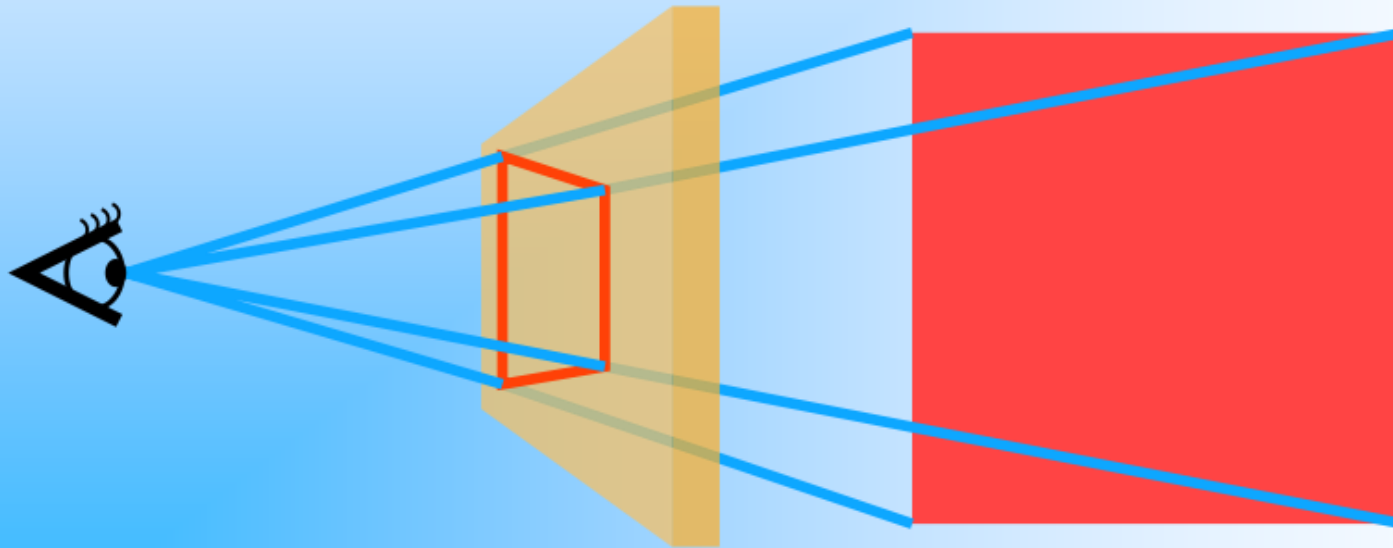
Euclides escreveu também *Óptica*, o mais antigo tratado no tema. Euclides inicia *Óptica* com um conjunto de definições e postulados. Vejamos os dois primeiros:

“Assumimos que:

1. os raios retilíneos procedentes do olho divergem indefinidamente;
2. a figura contida em um conjunto de raios visuais é um cone com vértice no olho e base no objeto visto.”



Euclides (c 325 – 265 a.C.)

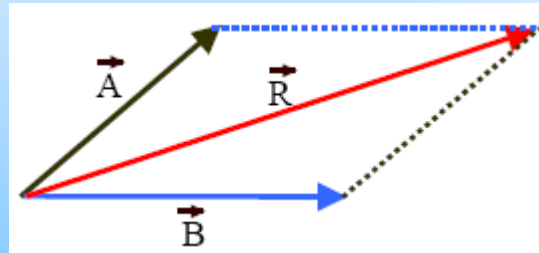
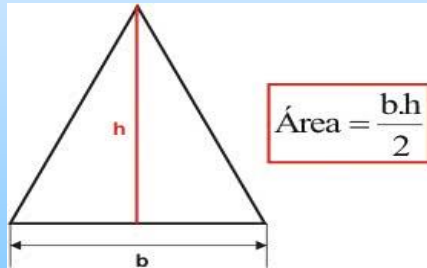


Postulado 2 de Euclides, base da teoria da perspectiva.

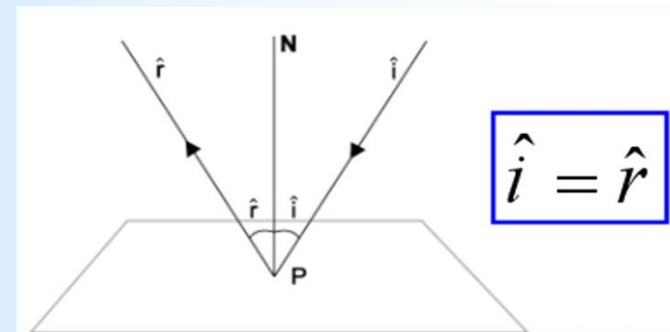
NA ANTIGUIDADE ...

Sábio, geômetra e engenheiro de Alexandria. Popularmente conhecido pela primeira máquina à vapor documentada, a *eolípila* (já conhecida no século anterior).

Em sua obra *Métrica*, descreveu a fórmula para o cálculo da área de um triângulo (também já conhecida por Arquimedes), a regra do paralelogramo para a soma vetorial de velocidades, fez cálculos de centros de gravidade e estudou o funcionamento das engrenagens.



No campo da óptica geométrica, escreveu *Katoptrika*, onde demonstrou a lei fundamental da reflexão dos raios de luz em espelhos: o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.



Heron ou Herão (10 – 70 d.C.)



A *eolípila* de Heron.

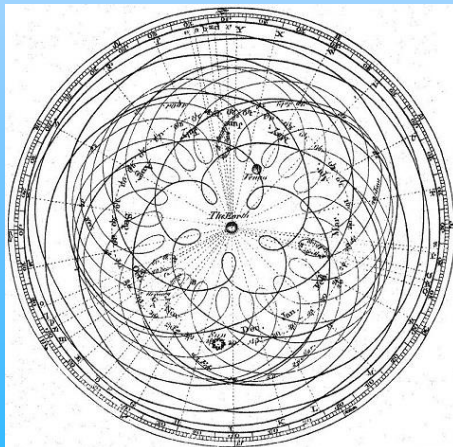
NA ANTIGUIDADE ...

Famoso pelo seu tratado *Almagesto* onde descreve o sistema de mundo geocêntrico (ou ptolomaico) que perdurou por 14 séculos. Escreveu também o tratado *Geografia*.

Realizou pesquisas no campo da *dióptrica*, conduzindo experimentos para medir o caminho da luz nas passagens do ar para água, do ar para o vidro e do vidro para a água e apresentou seus resultados no seu livro *Óptica*, considerado um dos trabalhos mais importantes no ramo antes de Newton - apesar de erroneamente achar que a refração estivesse relacionada aos valores dos ângulos (e não aos dos seus senos, como na lei de Snell) e de ter, supostamente, "cozinhado" os dados para evidenciar a sua teoria.



Claudio Ptolomeu
(90 – 168 d.C.)



Sistema cosmológico
de Ptolomeu.



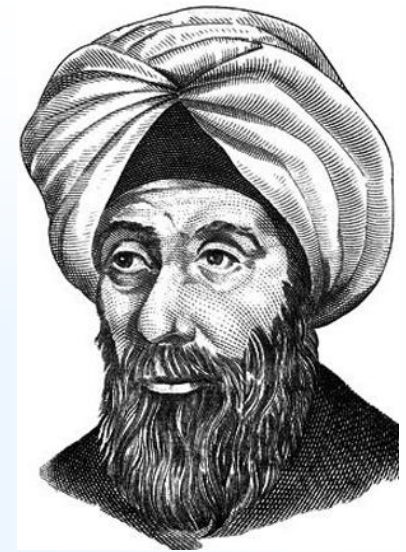
Mapa mundi de Ptolomeu.



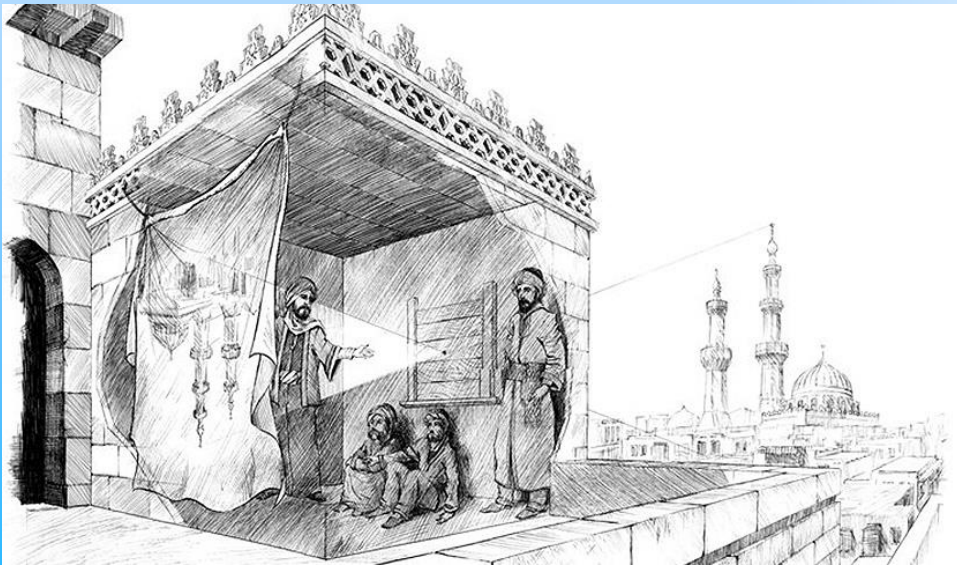
Ptolomeu e a Astronomia
(séc XVI).

NA IDADE MÉDIA (ORIENTE MÉDIO)

Físico, astrônomo e matemático árabe. Muitos o consideram o primeiro cientista, pois ele defendia que as hipóteses só poderiam ser comprovadas experimentalmente. Foi o grande pioneiro da óptica, ao publicar, no início século XI, seu tratado de 7 volumes *Livro de Óptica*, *Kitab al-Manazir*, onde propõe novas teorias sobre a luz, cor e a visão. Cita, pela primeira vez, as lentes, vidros biconvexos que utilizou para magnificar imagens.



Abū 'Alī al-Ḥasan ibn al-Haytham (965 – 1040), o “físico” Alhazen.



Câmara escura.



Diagrama dos olhos e dos nervos ópticos.

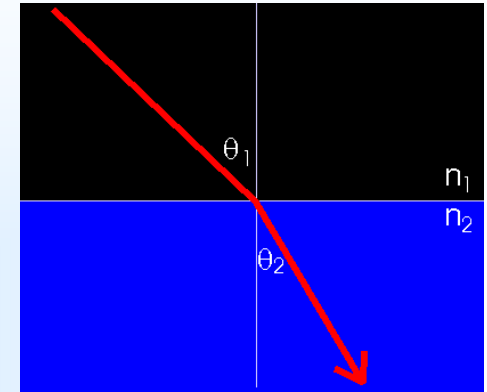
NO SÉCULO XVII



Willebrord Snellius
(1580 - 1626)

(1621) a lei da refração:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



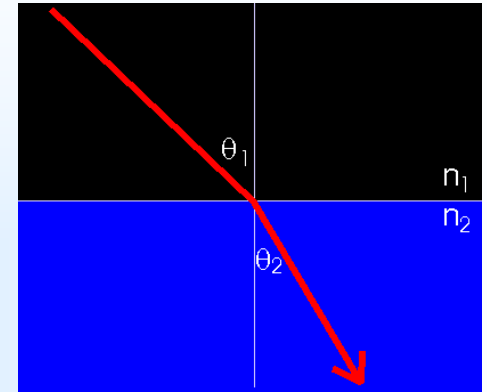
NO SÉCULO XVII



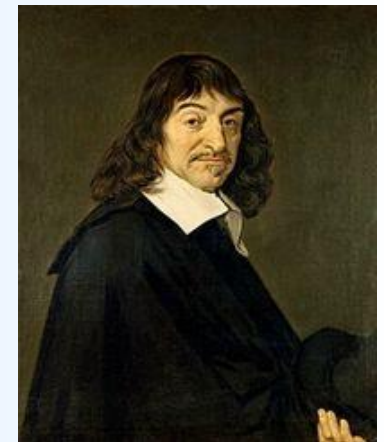
Willebrord Snellius
(1580 - 1626)

(1621) a lei da refração:

$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2$$

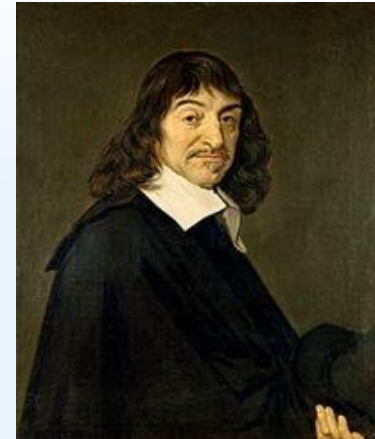


Posteriormente, Descartes a descobriu independentemente e até hoje, muitos livros citam a *lei de Snell e Descartes*.



René du Perron Descartes
(1596 - 1650)

NO SÉCULO XVII



René du Perron Descartes
(1596 - 1650)

- mostrou geometricamente que o ângulo subtendido entre o olho e o centro de um arco-íris é de 42° .
- retomou a ideia de que a luz se propaga no **éter**.

NO SÉCULO XVII

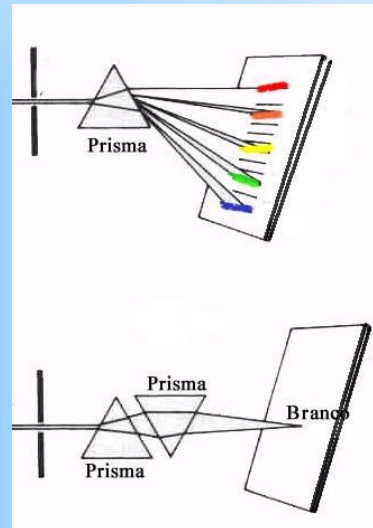
Newton deu várias contribuições para a óptica, sintetizadas em seu livro *Optiks* (1704).

- Construiu o primeiro telescópio refletor (ou newtoniano):

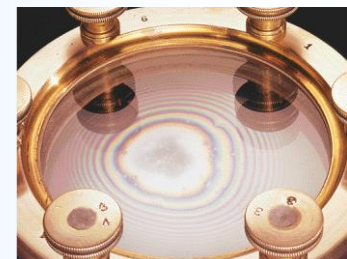


Sir Isaac Newton (1642-1727)

- Descobriu que a luz branca era uma composição de várias cores refratadas diferentemente por um prisma:



- E realizou o *experimentum crucis*:



- Apresentou também os *anéis de Newton*:

Dispersão

O fenômeno da **dispersão** da luz:

Ondas eletromagnéticas propagam-se com velocidade:

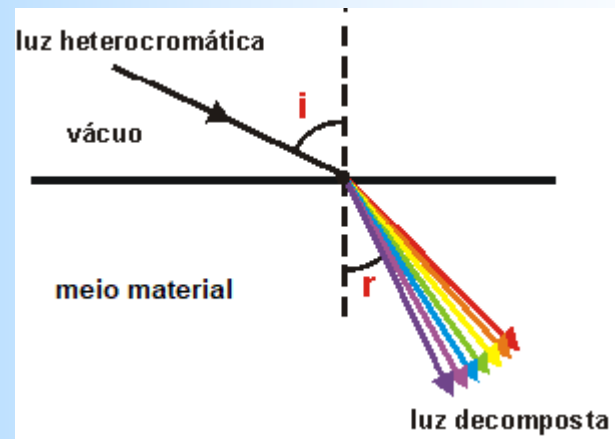
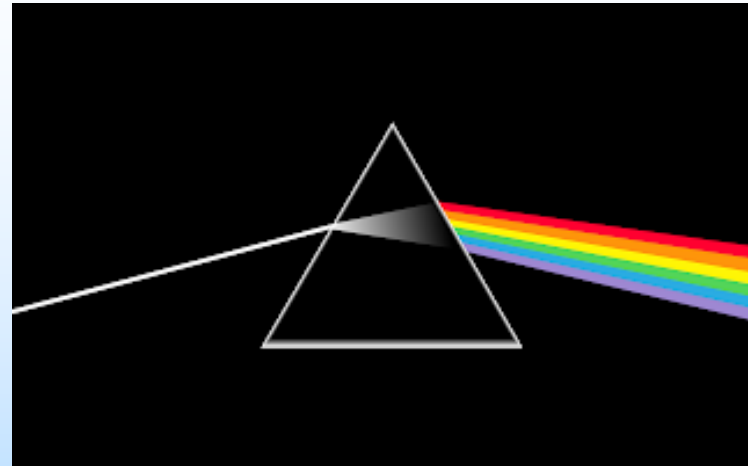
$$v = \lambda_n f = \frac{c}{n},$$

em meios materiais, onde n é o **índice de refração**, $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s a velocidade da luz no vácuo, λ_n o comprimento de onda no meio e f a frequência de oscilação.

Ao penetrar um meio material, a luz sofre **refração**:

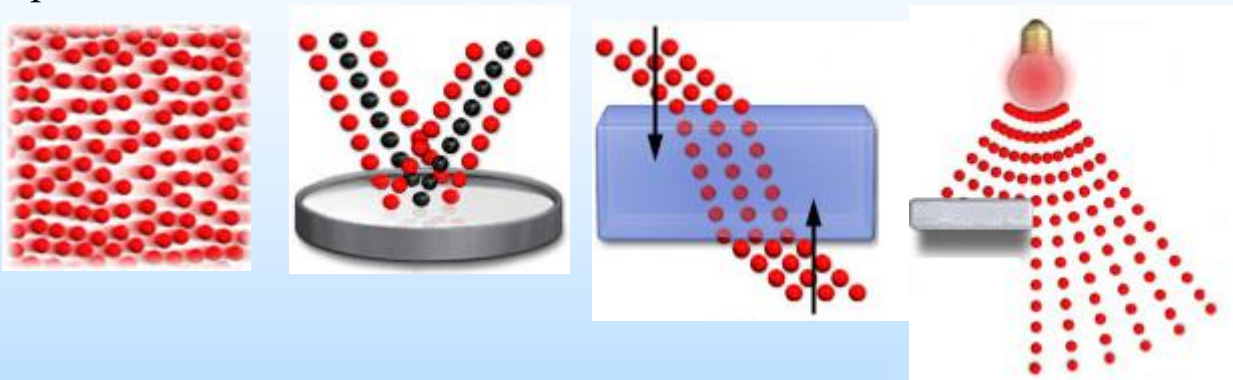
$$n_1 \sen i = n_2 \sen r,$$

onde $n = c/v$ é o **índice de refração** e i e r são os ângulos de incidência e de refração.



NO SÉCULO XVII

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

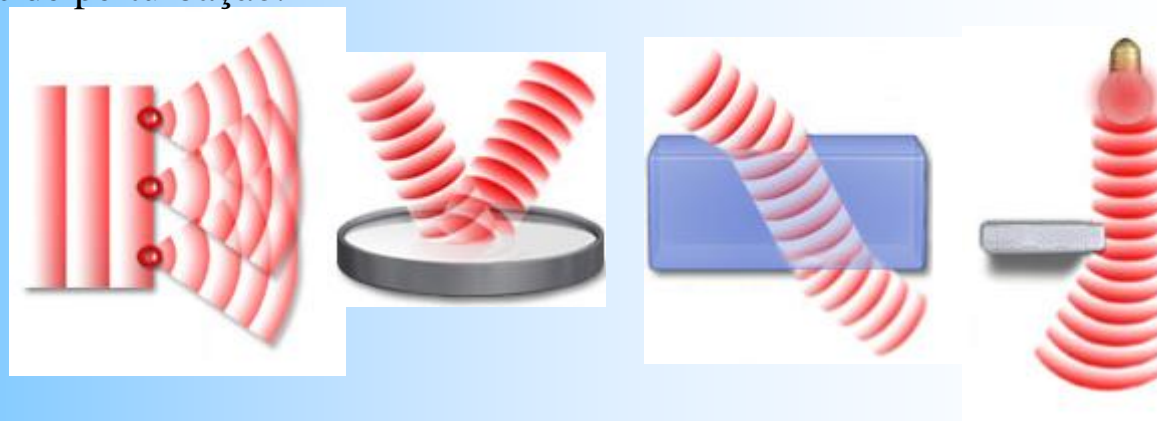


Sir Isaac Newton (1642-1727)

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.

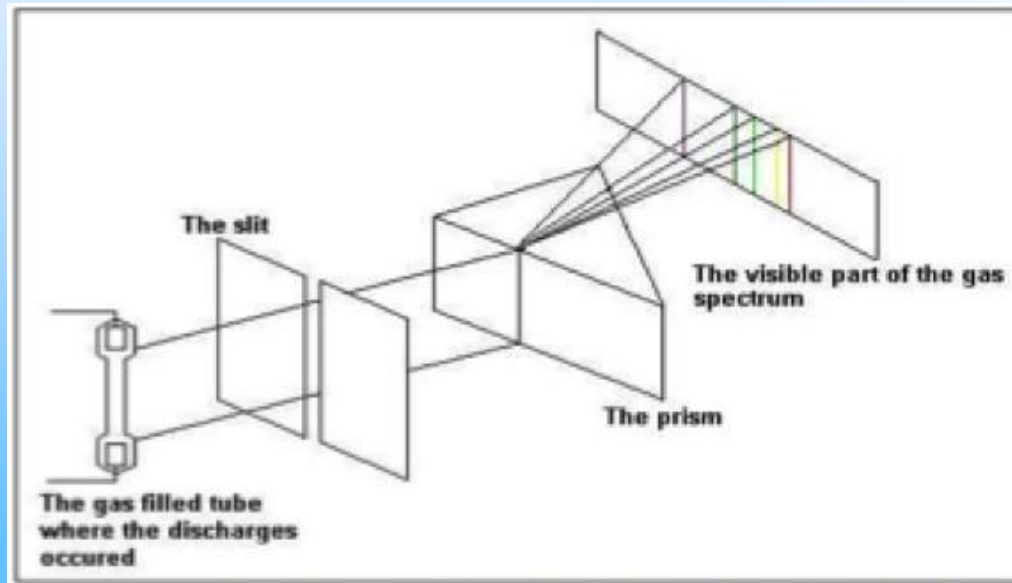


Christiaan Huygens (1629 - 1695)



NO SÉCULO XVIII

- (1752) Thomas Melvill (1726-1753) nota que gases aquecidos emitem linhas (claras) em frequências específicas:

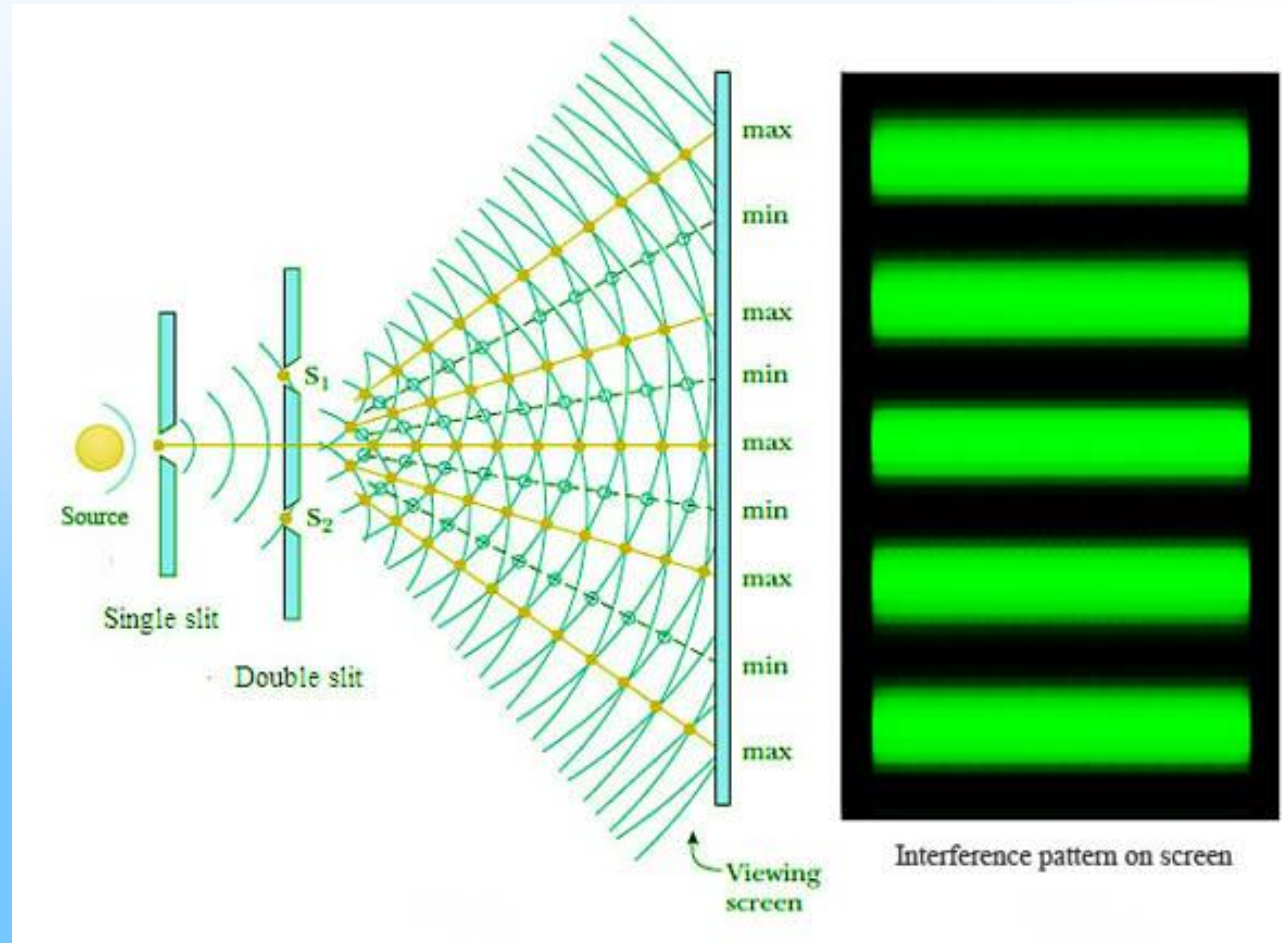


NO SÉCULO XIX

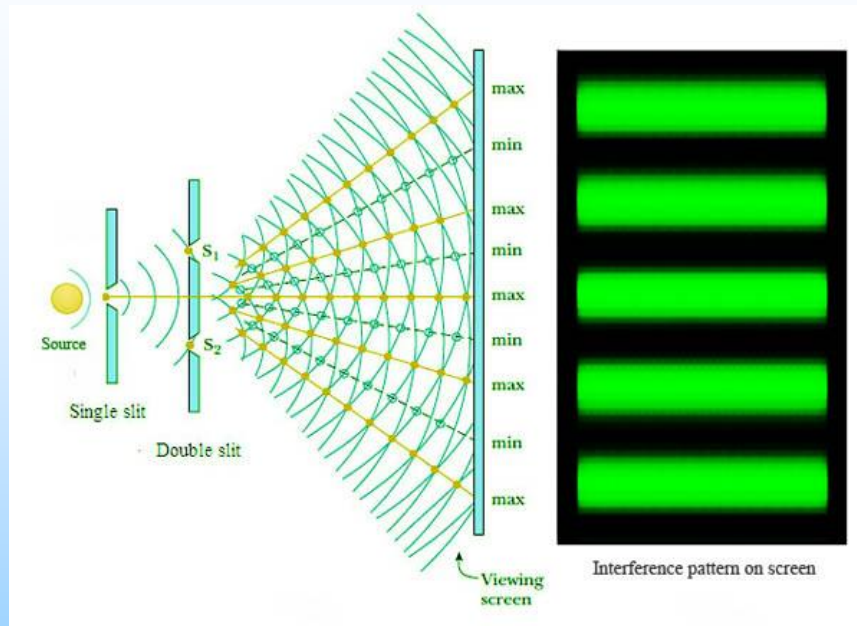
1801 o experimento da dupla fenda de Young:



Thomas Young (1773 - 1829)



Ondulatória

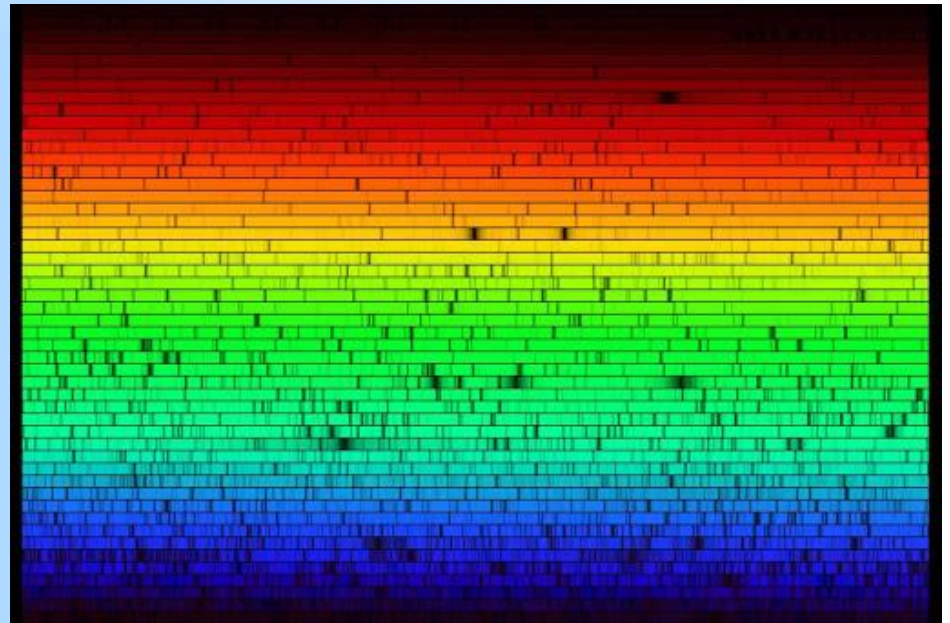
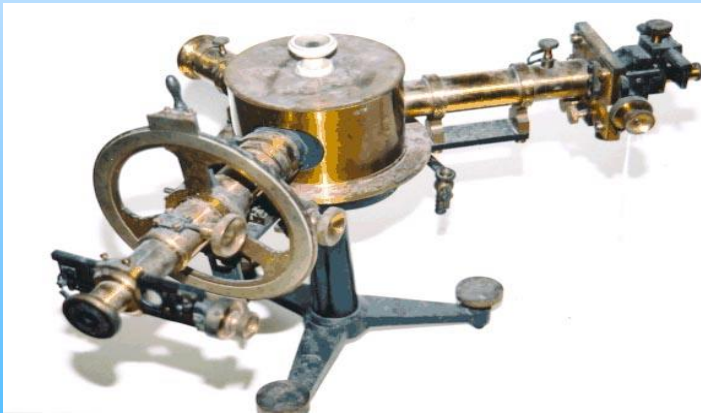


NO SÉCULO XIX

- (1814) Fraunhofer inventa o espectroscópio e estuda 574 linhas (escuras) do Sol, as **linhas de Fraunhofer**.
- Ele mede também o espectro da estrela Sírius.



Joseph von Fraunhofer
(1787 - 1826)



NO SÉCULO XIX

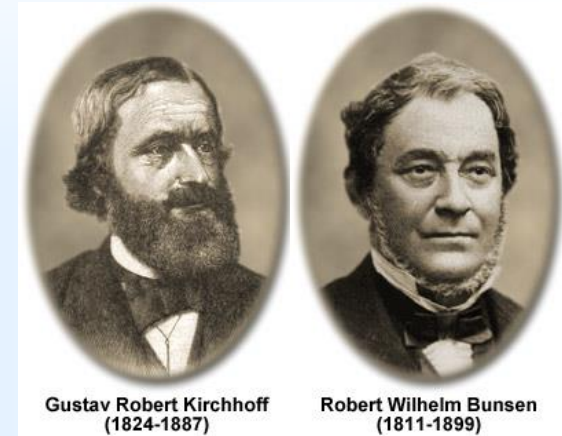


Augusto Comte
(1798 - 1857)

- **(1820)** O filósofo Augusto Comte afirma em seu *Curso de Filosofia Positiva*:
“Podemos conhecer tudo, menos a natureza físico-química das estrelas”.

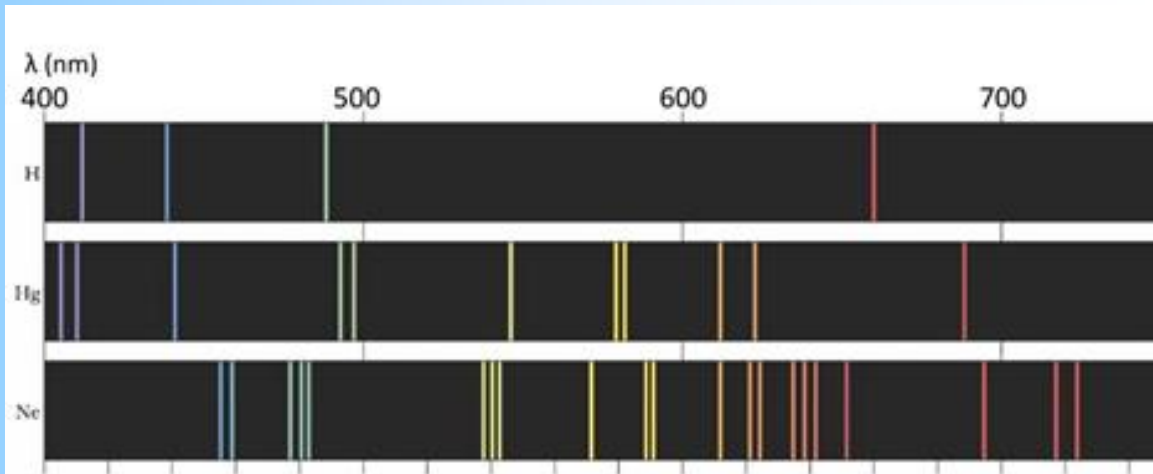
NO SÉCULO XIX

(1860) Kirchhoff e Bunsen acoplam um espectroscópio a um bico de Bunsen e mostram que os conjuntos diferentes de linhas estão associadas a diferentes elementos químicos:



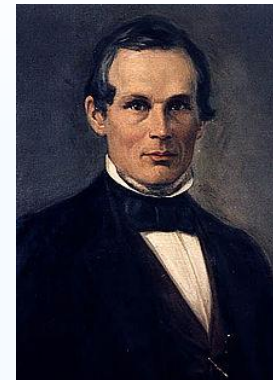
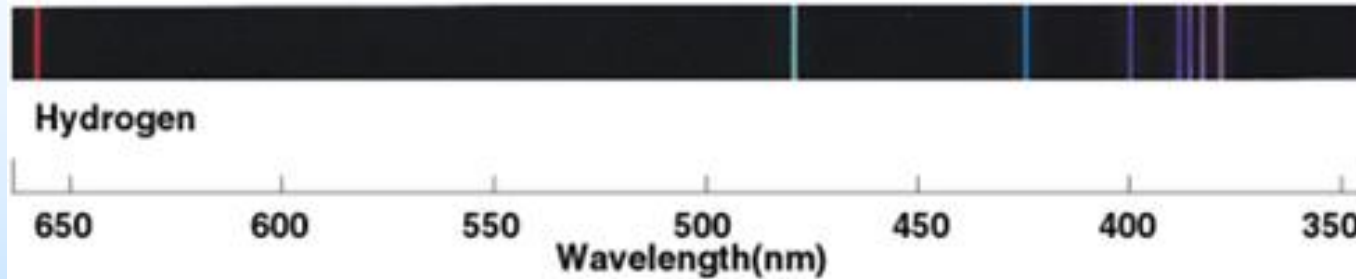
Gustav Robert Kirchhoff
(1824-1887)

Robert Wilhelm Bunsen
(1811-1899)



NO SÉCULO XIX

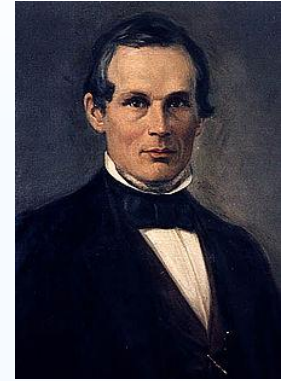
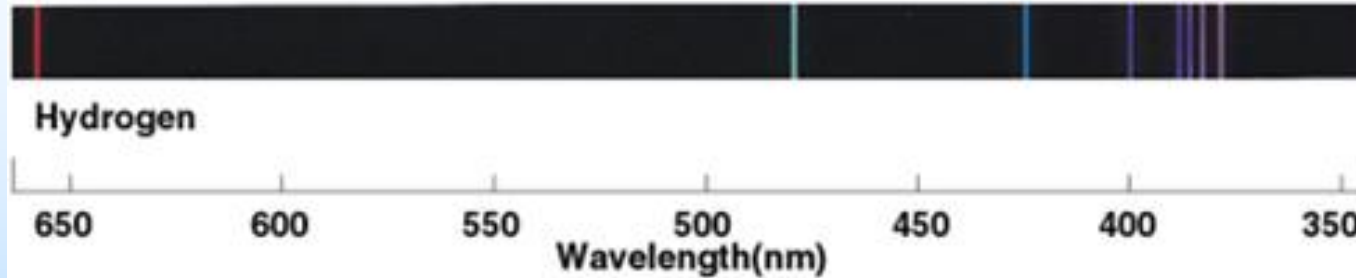
O espectro mais simples é o do hidrogênio, observado por Ångström, em (1853):



Anders Jonas Ångström
(1814-1874)

NO SÉCULO XIX

O espectro mais simples é o do hidrogênio, observado por Ångström, em (1853):



Anders Jonas Ångström
(1814-1874)



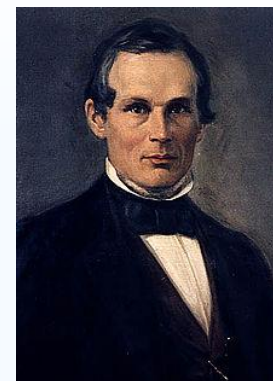
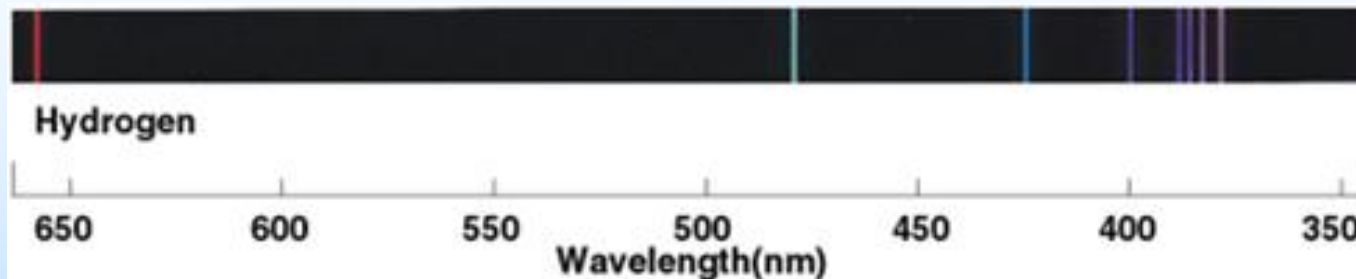
Johan Jakob Balmer
(1825-1898)

(1885) Balmer descobre uma fórmula que descreve a série visível do hidrogênio:

$$\lambda(\text{Å}) = 3645,6 \left(\frac{n^2}{n^2 - 4} \right), \text{ onde } n = 3, 4, 5, \dots$$

NO SÉCULO XIX

O espectro mais simples é o do hidrogênio, observado por Ångström, em (1853):



Anders Jonas Ångström
(1814-1874)

(1885) Balmer descobre uma fórmula que descreve a série visível do hidrogênio:

$$\lambda(\text{Å}) = 3645,6 \left(\frac{n^2}{n^2 - 4} \right), \text{ onde } n = 3, 4, 5, \dots$$

(1888) Rydberg reescreveu a fórmula de Balmer em termos do número de onda (λ^{-1}):

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

onde $R_H = 1,09737 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ (valor moderno) é a **constante de Rydberg**.



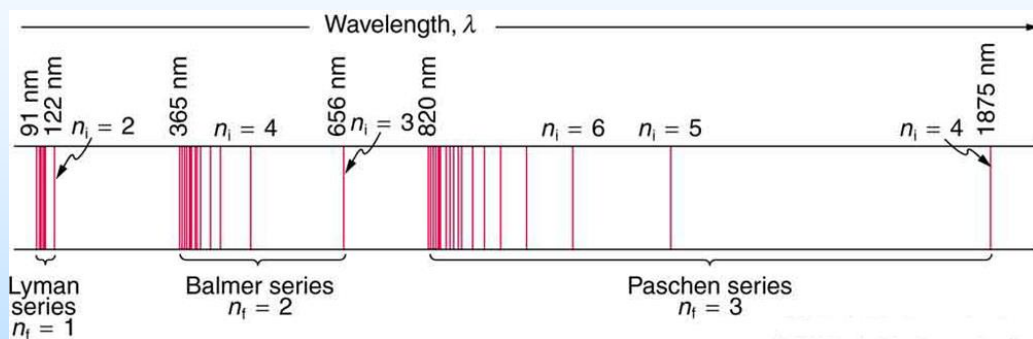
Johan Jakob Balmer
(1825-1898)



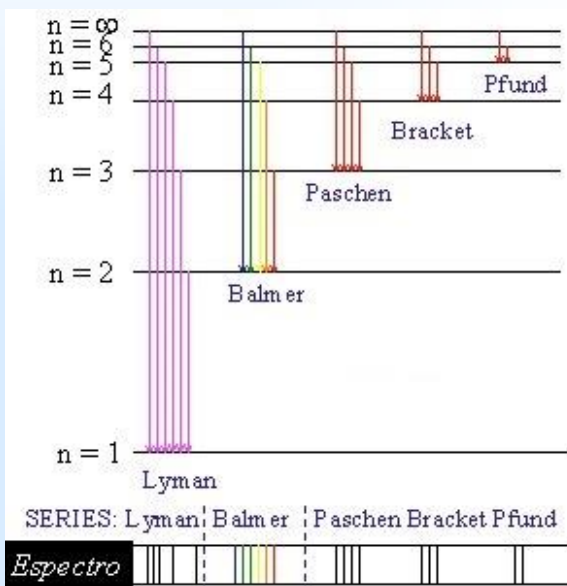
Johannes Rydberg
(1854-1919)

NO SÉCULO XX

Posteriormente, outras séries foram descobertas para o hidrogênio:



série	ano(s)	m	n	faixa espectral
Lyman	1906 – 1914	1	2, 3, ...	uv
Balmer	1885	2	3, 4, ...	uv+vis
Paschen	1908	3	4, 5, ...	iv
Brackett	1922	4	5, 6, ...	iv
Pfund	1924	5	6, 7, ...	iv



(1908) Ritz generaliza a fórmula:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n > m \text{ (números inteiros)}$$

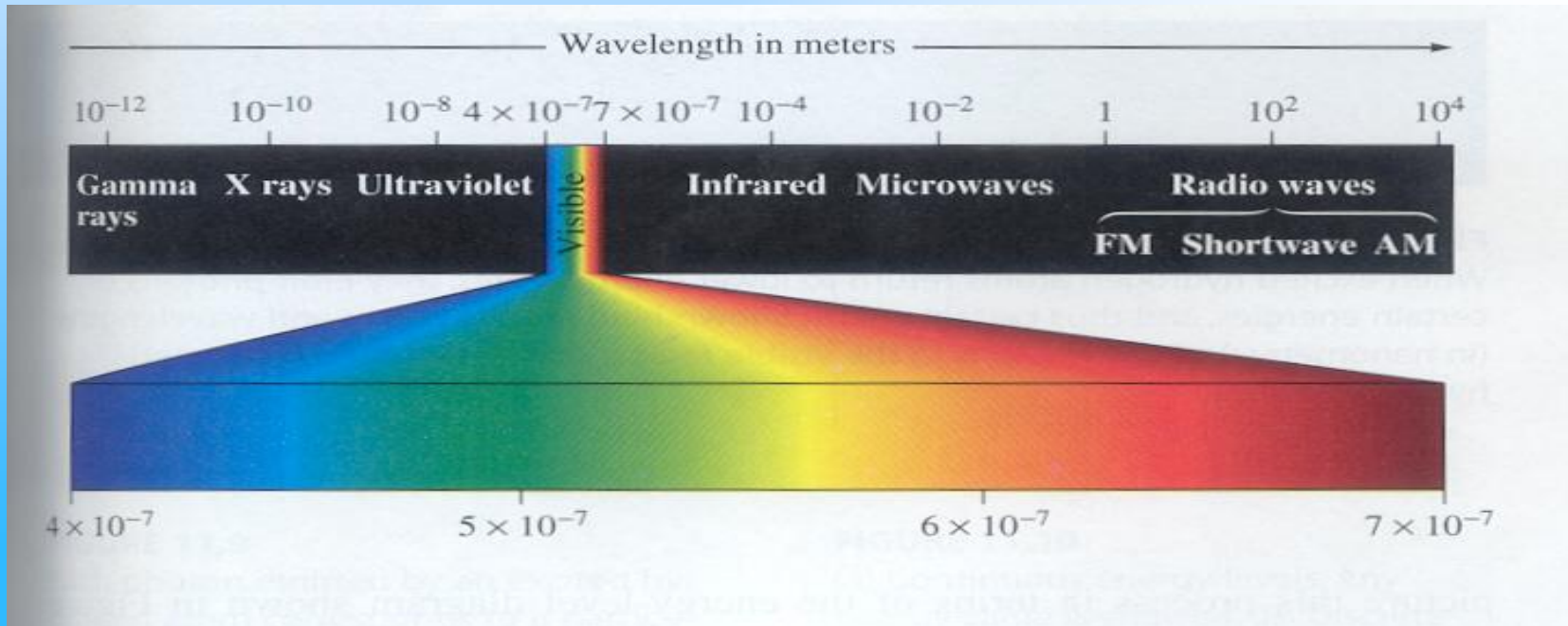
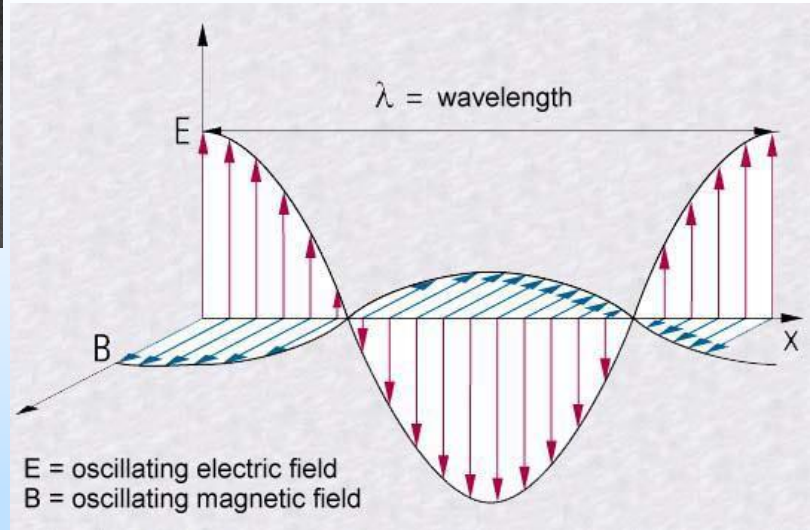
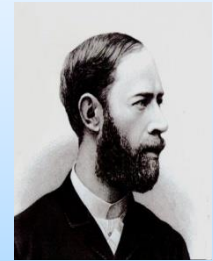
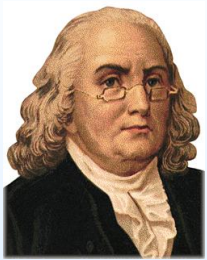
onde $R_H = 1,09737 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ (valor moderno) é a **constante de Rydberg**.



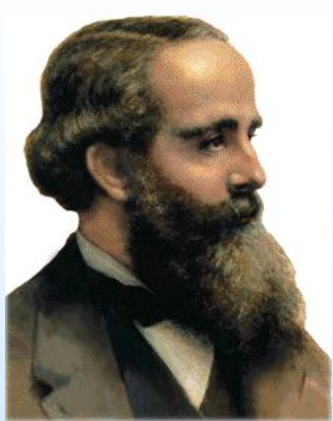
Walther Ritz
(1878-1909)

NOS SÉCULOS XVIII & XIX

Eletromagnetismo



NO SÉCULO XIX



James Clerk Maxwell
(1831 - 1879)

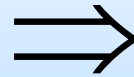
1864 James C. Maxwell descreve as 4 equações do eletromagnetismo, verificando que delas pode-se deduzir uma equação de onda.

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

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

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

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



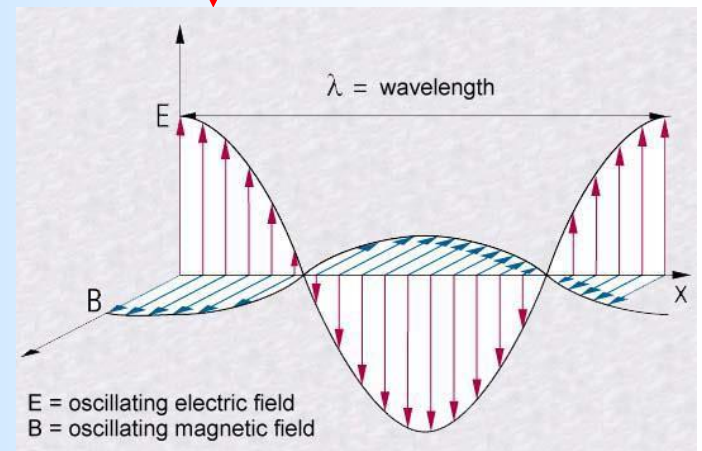
$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

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

onde:

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

$$\approx 300.000 \text{ km/s}$$

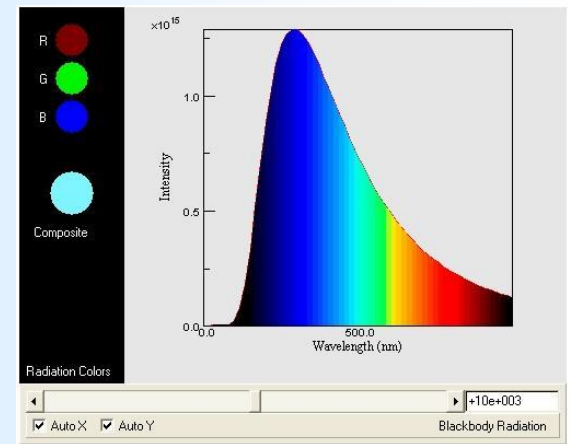
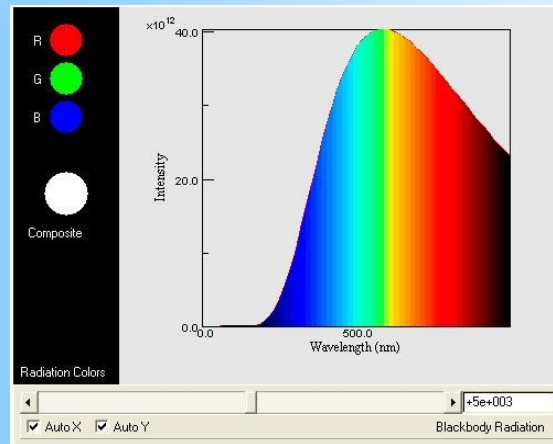
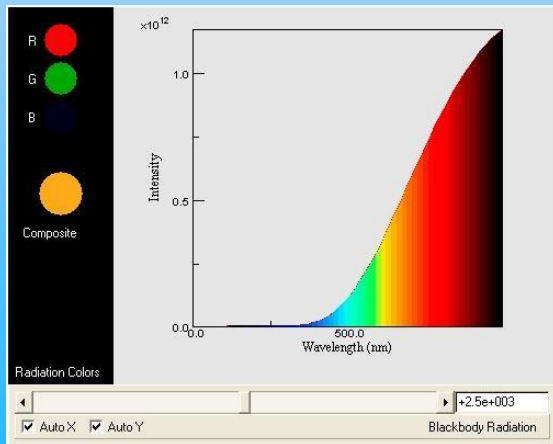


NO SÉCULO XIX ...

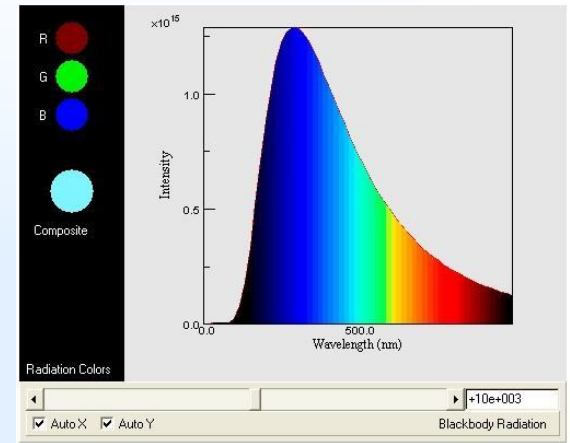
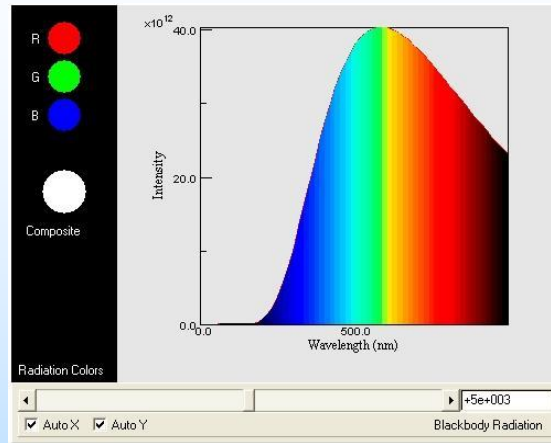
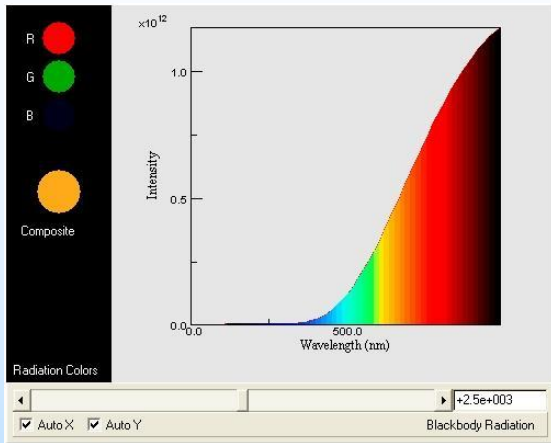
Emissão de *radiação térmica* por objetos opacos.



Emissão de *radiação térmica* por objetos opacos.



Emissão de *radiação térmica* por objetos opacos.



CORES DAS ESTRELAS

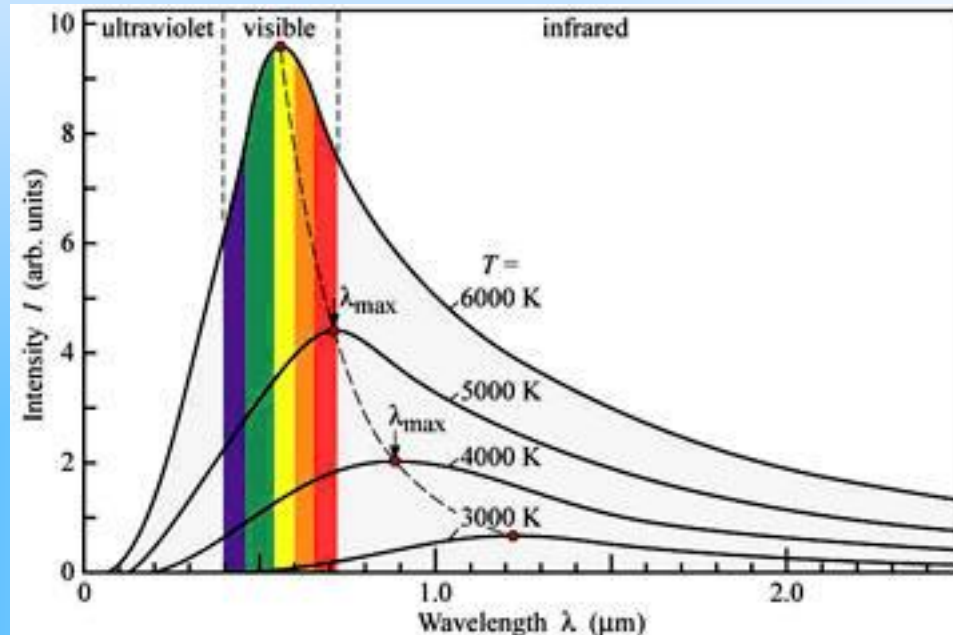
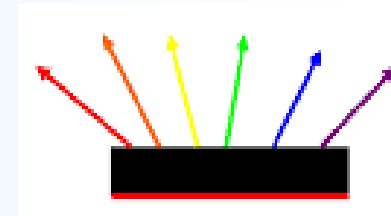
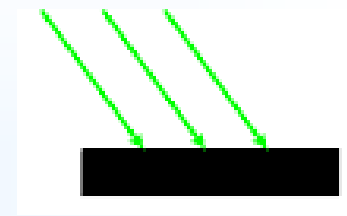
CLASSE ESPECTRAL	COR	TEMPERATURA SUPERFÍCIE
O		28.000 - 50.000 K
B		10.000 - 28.000 K
A		7.500 - 10.000 K
F		6.000 - 7.500 K
G		5.000 - 6.000 K
K		3.500 - 5.000 K
M		2.500 - 3.500 K

HIPERCULTURA

Radiação de corpo negro

Corpo negro (ideal):

- absorve toda a radiação incidente (sem refletir):
- quando aquecido emite radiação somente como resultado das vibrações térmicas de seus átomos:

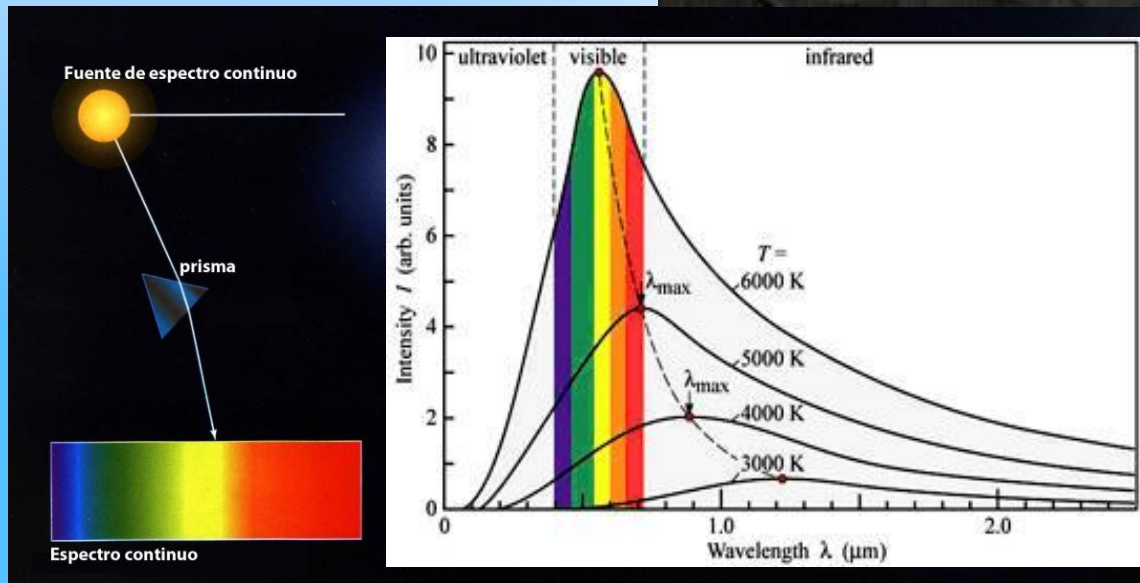


Espectro de corpo negro.

Espectros Atômicos

Tipos de espectros:

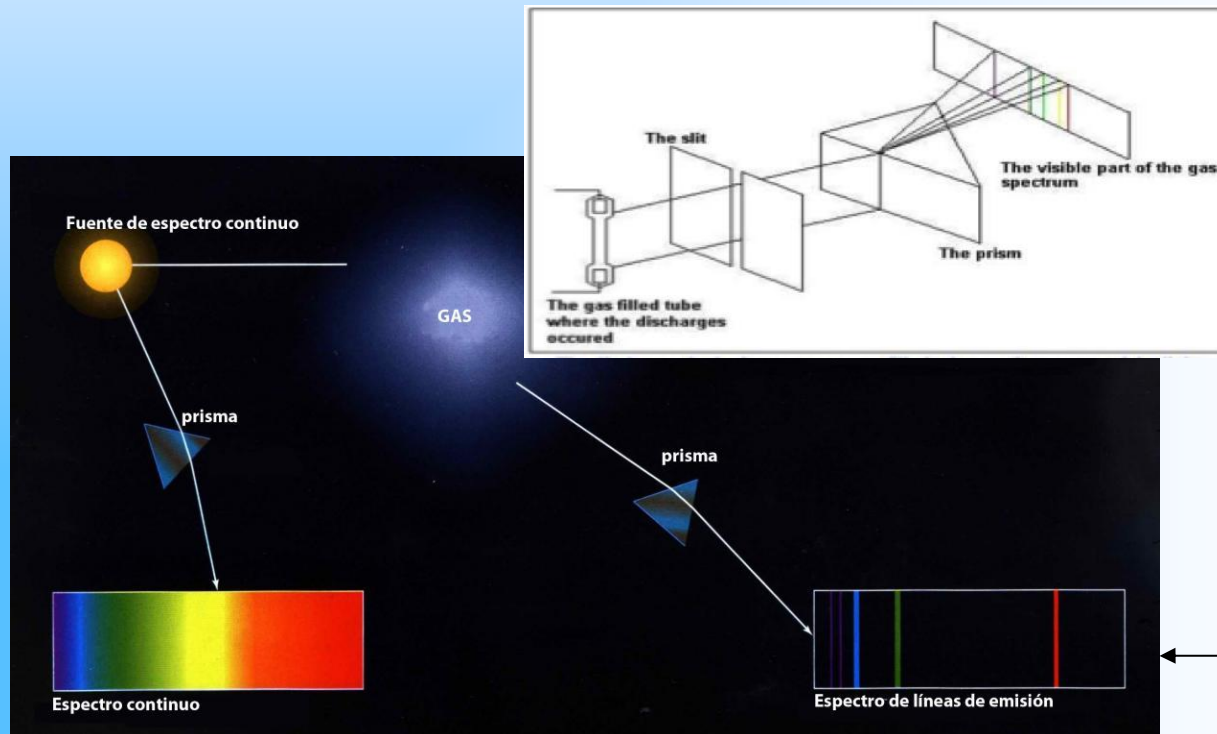
1. Espectro contínuo: não é emitido em linhas, mas em todas as frequências, por exemplo: radiação de corpo negro (veremos em aula posterior).



Espectros Atômicos

Tipos de espectros:

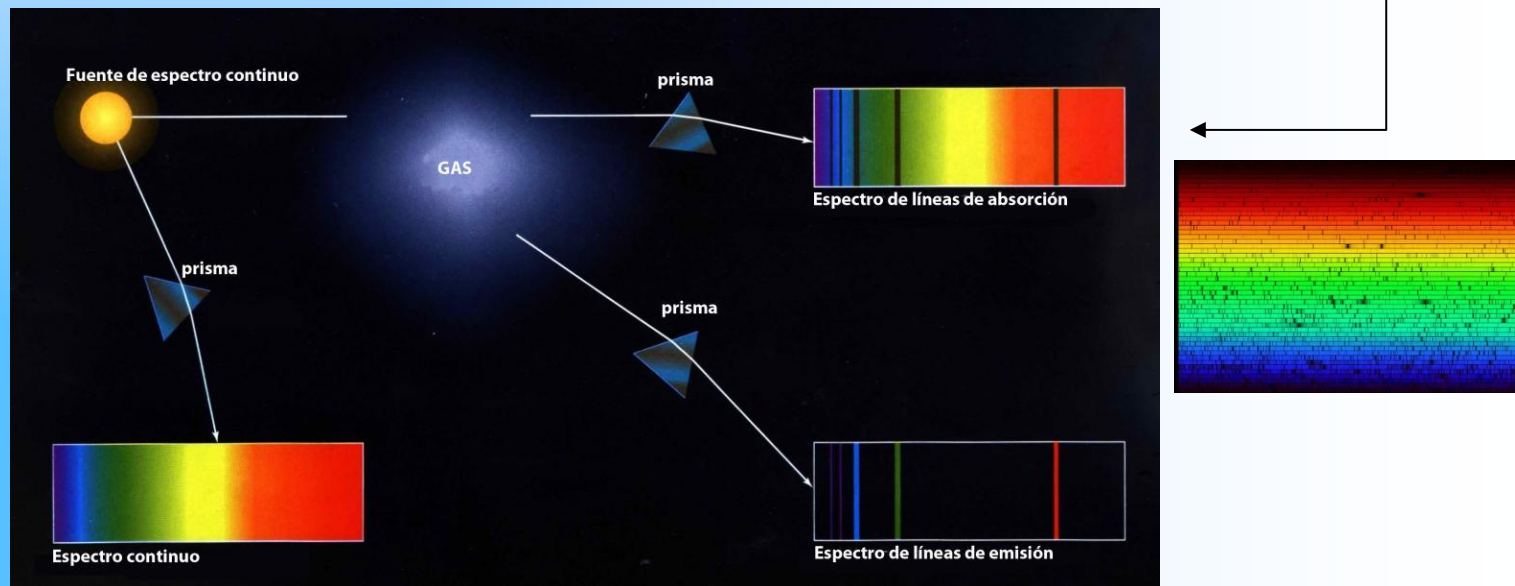
1. Espectro contínuo: não é emitido em linhas, mas em todas as frequências, por exemplo: radiação de corpo negro (veremos em aula posterior);
2. Espectro de emissão (linhas claras): produzido quando uma substância é excitada e emite luz em frequências bem definidas, por exemplo: termoluminescência, eletroluminescência, quimioluminescência.



Espectros Atômicos

Tipos de espectros:

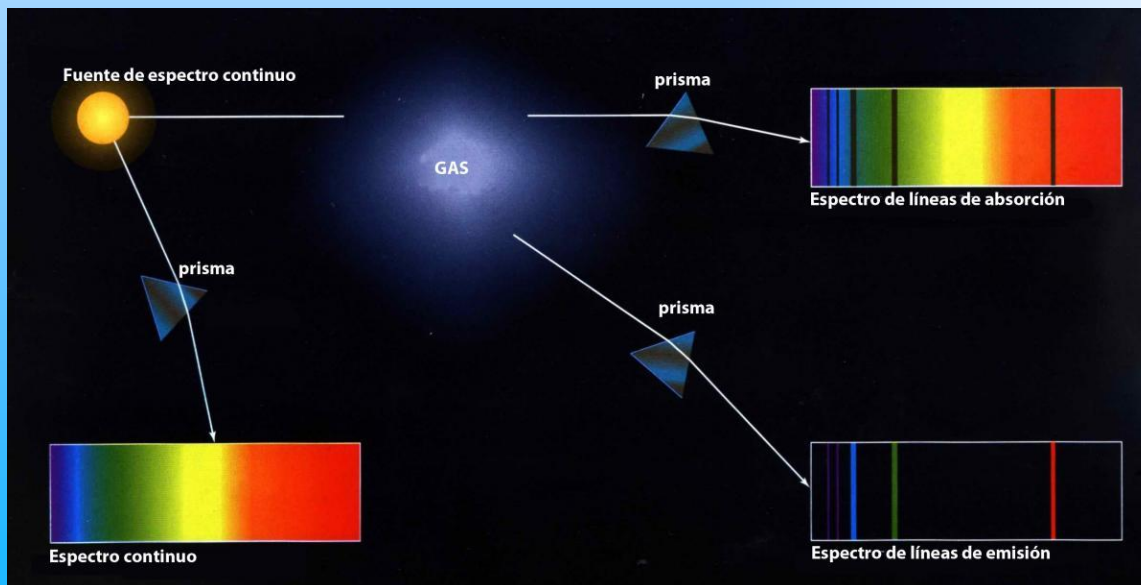
1. Espectro contínuo: não é emitido em linhas, mas em todas as frequências, por exemplo: radiação de corpo negro (veremos em aula posterior);
2. Espectro de emissão (linhas claras): produzido quando uma substância é excitada e emite luz em frequências bem definidas, por exemplo: termoluminescência, eletroluminescência, quimioluminescência;
3. Espectro de absorção (linhas escuras): produzido quando a luz branca (previamente produzida) é absorvida por uma substância.



Espectros Atômicos

Tipos de espectros:

1. Espectro contínuo: não é emitido em linhas, mas em todas as frequências, por exemplo: radiação de corpo negro (veremos em aula posterior);
2. Espectro de emissão (linhas claras): produzido quando uma substância é excitada e emite luz em frequências bem definidas, por exemplo: termoluminescência, eletroluminescência, quimioluminescência;
3. Espectro de absorção (linhas escuras): produzido quando a luz branca (previamente produzida) é absorvida por uma substância.



➤ Gases monoatômicos → linhas

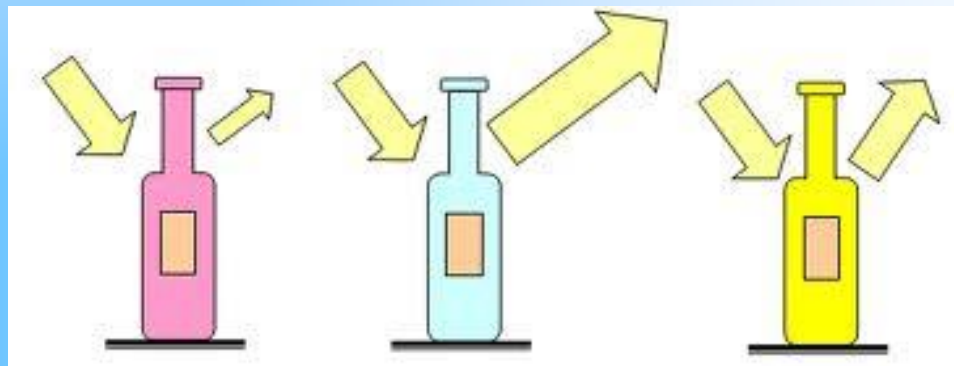
➤ Outros gases → bandas

NO SÉCULO XIX

Emissão de *radiação térmica* por objetos opacos.



Gustav Robert Kirchhoff
(1824-1887)

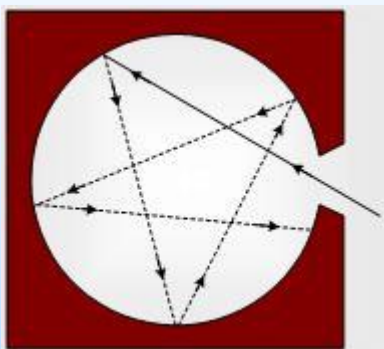


1860 Gustav R. Kirchhoff formula que:
No equilíbrio térmico (à temperatura T):

$$\delta\epsilon_{\lambda}^{abs} = \delta\epsilon_{\lambda}^{emit}$$

NO SÉCULO XIX

1860 Gustav Kirchhoff sugere que um orifício numa cavidade aquecida à temperatura uniforme deve ter espectro de corpo negro:

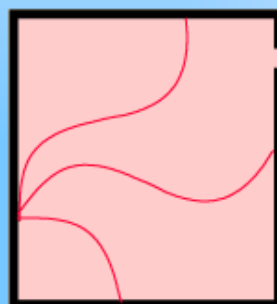


$R(\lambda) = \left(\frac{c}{4}\right) u(\lambda)$, onde $u(\lambda)$ é a densidade de energia.



Gustav Robert Kirchhoff
(1824-1887)

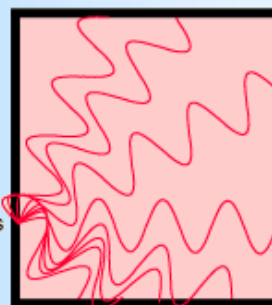
Fazendo-se uma contagem dos modos de ondas estacionárias:



Number of modes
per unit frequency
per unit volume

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

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



NO SÉCULO XIX

1879 Stefan descobre experimentalmente:

$$R \propto T^4$$

A taxa de emissão de radiação por unidade de área (potência por unidade de área) de objetos aquecidos é proporcional à quarta potência da temperatura.



Joseph Stefan (1835-1893)

NO SÉCULO XIX

1879 Stefan descobre experimentalmente:

$$R \propto T^4$$

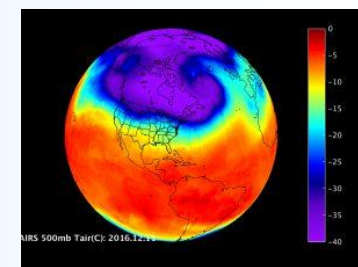
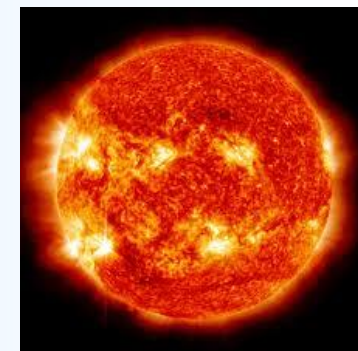
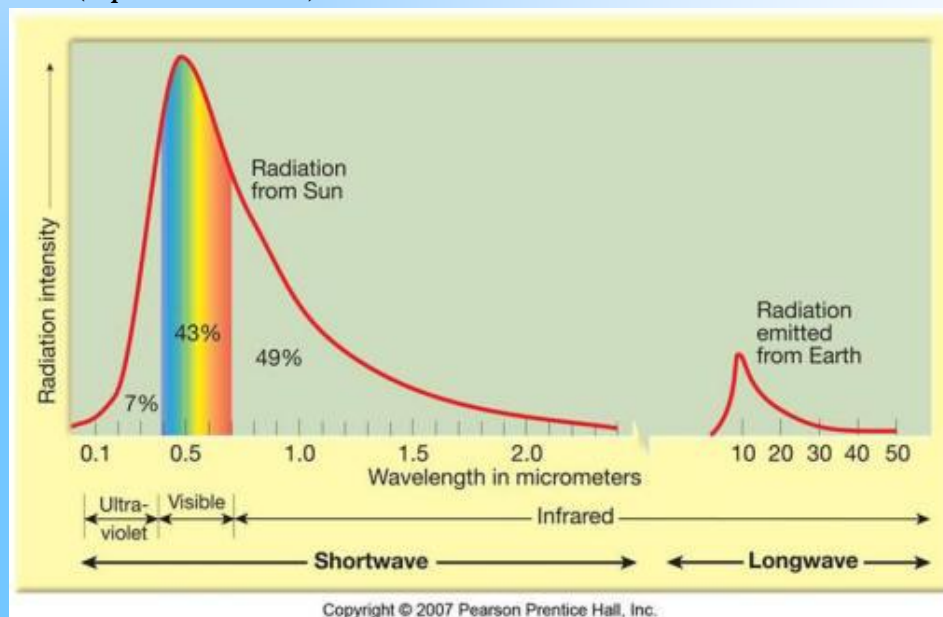
A taxa de emissão de radiação por unidade de área (potência por unidade de área) de objetos aquecidos é proporcional à quarta potência da temperatura.



Joseph Stefan (1835-1893)

Exemplo: Qual a razão das intensidades (W/m^2) das radiações de corpo negro emitidas pelo Sol ($T_S = 5800 \text{ K}$) e pela Terra ($T_T = 300 \text{ K}$)?

$$\frac{R_S}{R_T} = 1,4 \cdot 10^5$$



NO SÉCULO XIX



Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)

1879 Stefan descobre experimentalmente:

1884 Boltzmann deduz teoricamente:



Joseph Stefan (1835-1893)

Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \sigma T^4, \quad \text{onde } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ é a constante de Stefan-Boltzmann}$$

A taxa de emissão de radiação por unidade de área (potência por unidade de área) de objetos aquecidos é proporcional à quarta potência da temperatura.

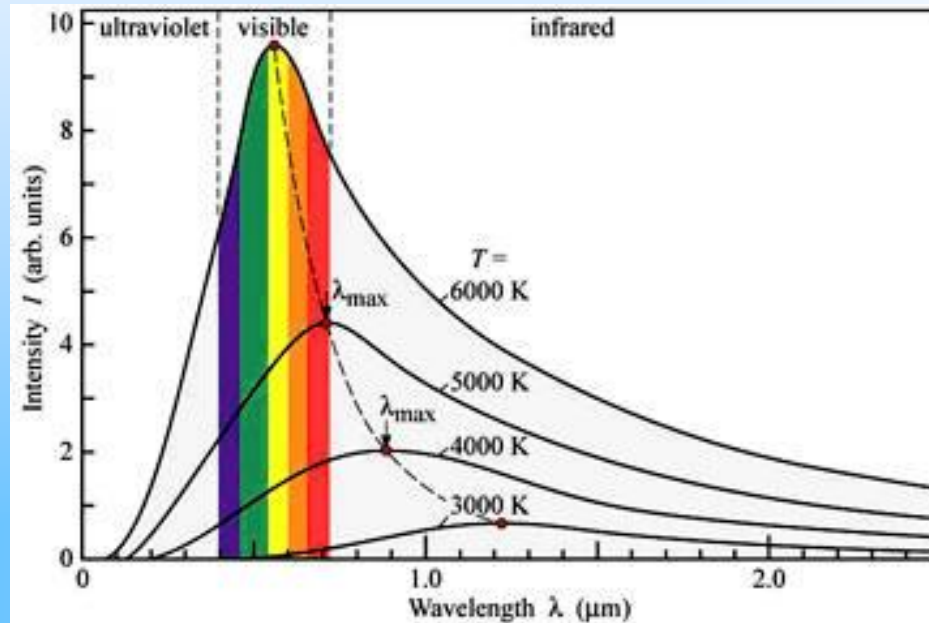
NO SÉCULO XIX

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



Wilhelm Wien
(1864-1928)



$$T_1 > T_2 > T_3 \Rightarrow \lambda_1^{\max} < \lambda_2^{\max} < \lambda_3^{\max}$$

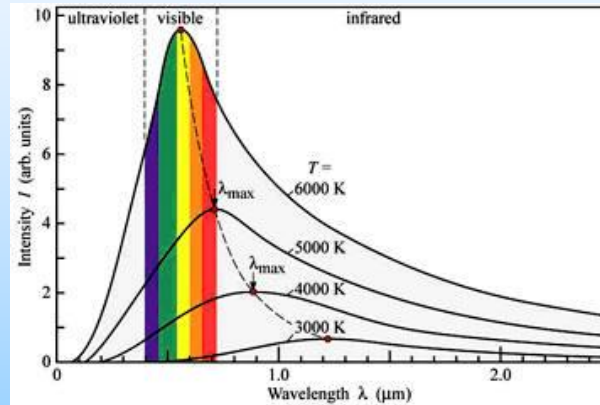
NO SÉCULO XIX

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



Wilhelm Wien
(1864-1928)

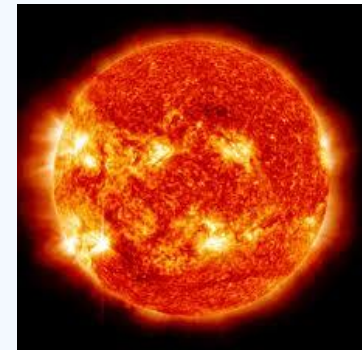


$$T_1 > T_2 > T_3 \Rightarrow \lambda_1^{\max} < \lambda_2^{\max} < \lambda_3^{\max}$$

Exemplo: A intensidade máxima de radiação solar ocorre em $\lambda^{\max} = 490 \text{ nm}$, qual é a temperatura da superfície solar?

$$\lambda^{\max} = 490 \text{ nm} = 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898}{T} \Rightarrow T = \frac{0,002898}{\lambda^{\max}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{4,9 \cdot 10^{-7}} = 5914 \text{ K}$$



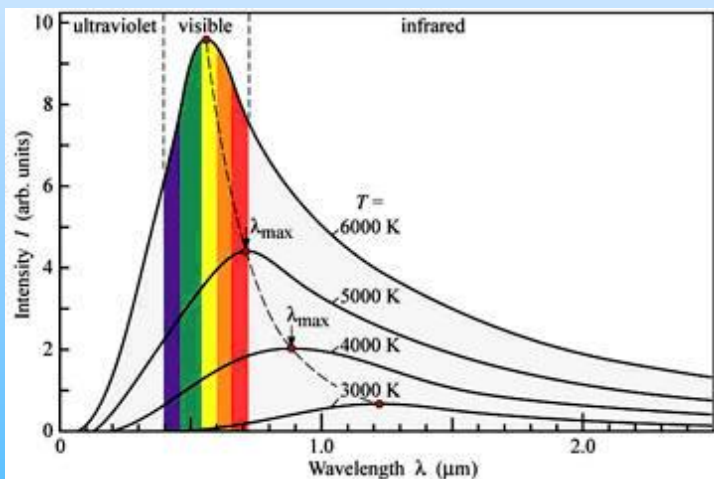
NO SÉCULO XIX

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

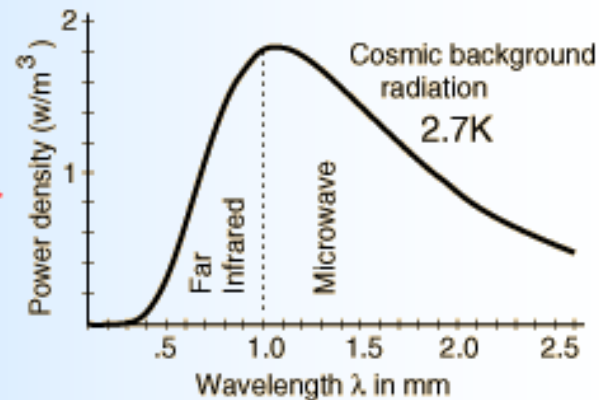
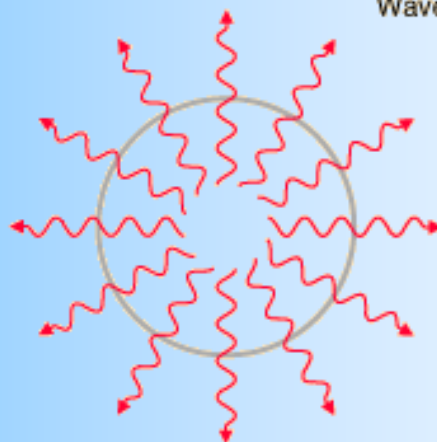
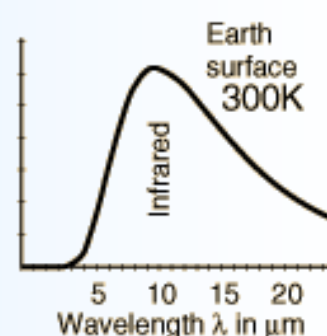
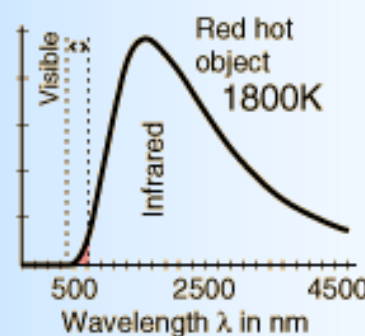
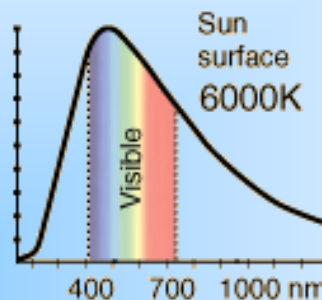
$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



Wilhelm Wien
(1864-1928)



$$T_1 > T_2 > T_3 \Rightarrow \lambda_1^{\max} < \lambda_2^{\max} < \lambda_3^{\max}$$



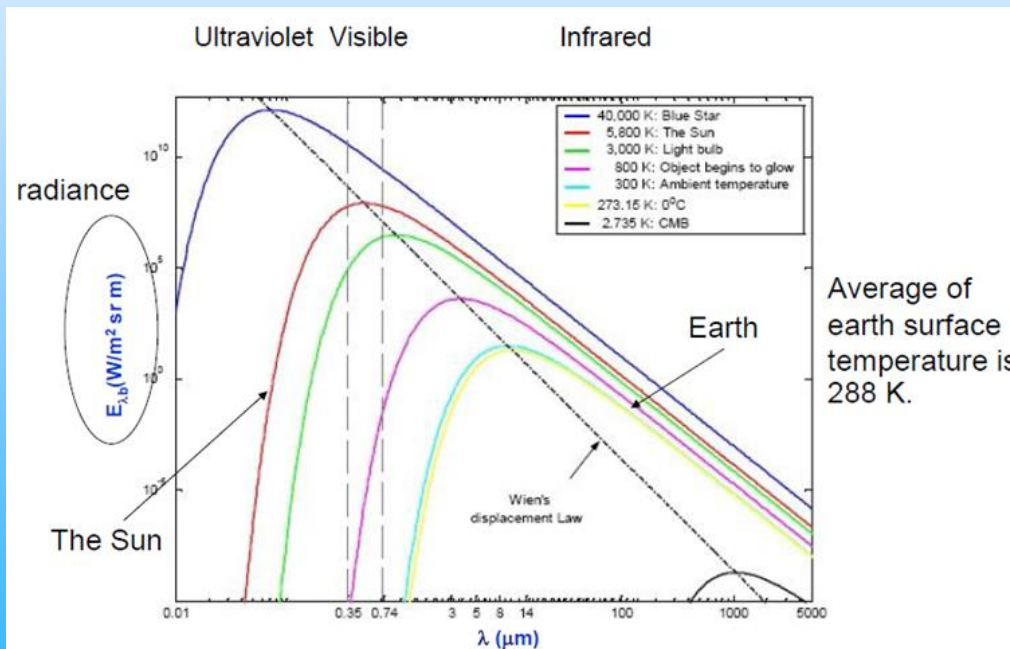
NO SÉCULO XIX

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

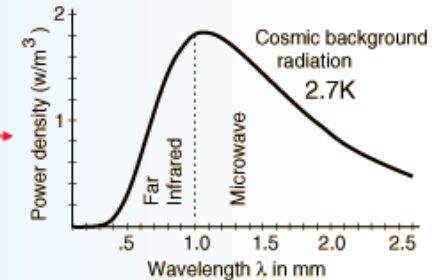
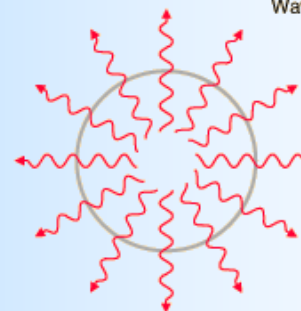
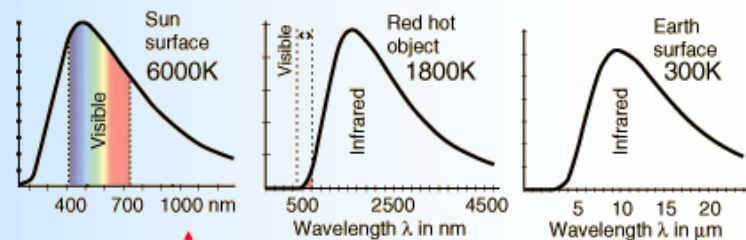
$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



Wilhelm Wien
(1864-1928)



Average of earth surface temperature is 288 K.



$$T_1 > T_2 > T_3 \Rightarrow \lambda_1^{\max} < \lambda_2^{\max} < \lambda_3^{\max}$$

NO SÉCULO XIX

1893 Wien formula a lei do deslocamento:

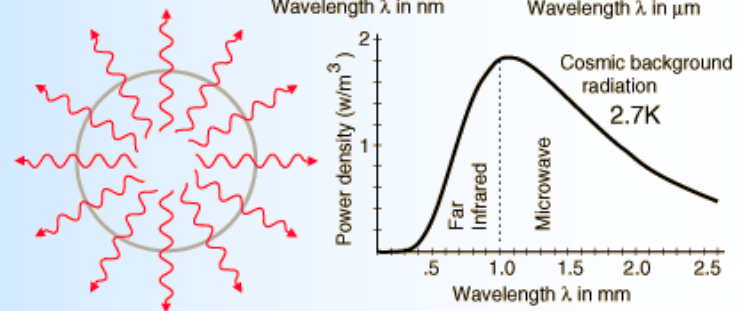
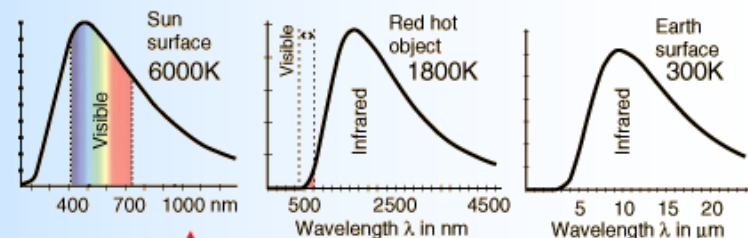
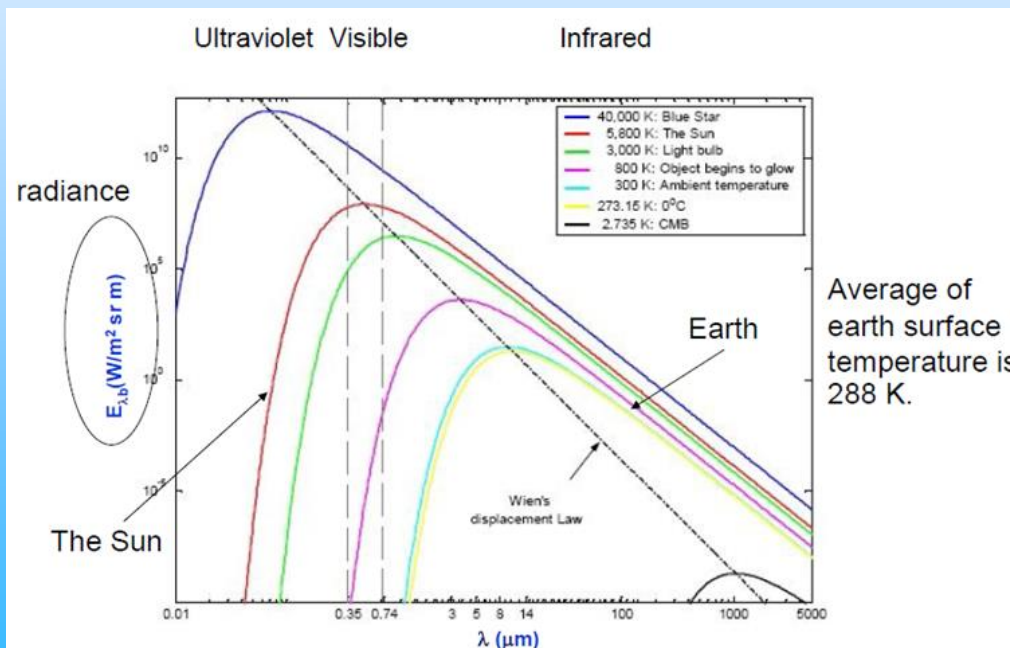
$$\lambda^{\max} = \frac{0,002898[\text{m} \cdot \text{K}]}{T}$$



Wilhelm Wien
(1864-1928)



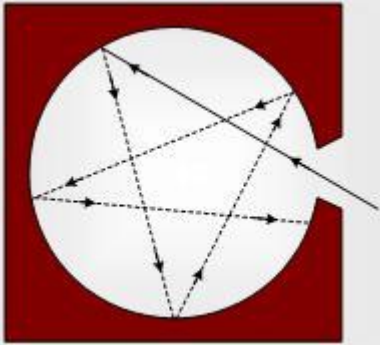
1911



$$T_1 > T_2 > T_3 \Rightarrow \lambda_1^{\max} < \lambda_2^{\max} < \lambda_3^{\max}$$

NOS SÉCULOS XIX & XX

1860 Gustav Kirchhoff sugere que um orifício numa cavidade aquecida à temperatura uniforme deve ter espectro de corpo negro:

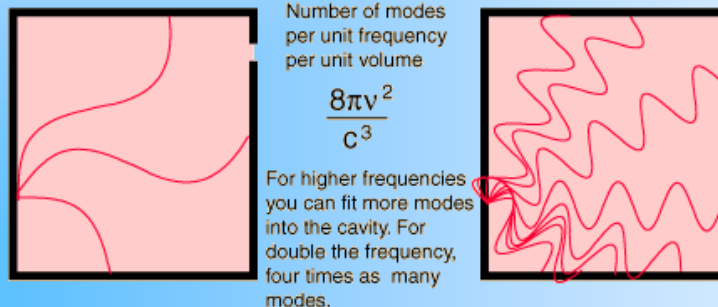


$R(\lambda) = \left(\frac{c}{4}\right) u(\lambda)$, onde $u(\lambda)$ é a densidade de energia.



Gustav Robert Kirchhoff
(1824-1887)

Fazendo-se uma contagem dos modos de ondas estacionárias e utilizando-se de argumentos clássicos,



Lord Rayleigh (John Strutt)
(1842-1919)



James Jeans
(1877-1946)

vem: $u(\lambda) = n(\lambda)kT = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$, que é a fórmula de Rayleigh (**1900**) & Jeans (**1905**).

NOS SÉCULOS XIX & XX

Mas a fórmula de Rayleigh & Jeans

$$u(\lambda) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$

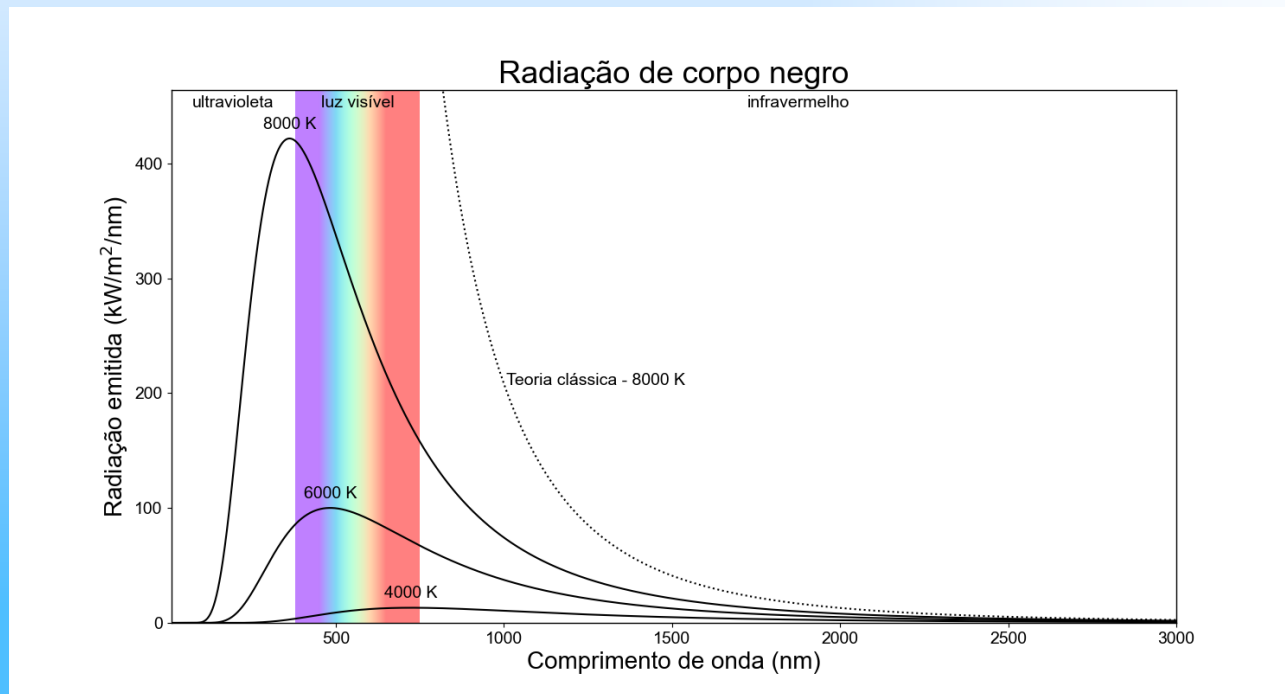
tinha um probleminha ...



Lord Rayleigh (John Strutt)
(1842-1919)



James Jeans



A catástrofe do ultravioleta!

NOS SÉCULOS XIX & XX



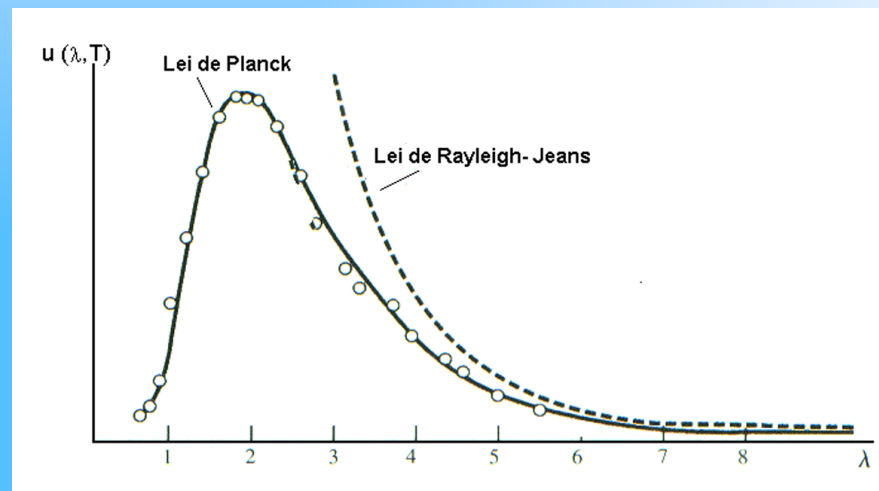
1900 Max Planck substituiu o cálculo da energia média de estados contínuos por discretos:

$$\langle E \rangle = \int E \cdot p(E) dE \rightarrow \langle E \rangle = \sum_n E_n \cdot p_n(E)$$

e introduz a hipótese da **quantização de energia**: as moléculas vibrantes somente podem ter valores de energia quantizados, ou discretos:

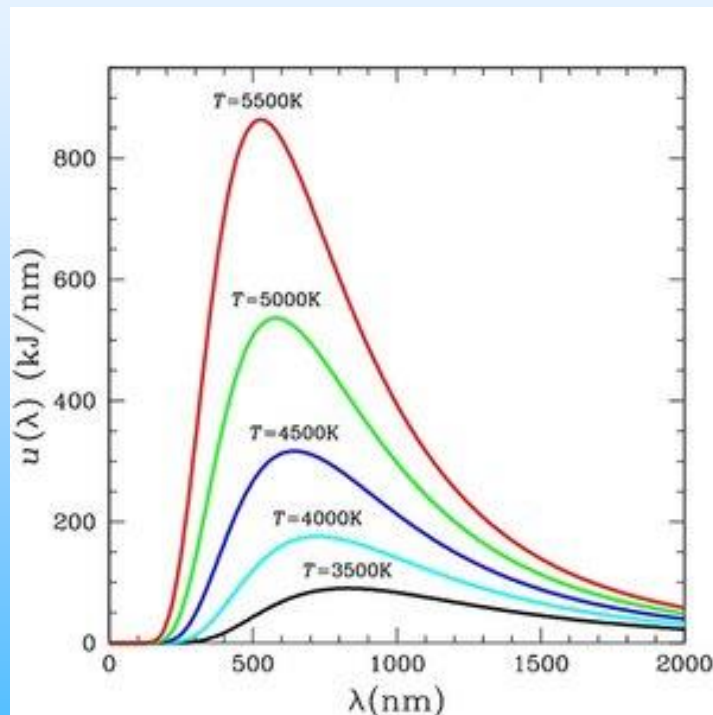
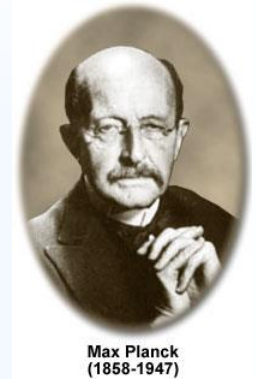
$$E_n = n(hf).$$

Com isso, Planck formula uma lei de distribuição que se ajustava perfeitamente aos dados em todos os comprimentos de onda:



NOS SÉCULOS XIX & XX

1900 Max Planck, com a hipótese da quantização de energia, formula uma lei de distribuição que se ajustava perfeitamente aos dados em todos os comprimentos de onda:



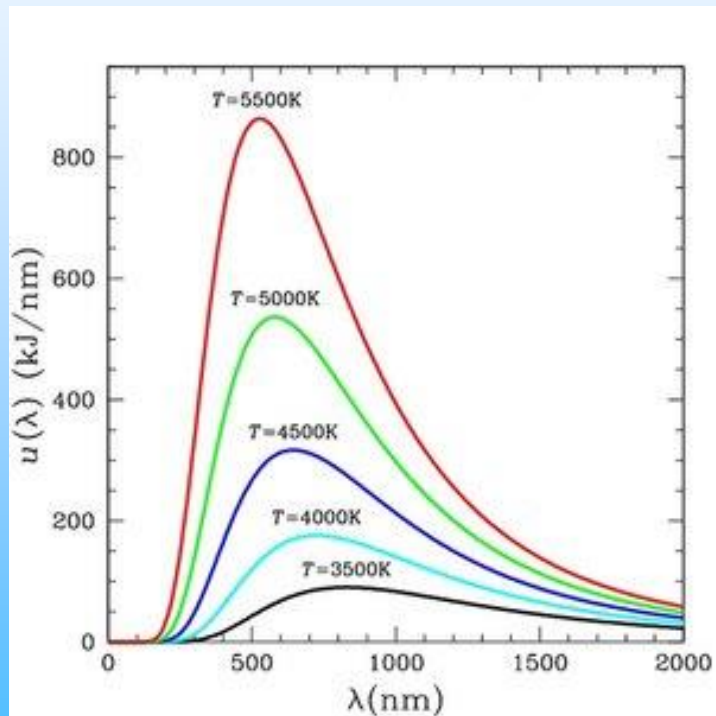
$$E_n = n(hf) \Rightarrow$$

$$u(\lambda) = \frac{8\pi hc\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ é a constante de Planck.

NOS SÉCULOS XIX & XX

1900 Max Planck, com a hipótese da quantização de energia, formula uma lei de distribuição que se ajustava perfeitamente aos dados em todos os comprimentos de onda:



$$E_n = n(hf) \Rightarrow$$

$$u(\lambda) = \frac{8\pi hc\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ é a constante de Planck.

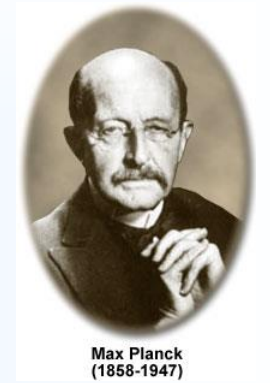


Max Planck
(1858-1947)



1918

Na lápide de seu túmulo, em Göttingen (Alemanha):



Max Planck
(1858-1947)

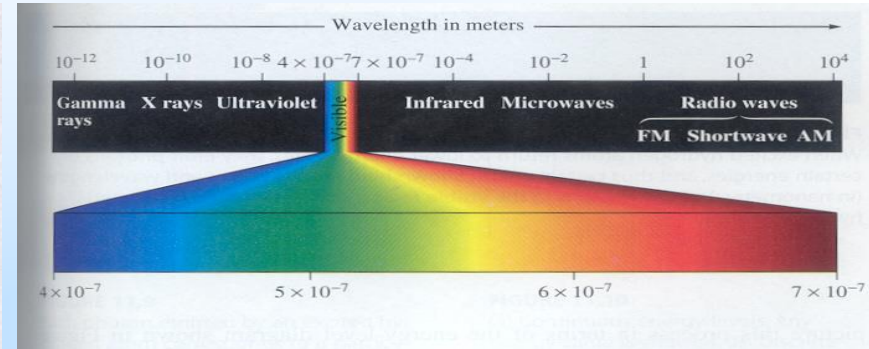
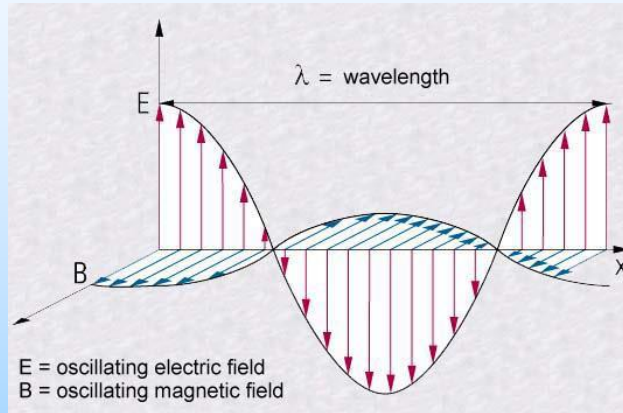


NOS SÉCULOS XIX & XX



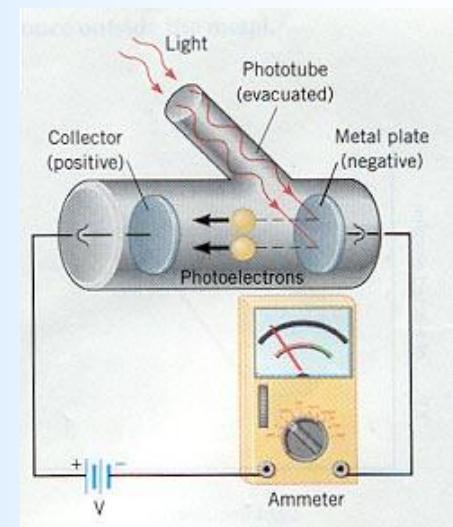
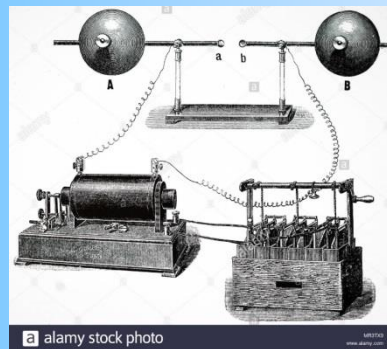
James Clerk Maxwell
(1831 - 1879)

1864 Maxwell deduziu as equações de ondas eletromagnéticas:

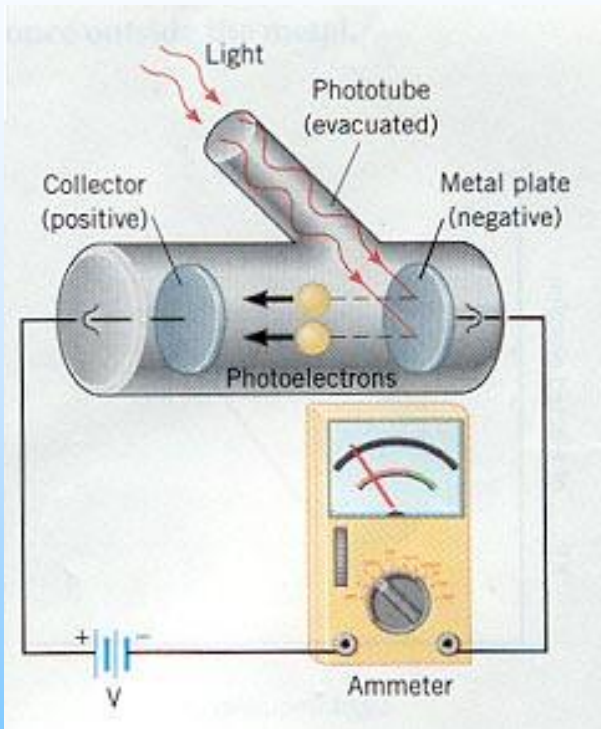


Heinrich R. Hertz
(1857 - 1894)

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



NOS SÉCULOS XIX & XX

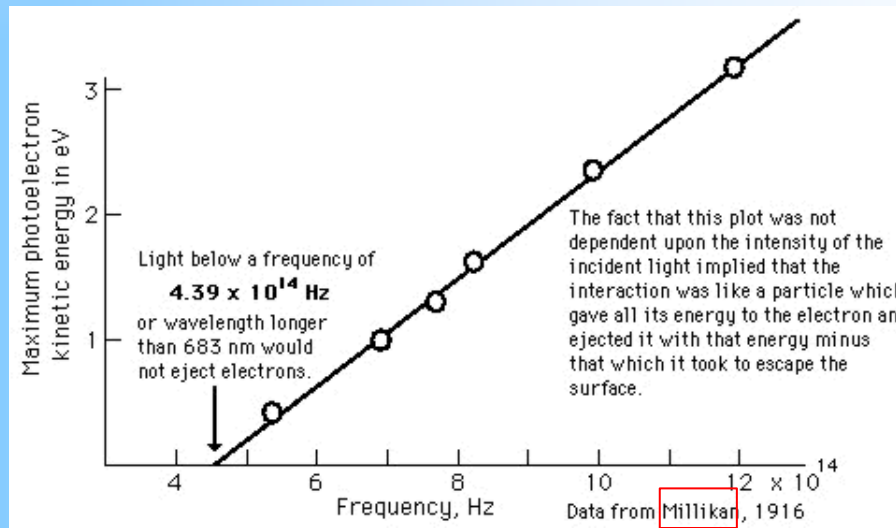


1897++ Lenard estuda sistematicamente o efeito fotoelétrico:

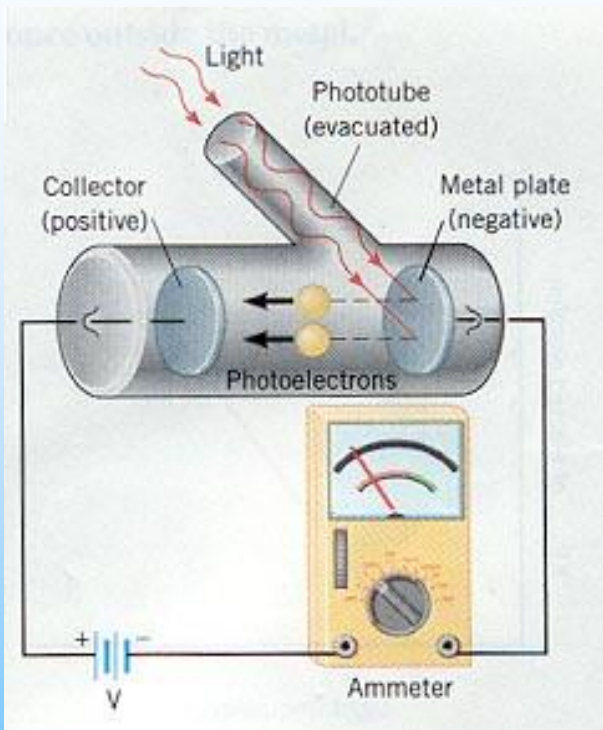
- A emissão ocorre a alto vácuo, portanto, os portadores de carga não são íons gasosos;
- A ação de um campo magnético confirma a carga negativa dos portadores;
- Existe um limiar de frequência para o efeito ocorrer, ou **frequência de corte**, em $\sim 10^{14}$ Hz.



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



NOS SÉCULOS XIX & XX



1897++ Lenard estuda sistematicamente o efeito fotoelétrico:

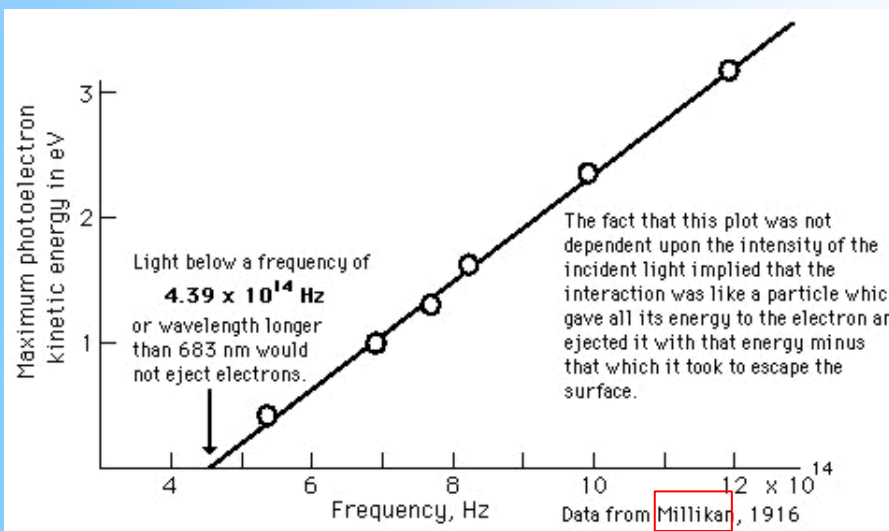
- A emissão ocorre a alto vácuo, portanto, os portadores de carga não são íons gasosos;
- A ação de um campo magnético confirma a carga negativa dos portadores;
- Existe um limiar de frequência para o efeito ocorrer, ou **frequência de corte**, em $\sim 10^{14}$ Hz.



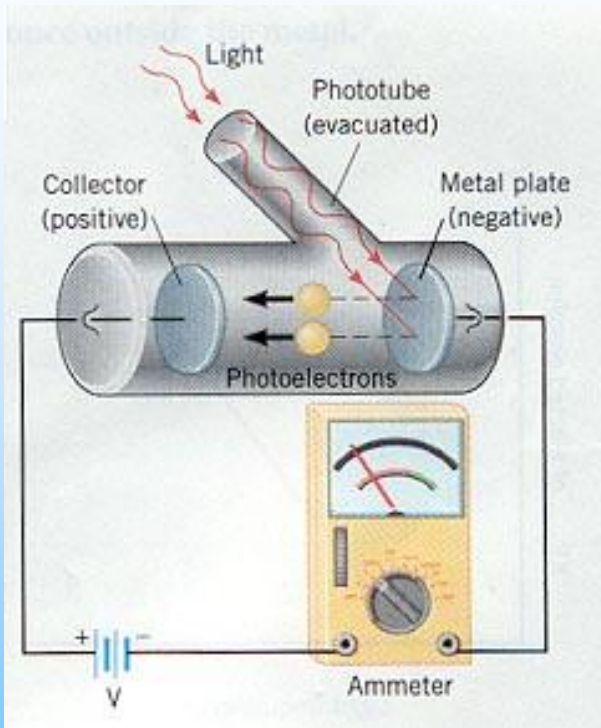
Philipp E. A. von Lenard (1862-1947)



1905



NOS SÉCULOS XIX & XX



1897++ Lenard estuda sistematicamente o efeito fotoelétrico:

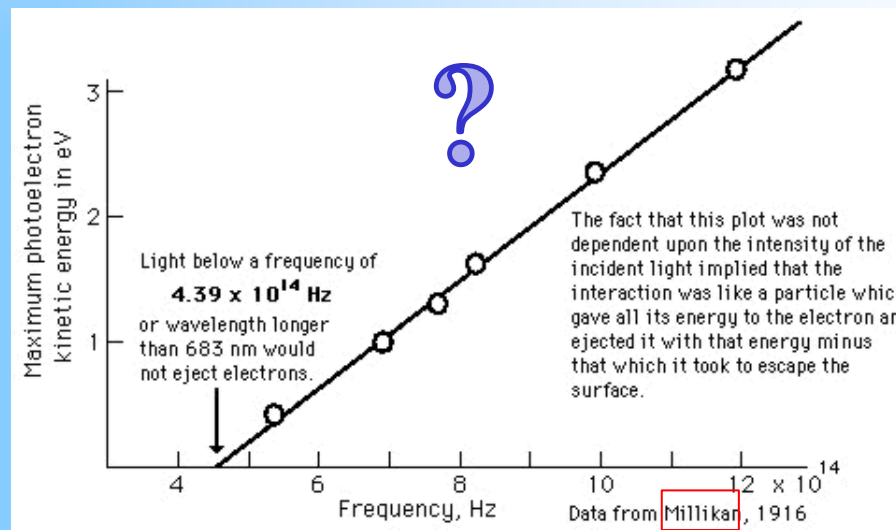
- A emissão ocorre a alto vácuo, portanto, os portadores de carga não são íons gasosos;
- A ação de um campo magnético confirma a carga negativa dos portadores;
- Existe um limiar de frequência para o efeito ocorrer, ou **frequência de corte**, em $\sim 10^{14}$ Hz.



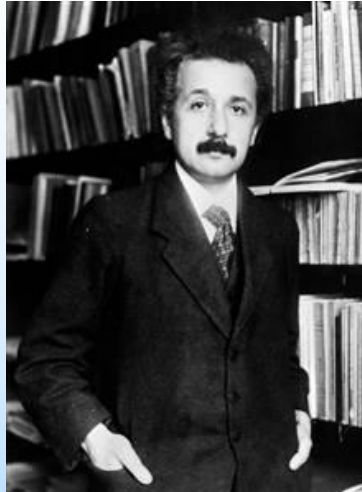
Philipp E. A. von Lenard (1862-1947)



1905

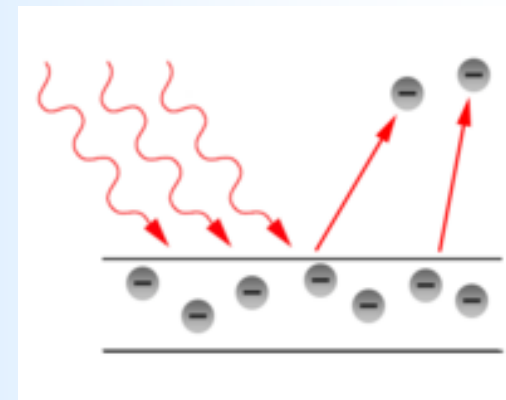


NO SÉCULO XX



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.



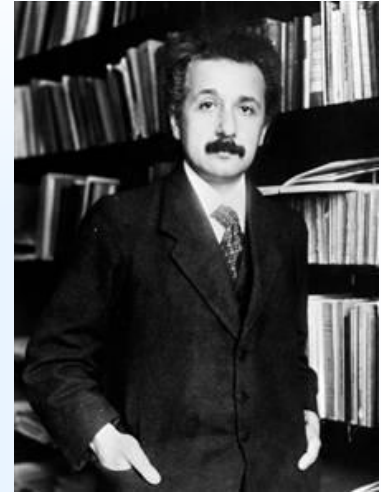
NO SÉCULO XX

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.

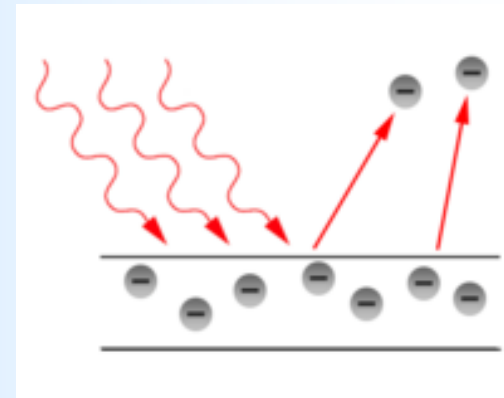
O fóton tem energia:

$$E = hf,$$

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



Albert Einstein
(1879-1955)



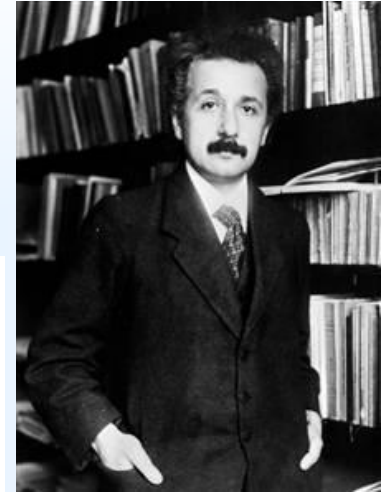
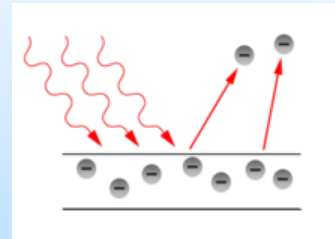
NO SÉCULO XX

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.

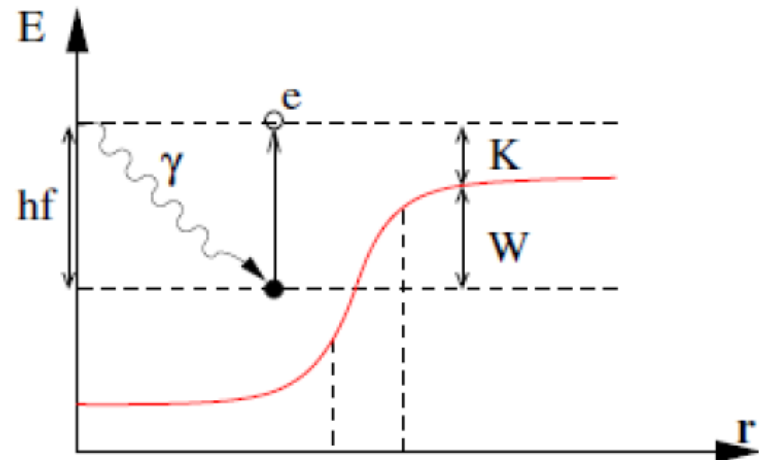


Albert Einstein
(1879-1955)

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**.



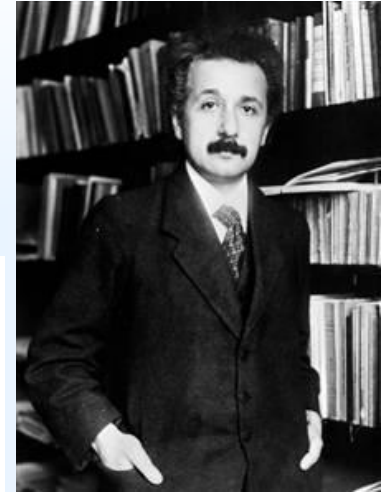
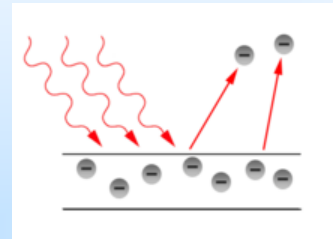
NO SÉCULO XX

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.



Albert Einstein
(1879-1955)

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):

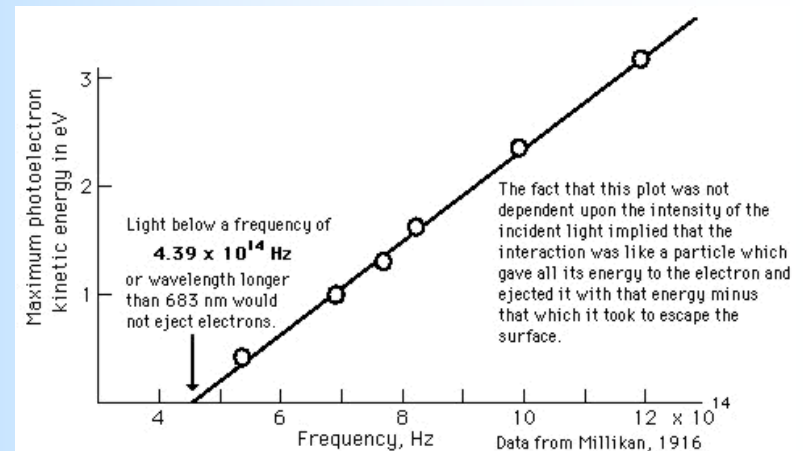
$$E = hf = K + W \Rightarrow K_{max} = hf - W_0,$$

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**.



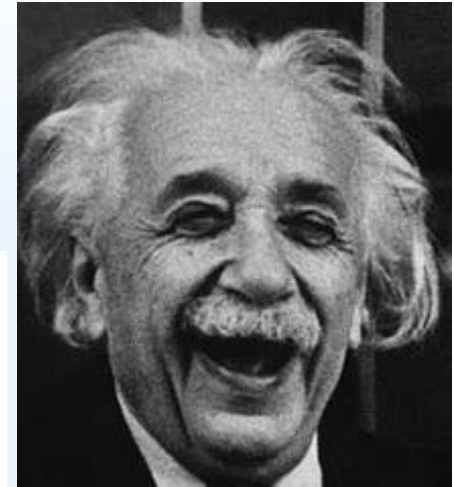
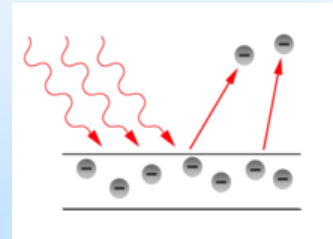
NO SÉCULO XX

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.



Albert Einstein
(1879-1955)



1921

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):

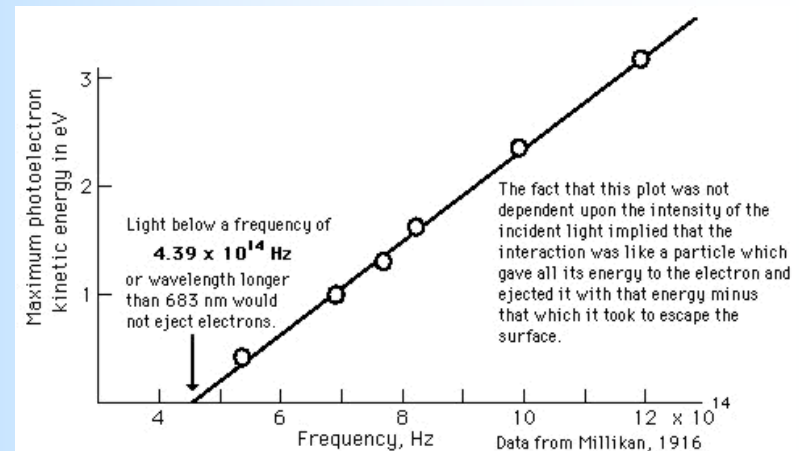
$$E = hf = K + W \Rightarrow K_{max} = hf - W_0,$$

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**.



NO SÉCULO XX



Niels Bohr
(1885 - 1955)



1922

1913 Niels Bohr propõe um modelo de quantização das energias atômicas, através de 3 postulados:

1. Os elétrons não irradiam enquanto orbitam o núcleo (**as órbitas são estacionárias**);
2. Os átomos irradiam (ou absorvem) somente se os elétrons mudarem de um estado estacionário para outro, tal que:

$$\Delta E = hf$$

$\Delta E > 0$ na absorção

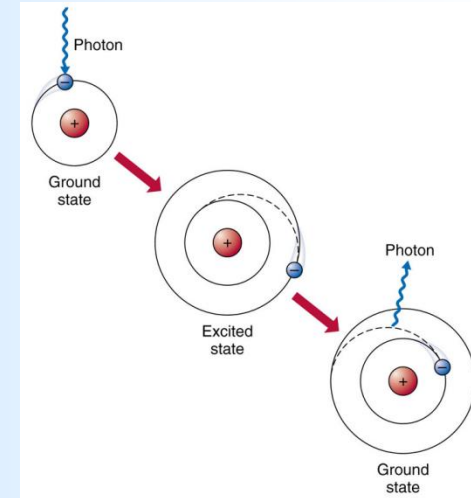
$\Delta E < 0$ na emissão

3. O **momento angular** é quantizado:

$$L_n = n\hbar = n \left(\frac{h}{2\pi} \right), \text{ onde } n = 1, 2, 3, \dots$$

e $L_n = mvr_n$ é o momento angular.

Bohr deduziu teoricamente as séries de Lyman, Balmer, etc e calculou a constante de Rydberg.



Previsões do modelo de Bohr

Seja um elétron numa órbita circular, sujeito a atração do núcleo, do 3º postulado obtemos os raios das órbitas de Bohr:

$$L_n = n\hbar \Rightarrow r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{mkZe^2}, \text{ onde } n = 1, 2, 3, \dots$$

com o primeiro nível ($n=1$) para o átomo de hidrogênio ($Z=1$):

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{mke^2} \equiv a_0 = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m é o primeiro raio de Bohr.}$$

E do 2º postulado obtemos a fórmula de Rydberg-Ritz:

$$f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{mk^2 Z^2 e^4}{4\pi \hbar^3} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) = \frac{c}{\lambda} = cR_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

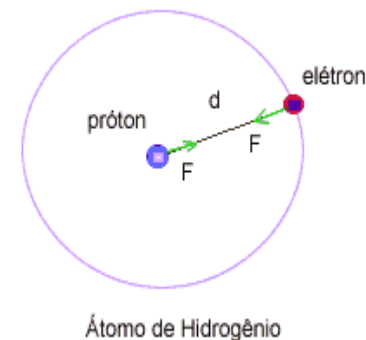
e a constante de Rydberg: $R_H = \frac{mk^2 e^4}{4\pi c \hbar^3}$

Vimos que a energia do elétron é:

$$E_n = -\frac{kZe^2}{2r_n} = -\frac{kZe^2}{2} \frac{mkZe^2}{n^2 \hbar^2} = -\frac{mk^2 Z^2 e^4}{2\hbar^2 n^2} \equiv -\frac{Z^2 E_0}{n^2} \Rightarrow E_n = -\frac{Z^2 E_0}{n^2}$$

que são os **níveis de energia de Bohr**, onde:

$$E_0 = \frac{mk^2 e^4}{2\hbar^2} = 2,169 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 13,6 \text{ eV.}$$



Previsões do modelo de Bohr

1. Os elétrons orbitam órbitas estacionárias;
2. Os átomos irradiam (ou absorvem) somente se os elétrons mudarem de um estado estacionário para outro, tal que: $\Delta E = hf$;
3. O momento angular é quantizado: $L_n = n\hbar$, onde $n = 1, 2, 3, \dots$

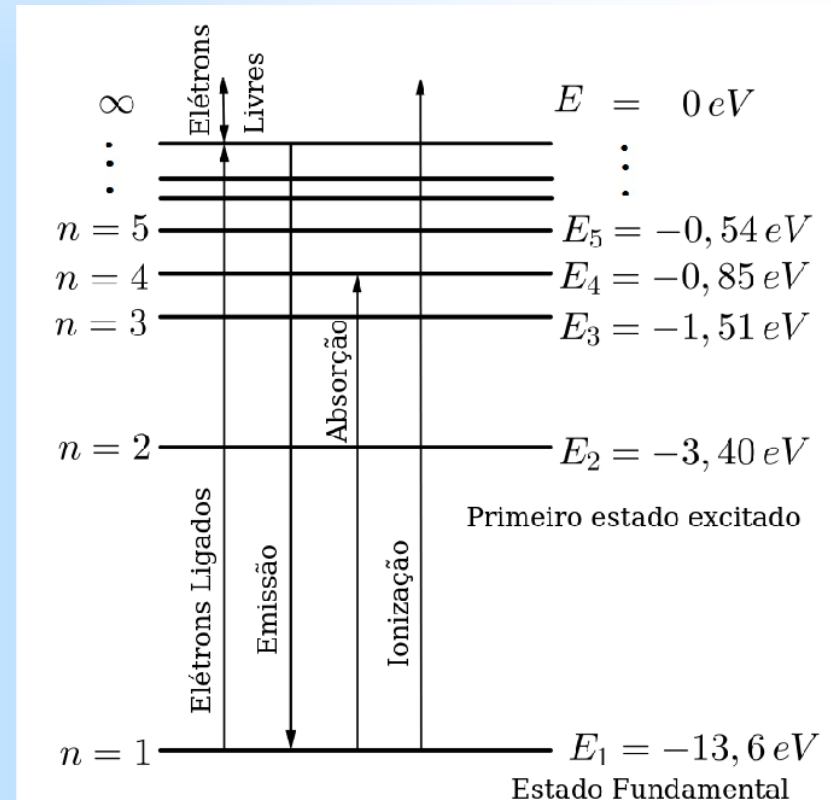
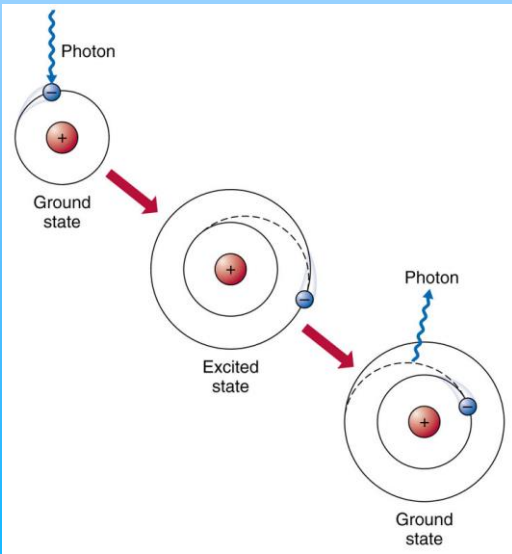
$$\Rightarrow r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{mkZe^2}, \text{ onde } n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{mk^2 Z^2 e^4}{4\pi c \hbar^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\Rightarrow E_n = -\frac{Z^2 E_0}{n^2}, \text{ onde: } E_0 = 13,6 \text{ eV}$$



Niels Bohr
(1885 - 1955)



Previsões do modelo de Bohr

1. Os elétrons orbitam órbitas estacionárias;
2. Os átomos irradiam (ou absorvem) somente se os elétrons mudarem de um estado estacionário para outro, tal que: $\Delta E = hf$;
3. O momento angular é quantizado: $L_n = n\hbar$, onde $n = 1, 2, 3, \dots$

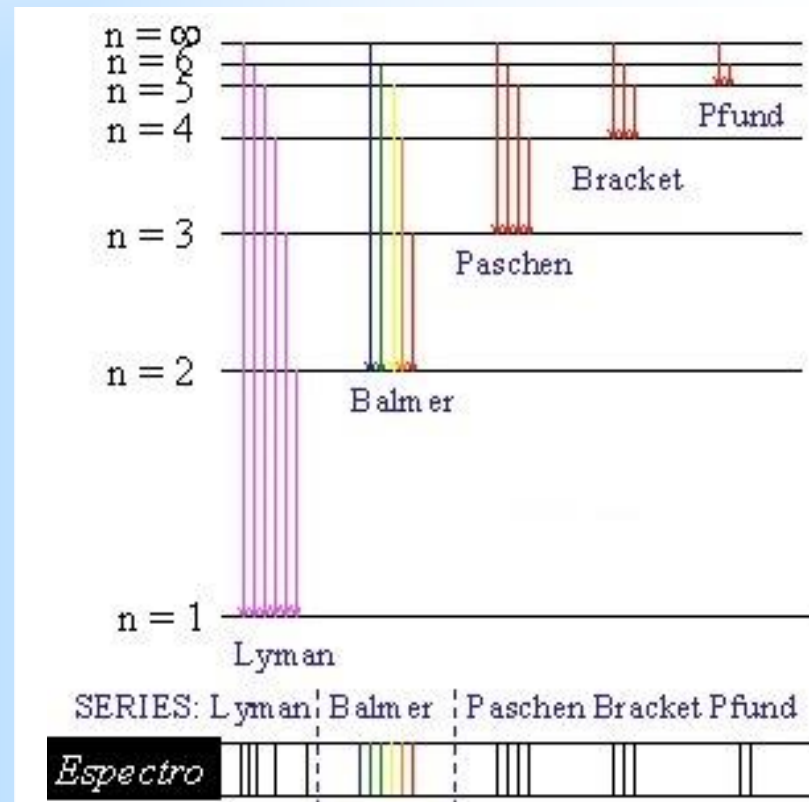
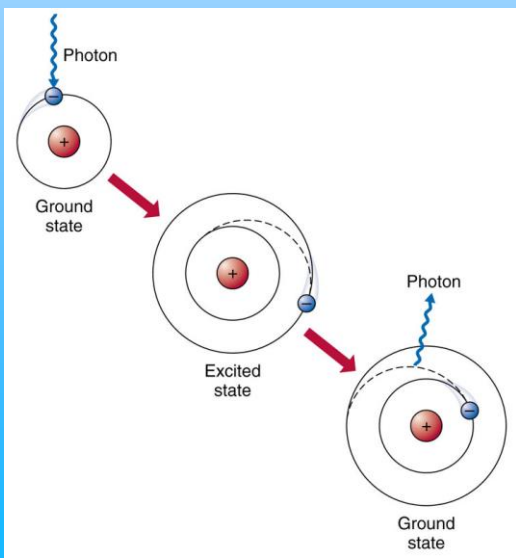
$$\Rightarrow r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{mkZe^2}, \text{ onde } n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{mk^2 Z^2 e^4}{4\pi c \hbar^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\Rightarrow E_n = -\frac{Z^2 E_0}{n^2}, \text{ onde: } E_0 = 13,6 \text{ eV}$$



Niels Bohr
(1885 - 1955)



NO SÉCULO XX



James Franck

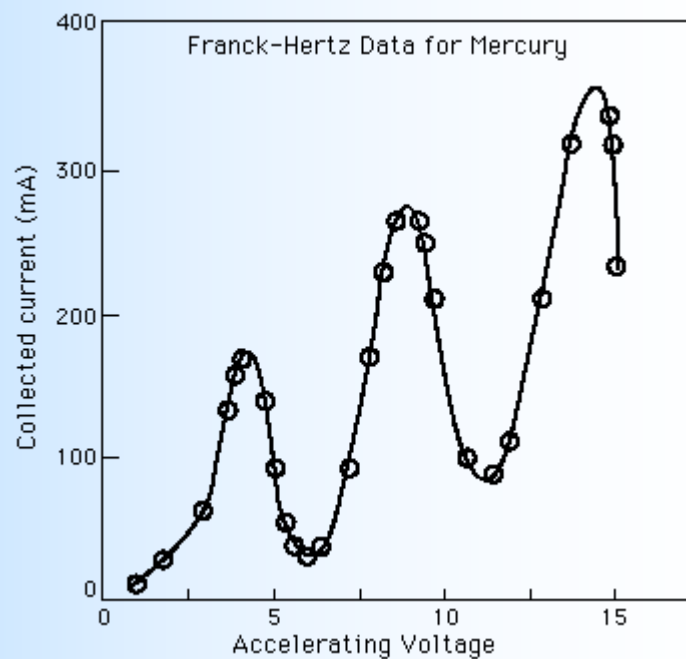
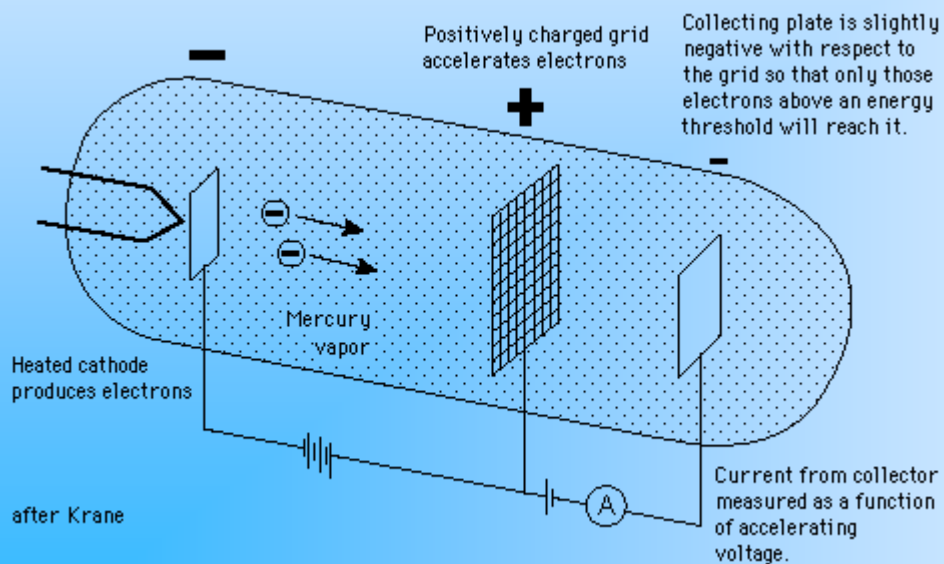


Gustav Hertz

1914 James Franck e Gustav Hertz comprovam experimentalmente o modelo de Bohr:



1925





Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\lambda = h/p,$$

onde h é a constante de Planck e $p=mv$ é o momento linear.



Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\lambda = h/p,$$

onde h é a constante de Planck e $p=mv$ é o momento linear.

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^8} = 2,43 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 2,43 \text{ \AA} \quad \sim \text{raio X}$$

b) um próton a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^8} = 1,32 \cdot 10^{-13} \text{ m} = 132 \text{ fm} \quad \sim \text{raio } \gamma$$

c) uma bola de gude de 5 g viajando a 1 m/s

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1} = 1,33 \cdot 10^{-31} \text{ m} \quad \text{muito pequeno para ser detectado}$$

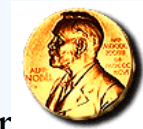


Louis de Broglie
(1892 - 1987)

1924 Louis de Broglie propõe que o elétron se comporta como onda:

$$\lambda = h/p,$$

onde h é a constante de Planck e $p=mv$ é o momento linear.



1929

Ex.1) Calcule o comprimento de onda de de Broglie para:

a) um elétron a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^8} = 2,43 \cdot 10^{-10} \text{m} = 2,43 \text{Å} \quad \sim \text{raio X}$$

b) um próton a 1/100 da velocidade da luz

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^8} = 1,32 \cdot 10^{-13} \text{m} = 132 \text{ fm} \quad \sim \text{raio } \gamma$$

c) uma bola de gude de 5 g viajando a 1 m/s

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1} = 1,33 \cdot 10^{-31} \text{m} \quad \text{muito pequeno para ser detectado}$$

Dualidade onda-partícula

Interpretação para o 3º postulado de Bohr:

$$L = n\hbar \Rightarrow nh = 2\pi l = 2\pi r p ,$$

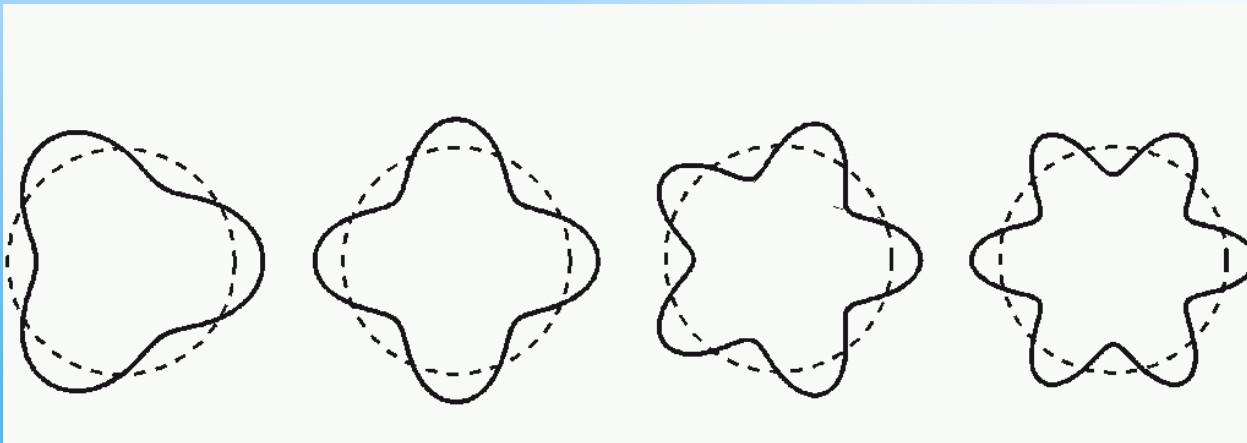
onde substituímos o momento angular de uma órbita circular: $L = r p$.

$$\text{Então : } 2\pi r p = nh \Rightarrow 2\pi r = \frac{nh}{p}$$

que, usando a relação de de Broglie: $\lambda = \frac{h}{p}$, vem:

$$2\pi r = n\lambda$$

que significa que a circunferência da órbita deve ser tal que contenha números inteiros do comprimento de onda das ondas estacionárias:



Ondas estacionárias em um círculo para $n = 3,4,5,6$

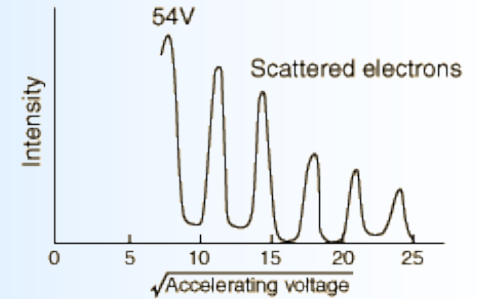
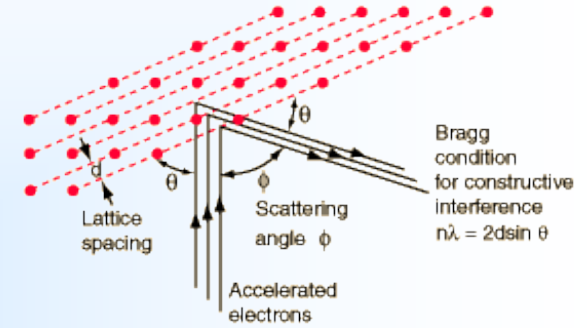
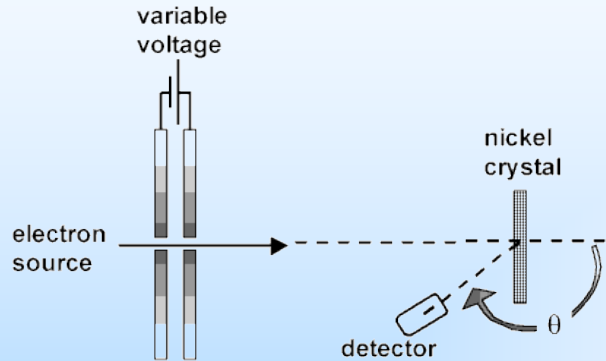
NO SÉCULO XX

Dualidade onda-partícula



C. Davisson (1881 - 1958)
L. H. Germer (1896 - 1971)

1927 Davisson e Germer observam a interferência de elétrons.



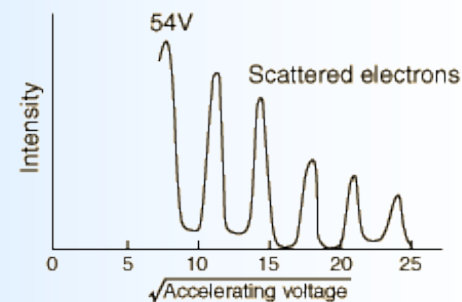
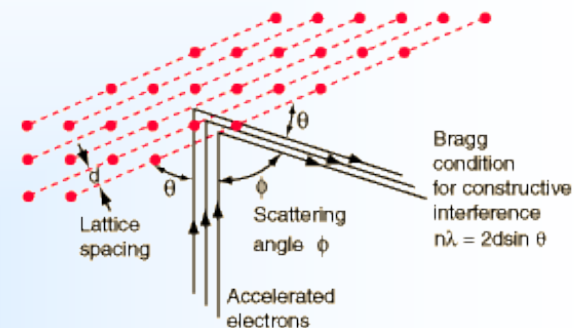
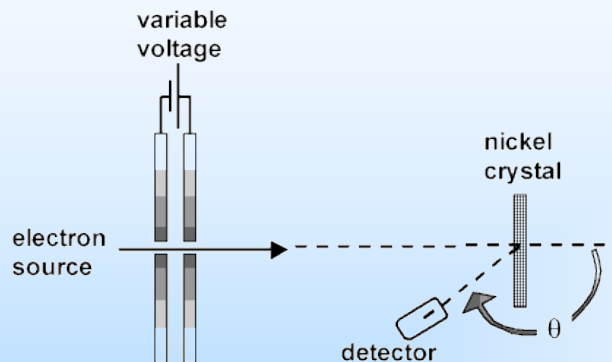
NO SÉCULO XX

Dualidade onda-partícula



C. Davisson (1881 - 1958)
L. H. Germer (1896 - 1971)

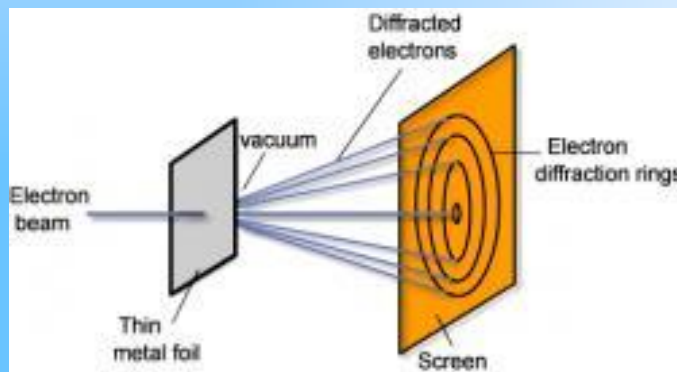
1927 Davisson e Germer observam a interferência de elétrons.



1927 G.P. Thomson observa a difração de elétrons.



G. P. Thomson
(1892 - 1975)



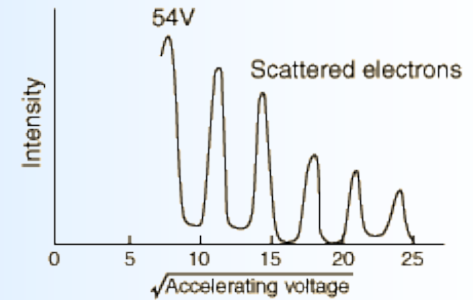
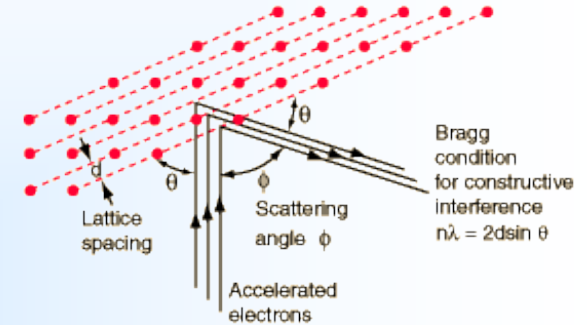
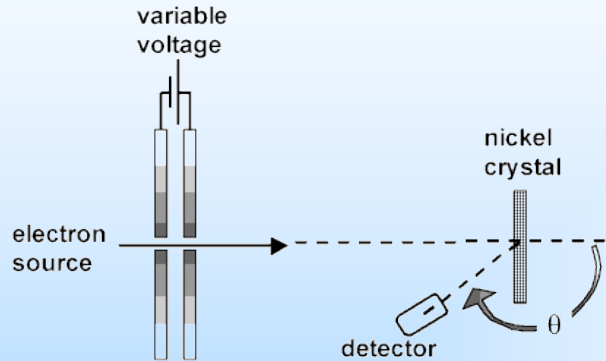
NO SÉCULO XX

Dualidade onda-partícula



C. Davisson (1881 - 1958)
L. H. Germer (1896 - 1971)

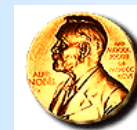
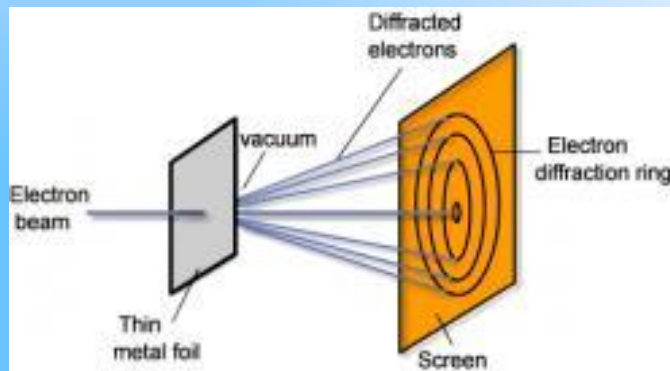
1927 Davisson e Germer observam a interferência de elétrons.



1927 G.P. Thomson observa a difração de elétrons.



G. P. Thomson
(1892 - 1975)



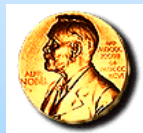
1937 Davisson & Thomson

NO SÉCULO XX

Princípio da indeterminação



Werner Heisenberg
(1901 - 1976)



1932

1927 Heisenberg formula o princípio da incerteza.

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

melhor precisão da posição:

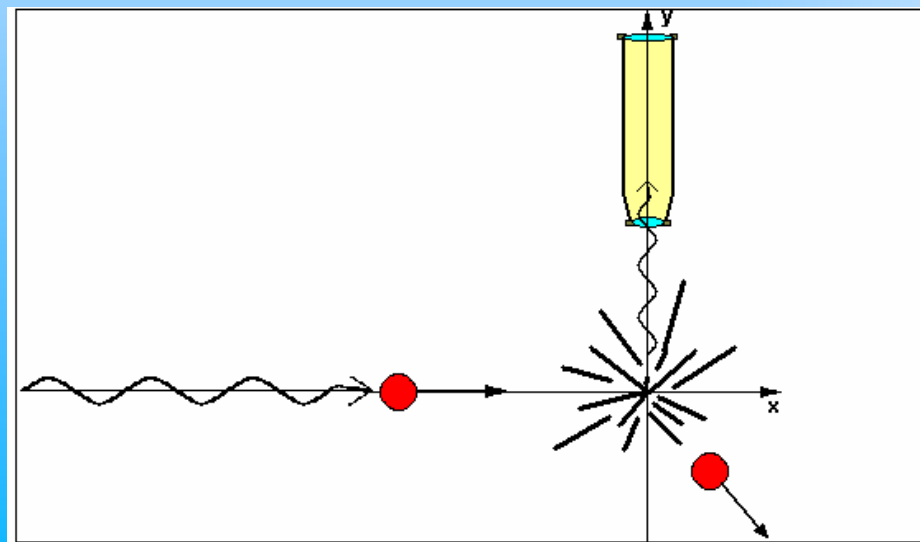
$$\Delta x \sim \lambda$$

o fóton fornece ao elétron o recuo (momento):

$$\Delta p \sim \frac{h}{\lambda}$$

tal que:

$$\Delta p \cdot \Delta x \sim h$$





Max Born
(1882 - 1970)

1924 Max Born formula a **interpretação probabilística** da mecânica quântica, através da **função de onda ψ**



Max Born
(1882 - 1970)

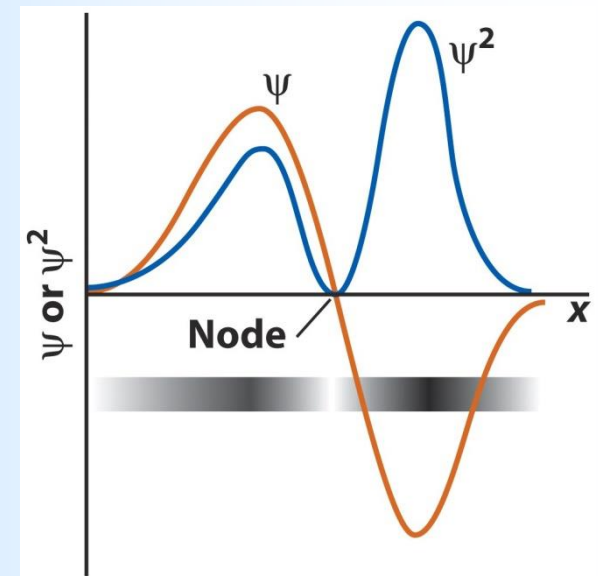
1924 Max Born formula a **interpretação probabilística** da mecânica quântica, através da **função de onda ψ**

A função de onda ψ contém toda a informação sobre a partícula:

→ $\psi(x)$ é uma função complexa da posição: $\psi(x, t) = Ae^{-i(kx - \omega t)}$

→ $\psi(x)$ é contínua e finita em todo o espaço;

→ $|\psi(x)|^2 = \psi^*(x)\psi(x) \propto$ probabilidade de encontrar a partícula em x :



NO SÉCULO XX

A Função de Onda



Max Born
(1882 - 1970)

1924 Max Born formula a **interpretação probabilística** da mecânica quântica, através da **função de onda ψ**

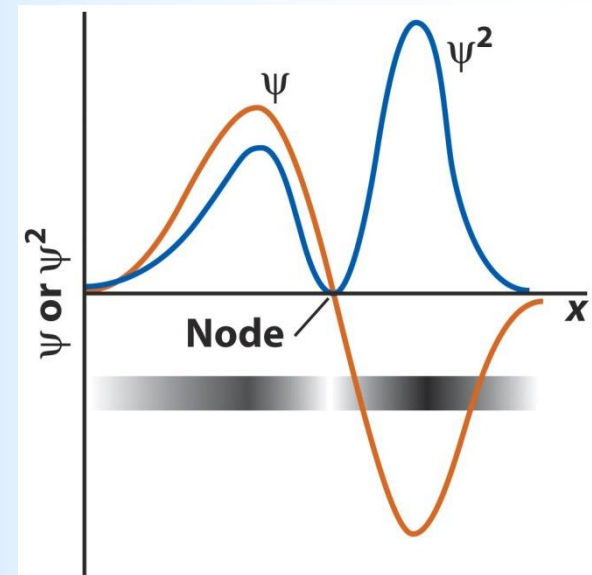


A função de onda ψ contém toda a informação sobre a partícula:

→ $\psi(x)$ é uma função complexa da posição: $\psi(x, t) = Ae^{-i(kx - \omega t)}$

→ $\psi(x)$ é contínua e finita em todo o espaço;

→ $|\psi(x)|^2 = \psi^*(x)\psi(x) \propto$ probabilidade de encontrar a partícula em x :



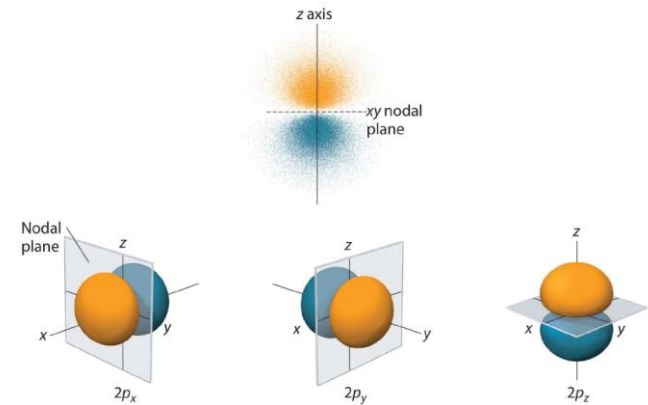
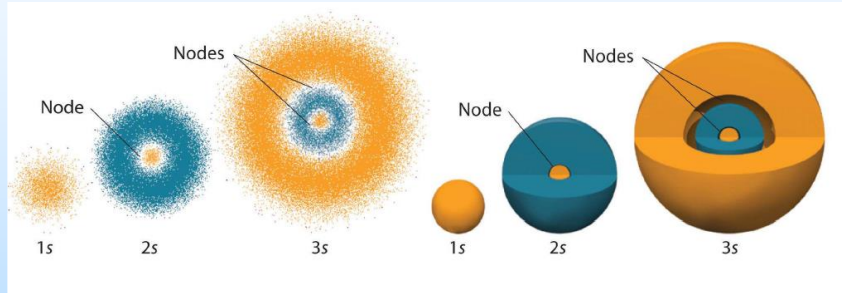
NO SÉCULO XX

A Função de Onda



Max Born
(1882 - 1970)

1924 Max Born formula a **interpretação probabilística** da mecânica quântica, através da **função de onda ψ**

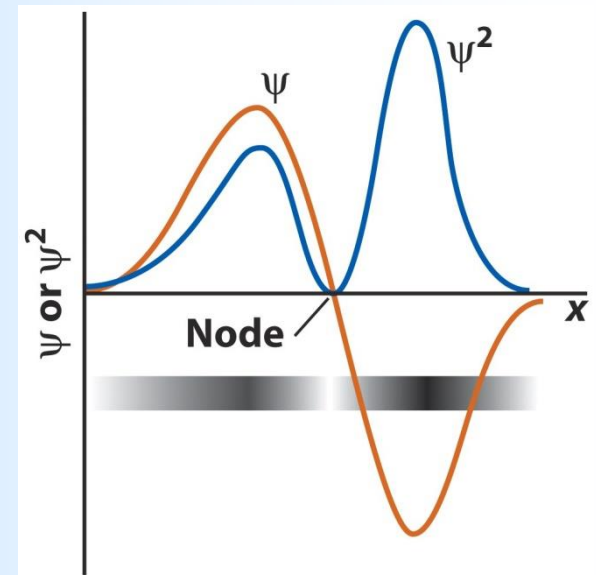


A função de onda ψ contém toda a informação sobre a partícula:

→ $\psi(x)$ é uma função complexa da posição: $\psi(x, t) = Ae^{-i(kx - \omega t)}$

→ $\psi(x)$ é contínua e finita em todo o espaço;

→ $|\psi(x)|^2 = \psi^*(x)\psi(x) \propto$ probabilidade de encontrar a partícula em x :



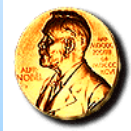
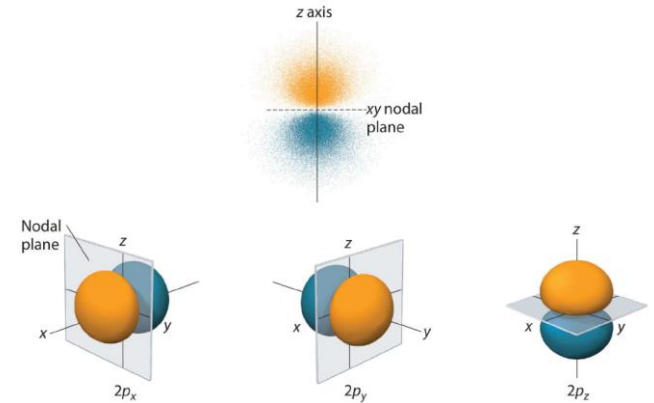
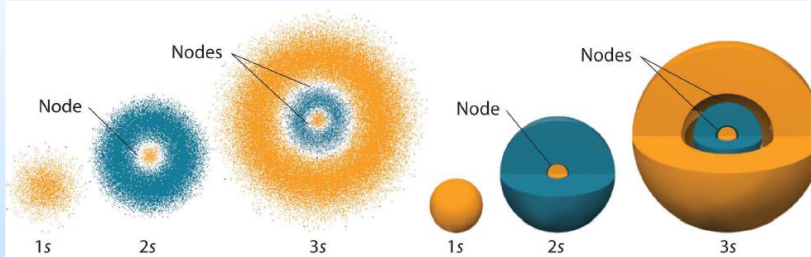
NO SÉCULO XX

A Função de Onda



Max Born
(1882 - 1970)

1924 Max Born formula a **interpretação probabilística** da mecânica quântica, através da **função de onda ψ**



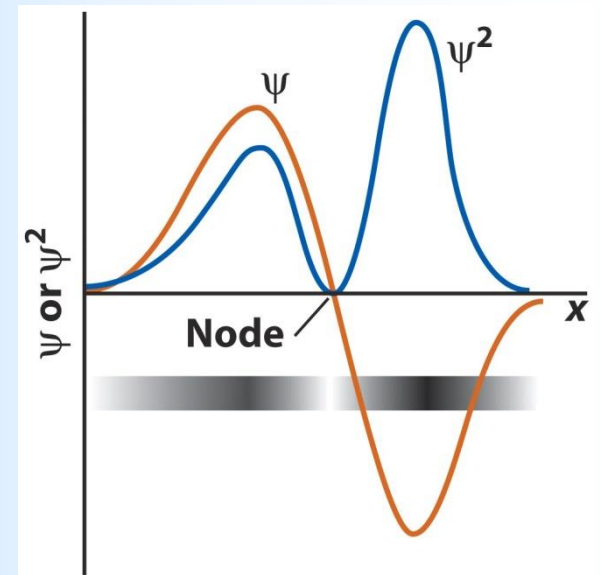
1954
Born & Bothe

A função de onda ψ contém toda a informação sobre a partícula:

→ $\psi(x)$ é uma função complexa da posição: $\psi(x, t) = Ae^{-i(kx - \omega t)}$

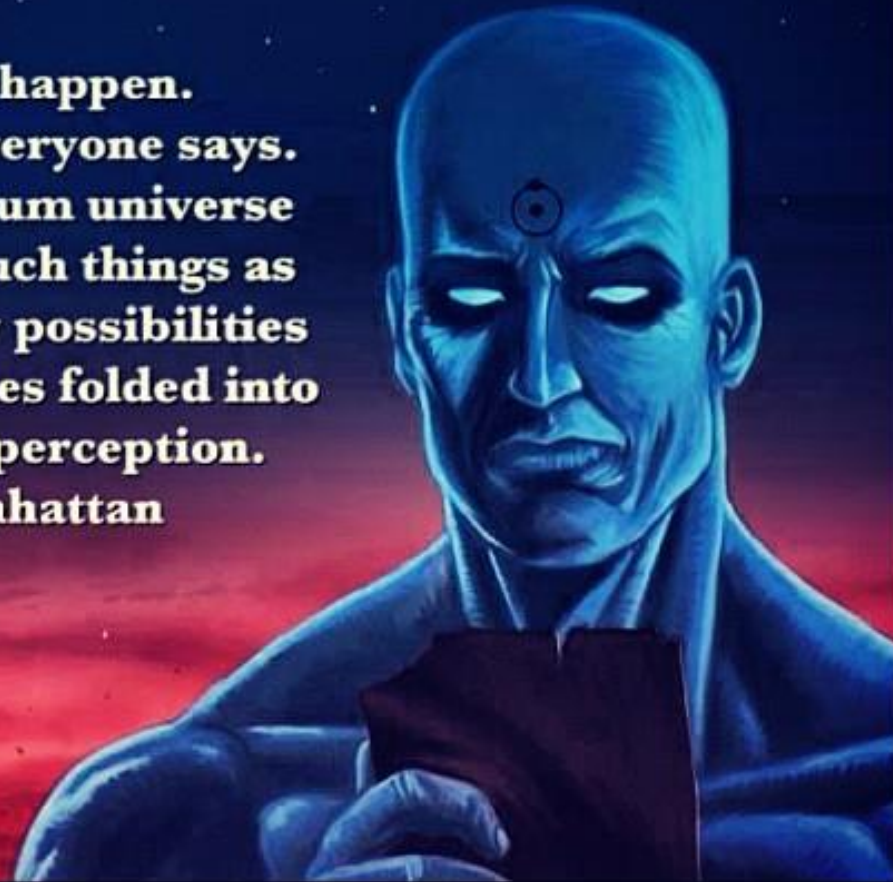
→ $\psi(x)$ é contínua e finita em todo o espaço;

→ $|\psi(x)|^2 = \psi^*(x)\psi(x) \propto$ probabilidade de encontrar a partícula em x :



**Accidents happen.
That's what everyone says.
But in a quantum universe
there are no such things as
accidents, only possibilities
and probabilities folded into
existence by perception.**

-Dr. Manhattan



NO SÉCULO XX

Como calcular ψ ?



1925 Werner Heisenberg desenvolve a mecânica (quântica) **matricial**

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$



1932

Werner Heisenberg
(1901 - 1976)

NO SÉCULO XX

Como calcular ψ ?



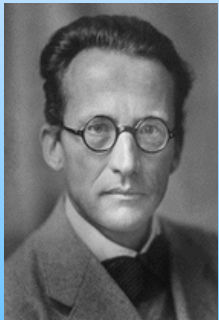
1925 Werner Heisenberg desenvolve a mecânica (quântica) **matricial**

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$



1932

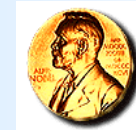
Werner Heisenberg
(1901 - 1976)



1926 Erwin Schrödinger desenvolve a mecânica (quântica) **ondulatória**, propondo sua equação de onda (Equação de Schrödinger)

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi}{dx^2} + V\Psi = E\Psi$$

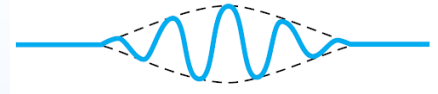
Erwin R. J. A.
Schrödinger
(1887 - 1961)



1933 Schrödinger
& Dirac

A equação de Schrödinger

Caso mais simples: partícula livre e independente do tempo.



Partindo da fórmula de de Broglie:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar k \Rightarrow p = \hbar k$$

Se a função de onda for: $\psi(x) = A \sin(kx) + B \cos(kx)$, vemos que:

$$\frac{d^2}{dx^2} \psi(x) = -k^2 \psi(x) \Rightarrow \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) = -\left(\frac{p}{\hbar}\right)^2 \psi(x)$$

Agora, para uma partícula livre:

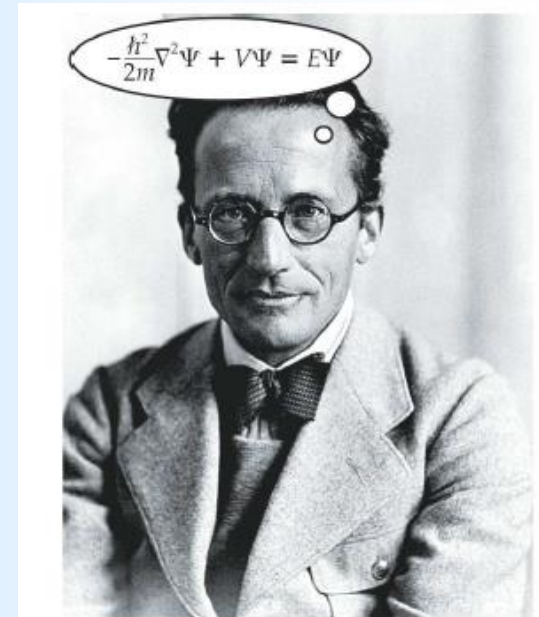
$$E = K + V(x) = \frac{p^2}{2m} + 0 \Rightarrow E = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow p^2 = 2mE$$

Assim:

$$\frac{d^2}{dx^2} \psi(x) = -\frac{2mE}{\hbar^2} \psi(x) \Rightarrow -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) = E\psi(x)$$

Somando-se o potencial “nulo”:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + V(x)\psi(x) = E\psi(x)$$

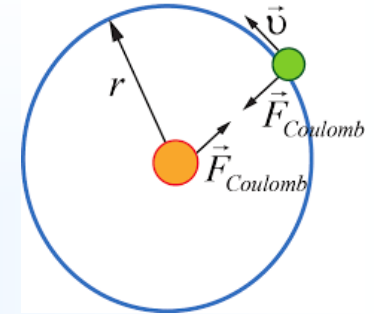


Erwin Schrödinger

O átomo de hidrogênio

A solução da equação de Schrödinger em coordenadas esféricas:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\psi) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} \right) - \frac{ke^2}{r^2} \psi = E\psi$$



é bem complicada e não veremos em nossa disciplina, mas vamos indicar alguns passos.

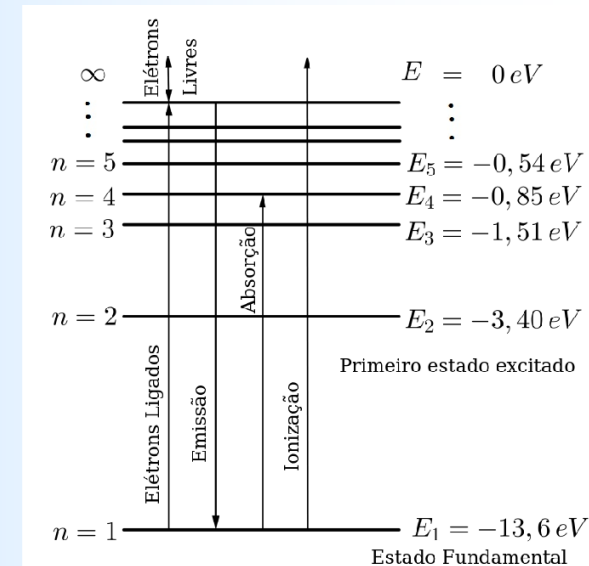
Primeiramente, supõe-se que a função de onda pode ser fatorada numa função puramente **radial**, $R(r)$, e numa função puramente **angular**, $Y(\theta, \varphi)$:

$$\psi(r, \theta, \varphi) = R(r) \cdot Y(\theta, \varphi)$$

Da solução radial vêm os níveis de energia:

$$E_n = -\frac{mk^2 Z^2 e^4}{2\hbar^2 n^2} \equiv -\frac{Z^2 E_0}{n^2} \Rightarrow E_n = -\frac{Z^2 E_0}{n^2},$$

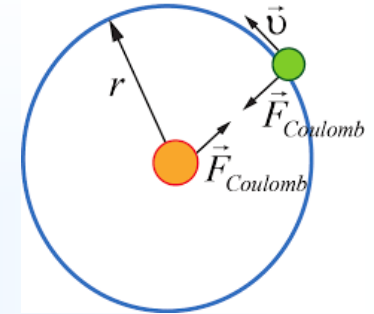
onde $n = 1, 2, 3, \dots$ é o **número quântico principal**.



O átomo de hidrogênio

A solução da equação de Schrödinger em coordenadas esféricas:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\psi) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} \right) - \frac{ke^2}{r^2} \psi = E\psi$$



é bem complicada e não veremos em nossa disciplina, mas vamos indicar alguns passos.

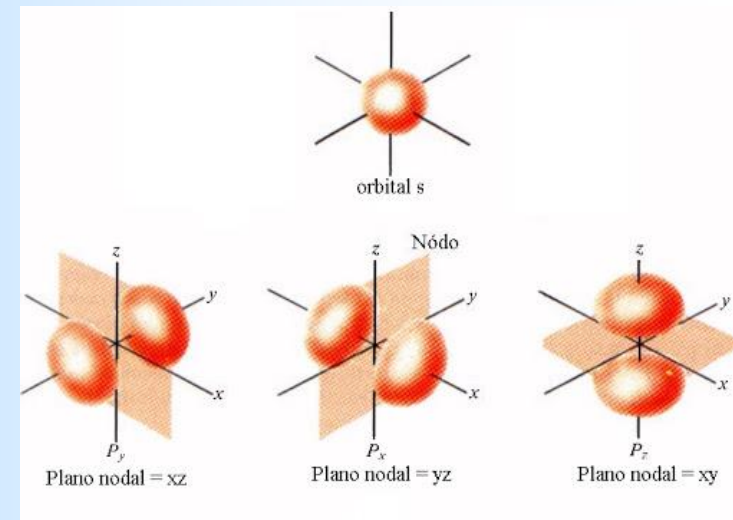
Primeiramente, supõe-se que a função de onda pode ser fatorada numa função puramente **radial**, $R(r)$, e numa função puramente **angular**, $Y(\theta, \varphi)$:

$$\psi(r, \theta, \varphi) = R(r) \cdot Y(\theta, \varphi)$$

Da solução angular vêm os orbitais (subcamadas):

- $l = 0$ para o orbital s (*sharp*);
- $l = 1$ para o orbital p (*principal*);
- $l = 2$ para o orbital d (*difuse*);
- $l = 3$ para o orbital f (*fundamental*);
- $l = 4$ para o orbital g ;
- $l = 5$ para o orbital h ;
- etc (em ordem alfabética)

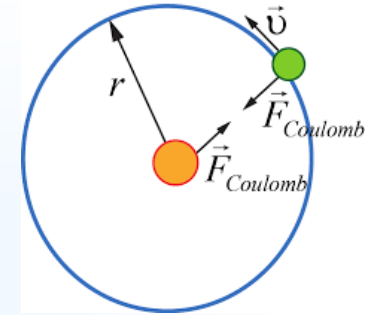
$l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ é o **número quântico orbital**.



O átomo de hidrogênio

A solução da equação de Schrödinger em coordenadas esféricas:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\psi) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} \right) - \frac{ke^2}{r^2} \psi = E\psi$$



é bem complicada e não veremos em nossa disciplina, mas vamos indicar alguns passos.

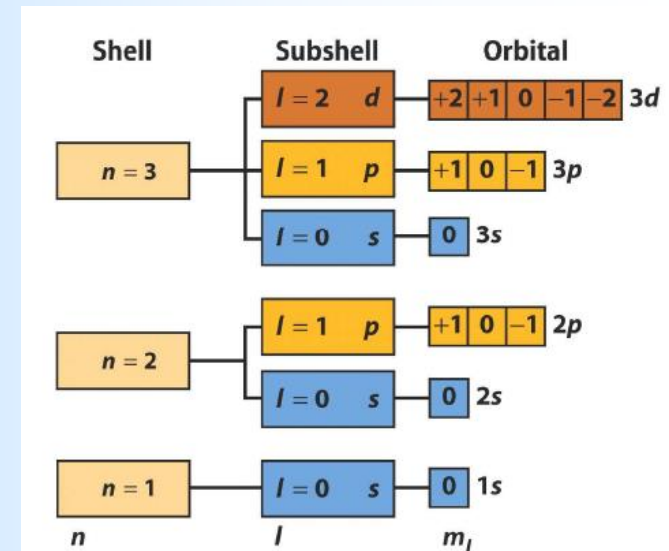
Primeiramente, supõe-se que a função de onda pode ser fatorada numa função puramente **radial**, $R(r)$, e numa função puramente **angular**, $Y(\theta, \varphi)$:

$$\psi(r, \theta, \varphi) = R(r) \cdot Y(\theta, \varphi)$$

Da solução angular vêm os orbitais:

- para $l = 0$: $m_l = 0$;
- para $l = 1$: $m_l = -1, 0, 1$;
- para $l = 2$: $m_l = -2, -1, 0, 1, 2$;
- para $l = 3$: $m_l = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$;
- etc.

m_l é o **número quântico magnético** e assume $2l + 1$ valores possíveis (números inteiros entre $-l$ e l).



O átomo de hidrogênio

Resumindo ... a solução da equação de Schrödinger para o átomo de hidrogênio (em coordenadas esféricas):

$$\psi_{nlm}(r, \theta, \varphi) = R_n(r) \cdot Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

Soluções para o átomo de Hidrogênio

n	l	m	Função	Orbital	
1	0	0	$\Psi_{1,0,0}$	1s	
2	0	0	$\Psi_{2,0,0}$	2s	
	1	-1	$\Psi_{2,1,-1}$	2p ($2p_x, 2p_y, 2p_z$)	
		0	$\Psi_{2,1,0}$		
+1		$\Psi_{2,1,1}$			
3	0	0	$\Psi_{3,0,0}$	3s	
	1	-1	$\Psi_{3,1,-1}$	3p ($3p_x, 3p_y, 3p_z$)	
		0	$\Psi_{3,1,0}$		
		+1	$\Psi_{3,1,1}$		
	2	2	-2	$\Psi_{3,2,-2}$	3d ($3d_{xy}, 3d_{yz}, 3d_{xz}, 3d_{x^2-y^2}$)
			-1	$\Psi_{3,2,-1}$	
0			$\Psi_{3,2,0}$		
+1			$\Psi_{3,2,1}$		
		+2	$\Psi_{3,2,2}$		

O átomo de hidrogênio

Resumindo ... a solução da equação de Schrödinger para o átomo de hidrogênio (em coordenadas esféricas):

$$\psi_{nlm}(r, \theta, \varphi) = R_n(r) \cdot Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

Orbitais Atômicos

TABLE 1.2 Hydrogen Wavefunctions (Atomic Orbitals), $\psi = RY$

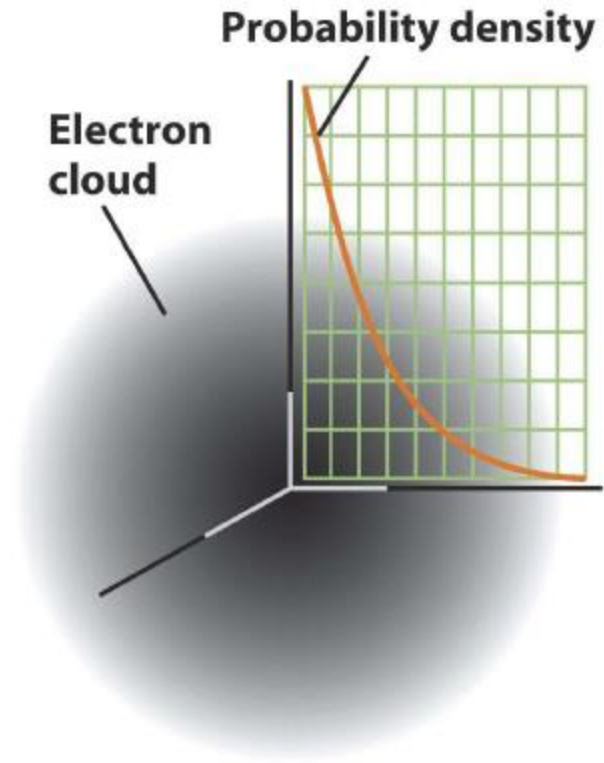
(a) Radial wavefunctions, $R_{nl}(r)$			(b) Angular wavefunctions, $Y_{lm}(\theta, \phi)$		
n	l	$R_{nl}(r)$	l	" m_l "**	$Y_{lm}(\theta, \phi)$
1	0	$2\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} e^{-Zr/a_0}$	0	0	$\left(\frac{1}{4\pi}\right)^{1/2}$
2	0	$\frac{1}{2\sqrt{2}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2}\left(2 - \frac{Zr}{a_0}\right)e^{-Zr/2a_0}$	1	x	$\left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/2} \sin \theta \cos \phi$
	1	$\frac{1}{2\sqrt{6}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2}\left(\frac{Zr}{a_0}\right)e^{-Zr/2a_0}$		y	$\left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/2} \sin \theta \sin \phi$
3	0	$\frac{1}{9\sqrt{3}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2}\left(3 - \frac{2Zr}{a_0} + \frac{2Z^2r^2}{9a_0^2}\right)e^{-Zr/3a_0}$		z	$\left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/2} \cos \theta$
	1	$\frac{2}{27\sqrt{6}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2}\left(2 - \frac{Zr}{3a_0}\right)e^{-Zr/3a_0}$	2	xy	$\left(\frac{15}{16\pi}\right)^{1/2} \sin^2 \theta \cos 2\phi$
	2	$\frac{4}{81\sqrt{30}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2}\left(\frac{Zr}{a_0}\right)^2 e^{-Zr/3a_0}$		yz	$\left(\frac{15}{4\pi}\right)^{1/2} \cos \theta \sin \theta \sin \phi$
zx				$\left(\frac{15}{4\pi}\right)^{1/2} \cos \theta \sin \theta \cos \phi$	
		$x^2 - y^2$		$\left(\frac{15}{16\pi}\right)^{1/2} \sin^2 \theta \sin 2\phi$	
			z^2	$\left(\frac{5}{16\pi}\right)^{1/2} (3 \cos^2 \theta - 1)$	

Note: In each case, $a_0 = 4\pi\epsilon_0^2/m_e e^2$, or close to 52.9 pm; for hydrogen itself, $Z = 1$.

**In all cases except $m_l = 0$, the orbitals are sums and differences of orbitals with specific values of m_l .

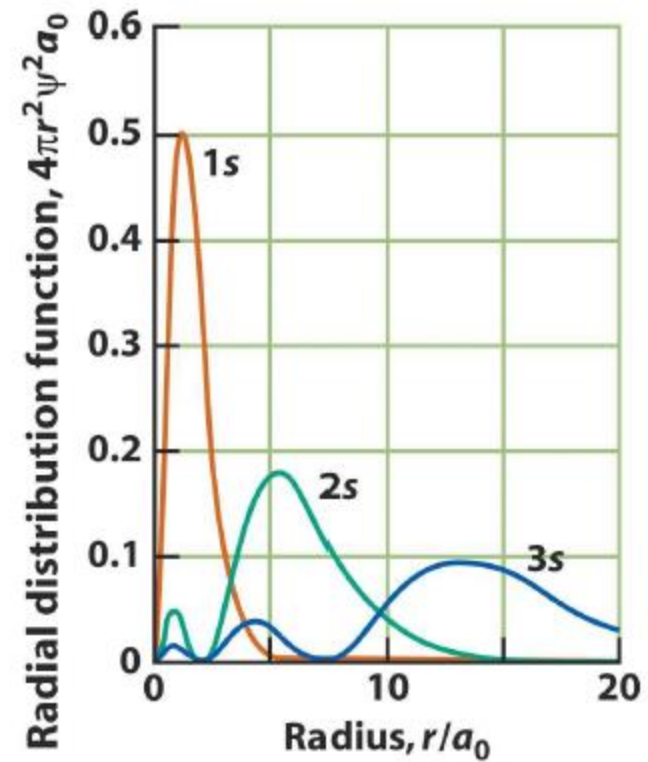
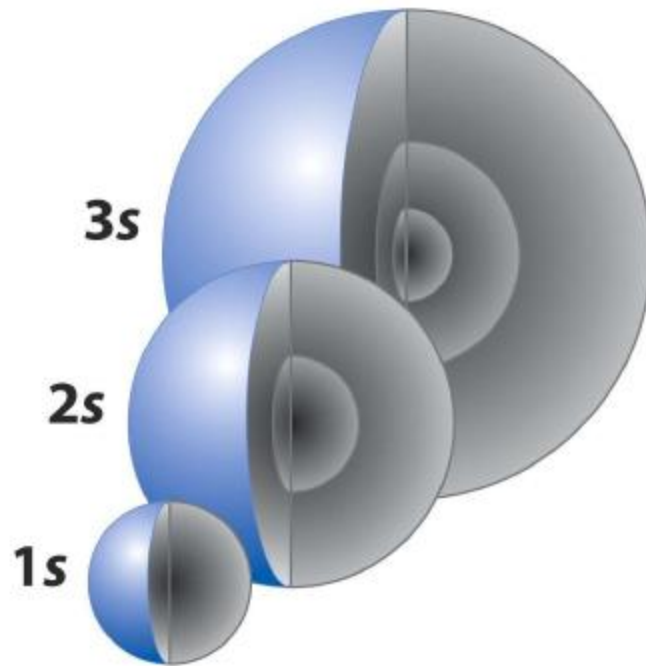
O átomo de hidrogênio

Densidade de Probabilidade de se Encontrar o Elétron



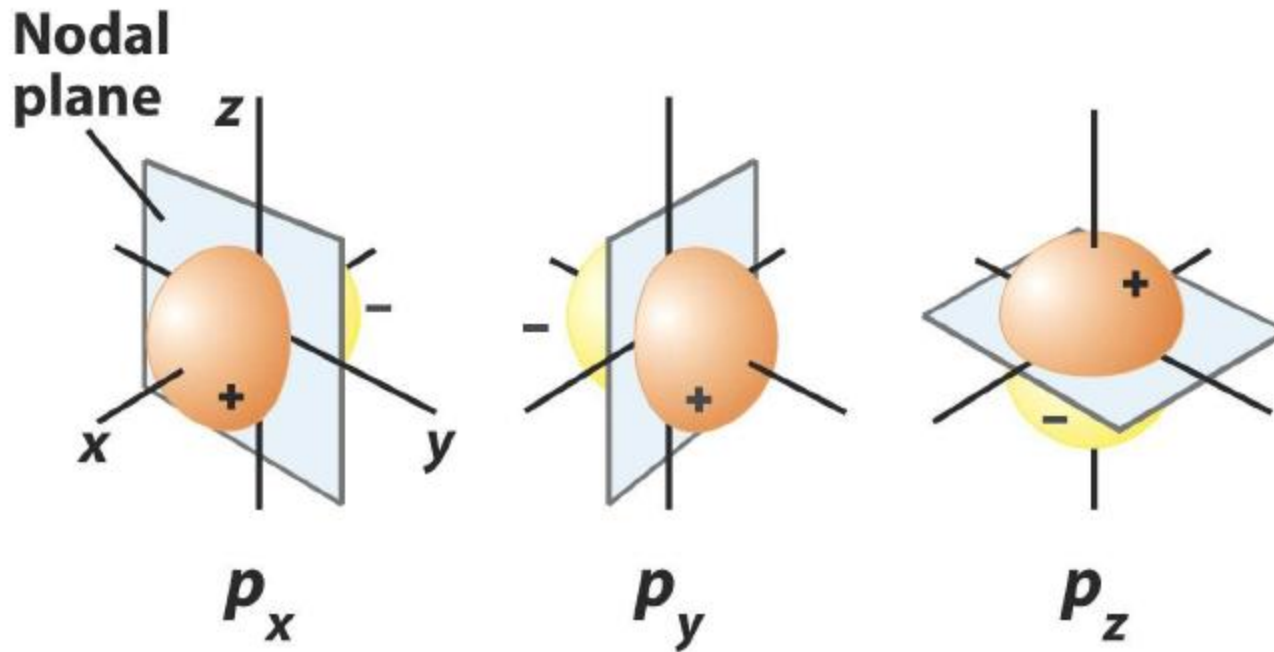
O átomo de hidrogênio

Orbitais s



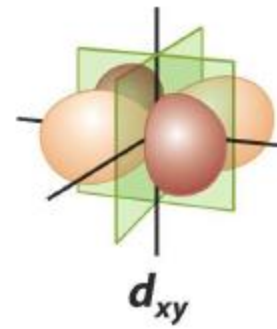
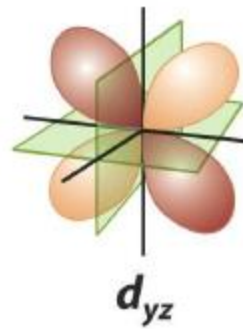
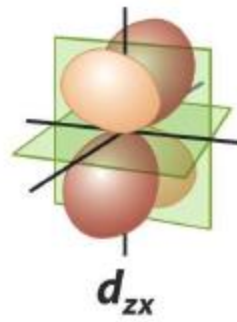
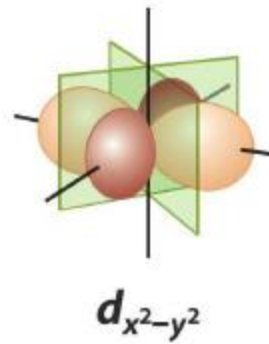
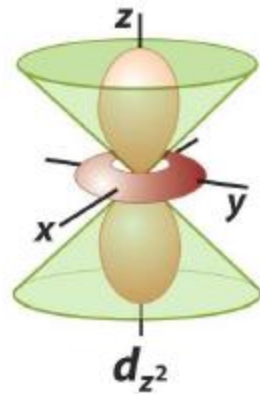
O átomo de hidrogênio

Orbitais p



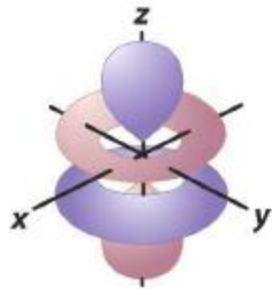
O átomo de hidrogênio

Orbitais d

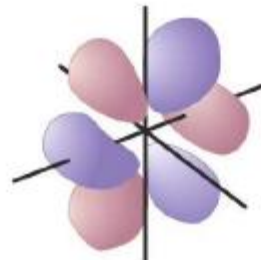


O átomo de hidrogênio

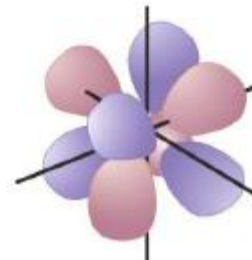
Orbitais f



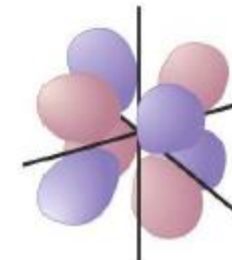
$$5z^3 - 3zr^2$$



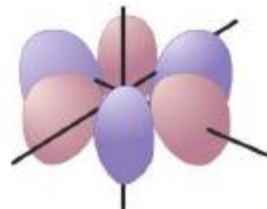
$$5xz^2 - xr^2$$



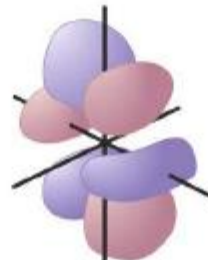
$$zx^2 - zy^2$$



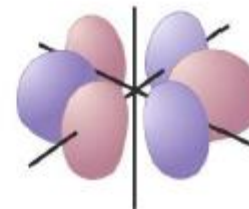
$$xyz$$



$$y^3 - 3yx^2$$



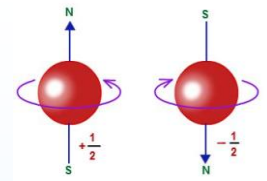
$$5yz^2 - yr^2$$



$$x^3 - 3xy^2$$

NO SÉCULO XX

O spin



Otto Stern
(1888 - 1969)

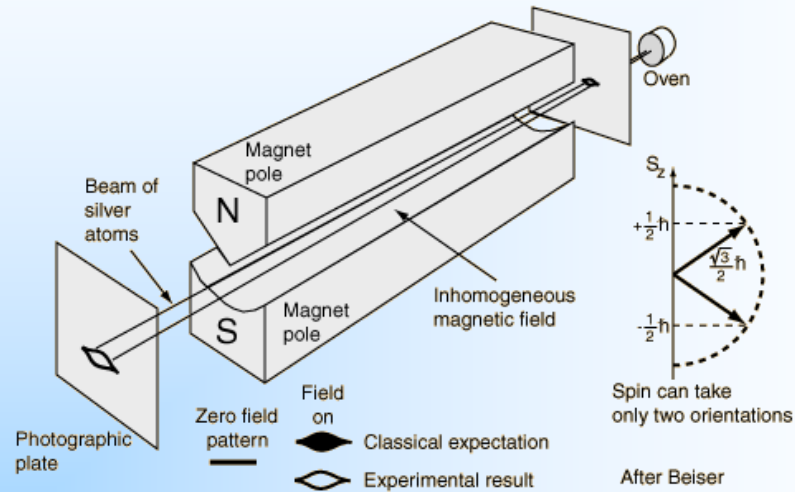


Walther Gerlach
(1888 - 1969)

1920 Stern e Gerlach descobrem o spin do elétron.

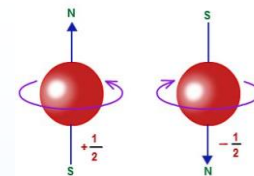


1943 Stern



NO SÉCULO XX

O spin

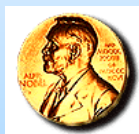


Otto Stern
(1888 - 1969)

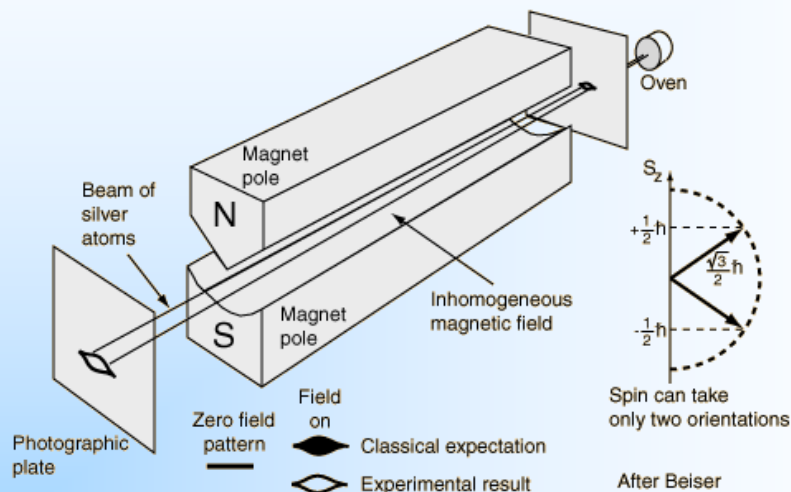


Walther Gerlach
(1888 - 1969)

1920 Stern e Gerlach descobrem o spin do elétron.



1943 Stern

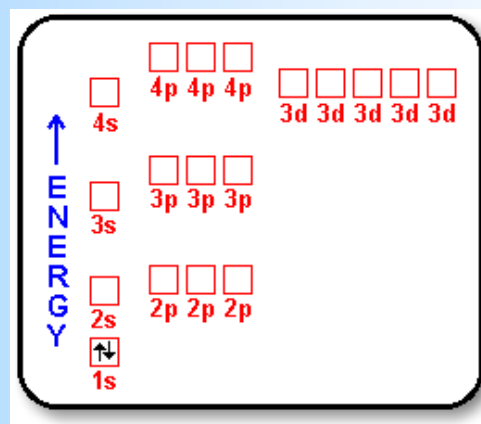


1925 Pauli estabelece o princípio de exclusão.



1945

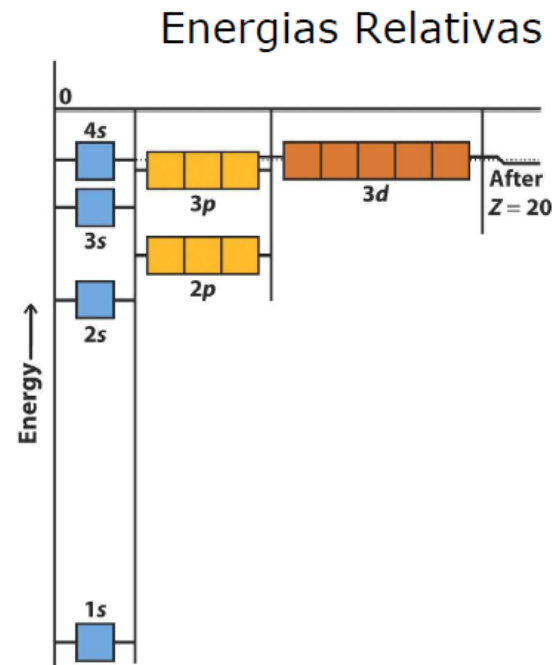
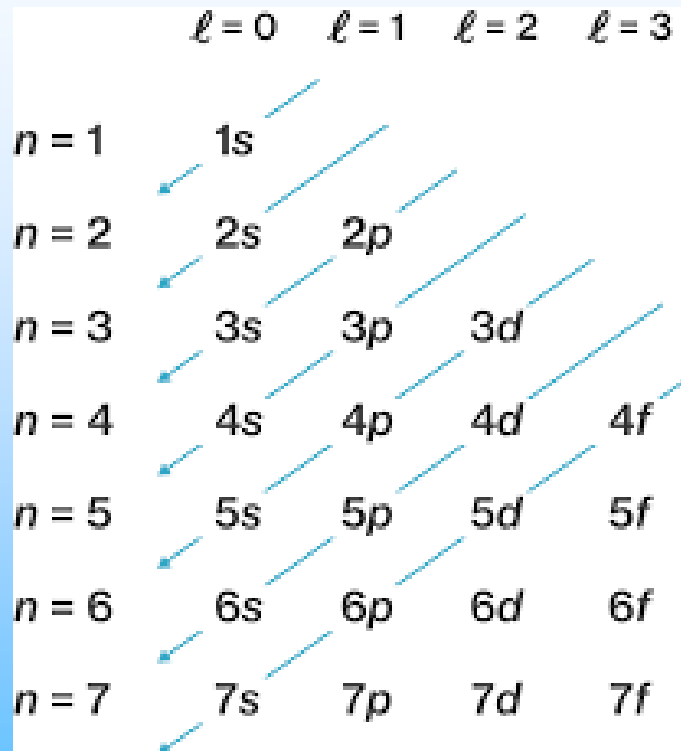
Wolfgang E. Pauli
(1900 - 1958)



O diagrama de Pauli

	$l = 0$	$l = 1$	$l = 2$	$l = 3$
$n = 1$	1s			
$n = 2$	2s	2p		
$n = 3$	3s	3p	3d	
$n = 4$	4s	4p	4d	4f
$n = 5$	5s	5p	5d	5f
$n = 6$	6s	6p	6d	6f
$n = 7$	7s	7p	7d	7f

O diagrama de Pauli



No estado fundamental de um átomo com muitos elétrons, os elétrons ocupam os orbitais atômicos disponíveis, de modo a tornar a energia total do átomo a menor possível.

O princípio da construção e a regra de Hund

Tabela Periódica

The periodic table is organized into 7 periods (rows) and 18 groups (columns). The elements are color-coded as follows:

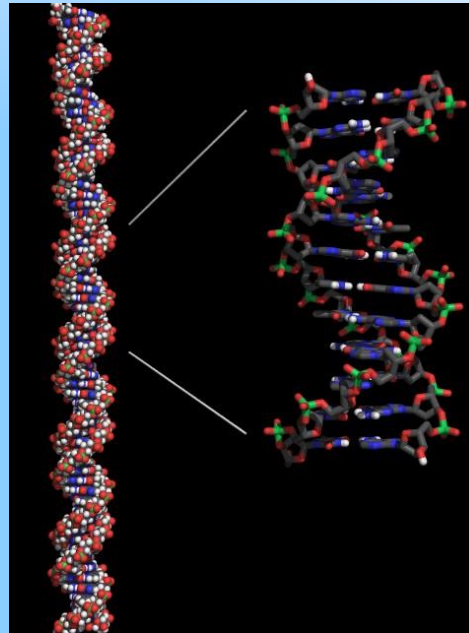
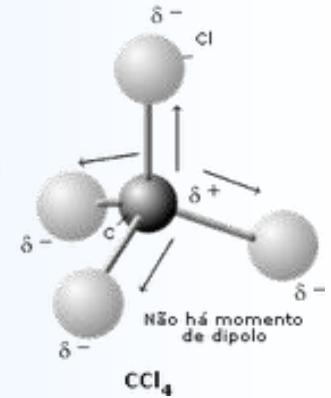
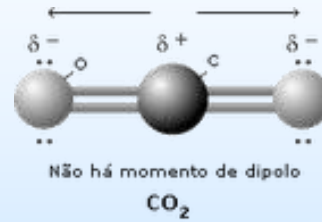
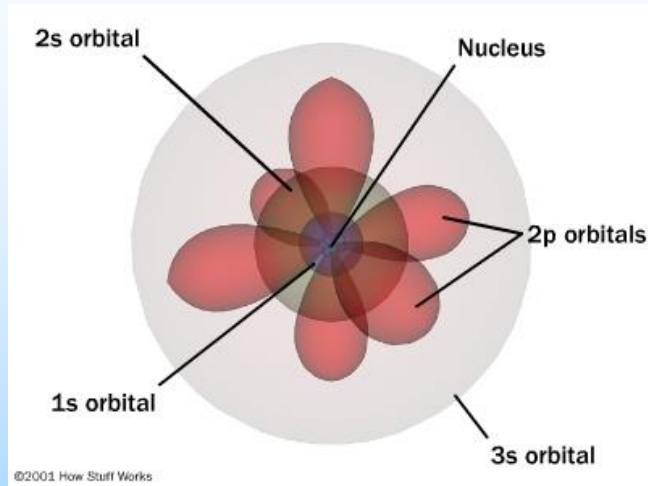
- Blue:** Alkali metals (Group 1) and Alkaline earth metals (Group 2).
- Orange:** Transition metals (Groups 3-10).
- Yellow:** Main group elements (Groups 11-18).
- Purple:** Lanthanides and Actinides (f-block elements).


Brackets on the right side of the table group elements into the following categories:

- Alkali metals (Group 1)
- Alkaline earth metals (Group 2)
- Halogens (Groups 17 and 18)
- Noble gases (Group 18)

Group numbers are indicated above the main group elements: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13/III, 14/IV, 15/V, 16/VI, 17/VII, and 18/VIII.

➤ quais as aplicações da Física Quântica?



A black and white portrait of Paul Dirac, a man with a mustache, wearing a suit and tie, looking slightly to the right.

Quantum mechanics has explained
all of chemistry and most of physics.

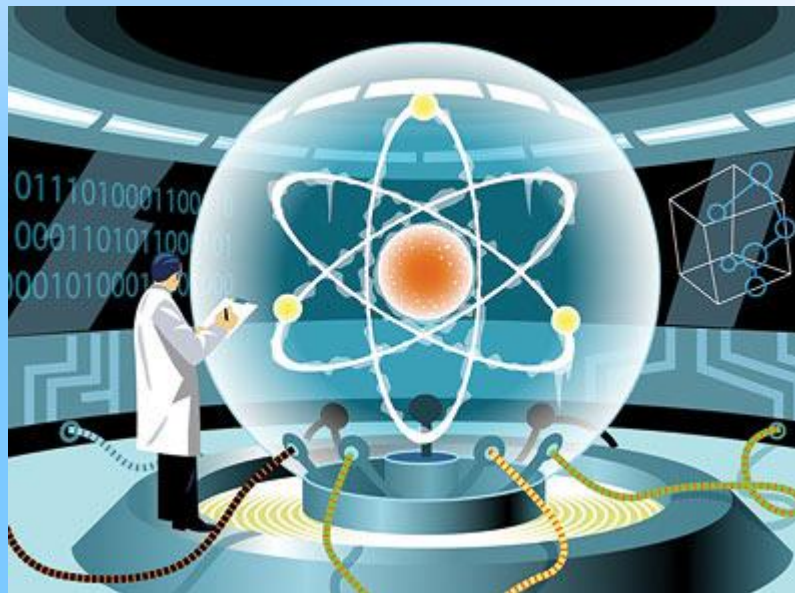
— *Paul Dirac* —

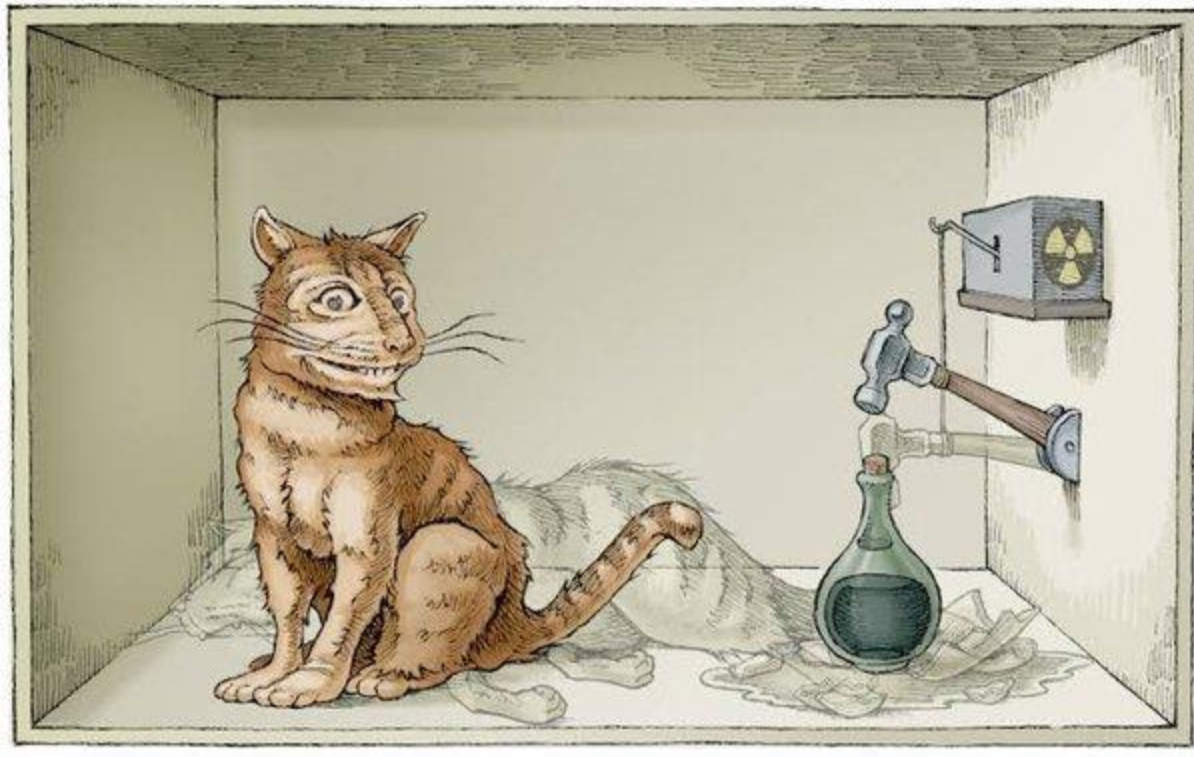
AZ QUOTES

➤ **quais as aplicações da Física Quântica?**



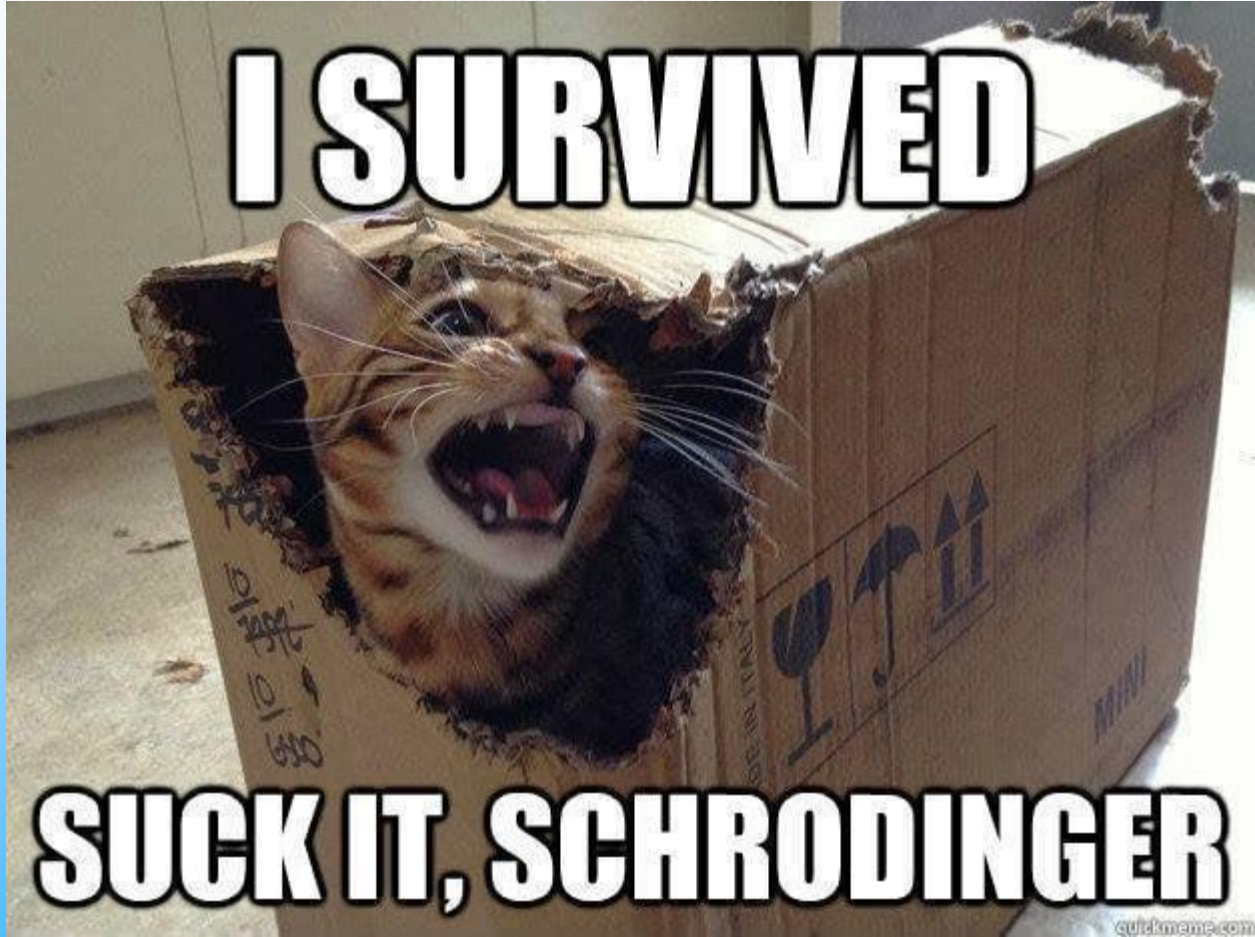
➤ quais as aplicações da Física Quântica?





$$i\hbar\dot{\Psi} = \hat{H}\Psi$$

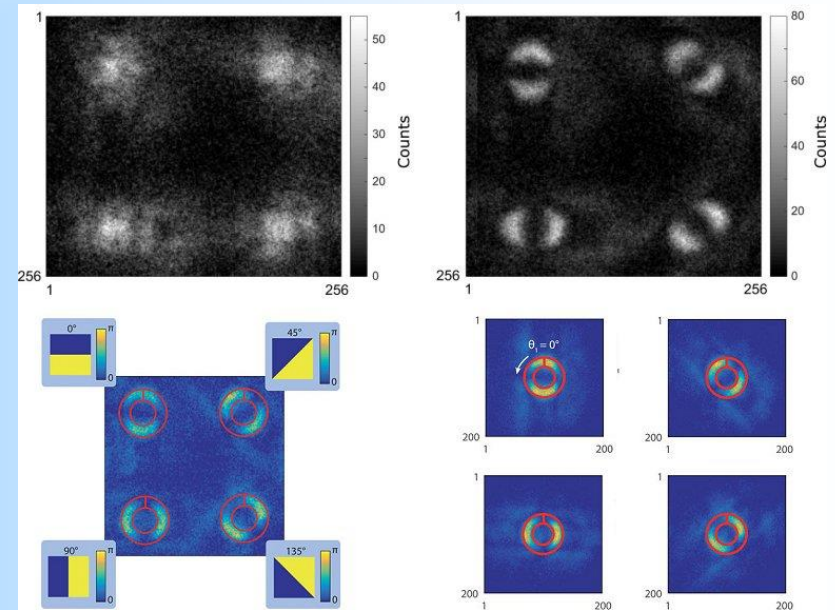
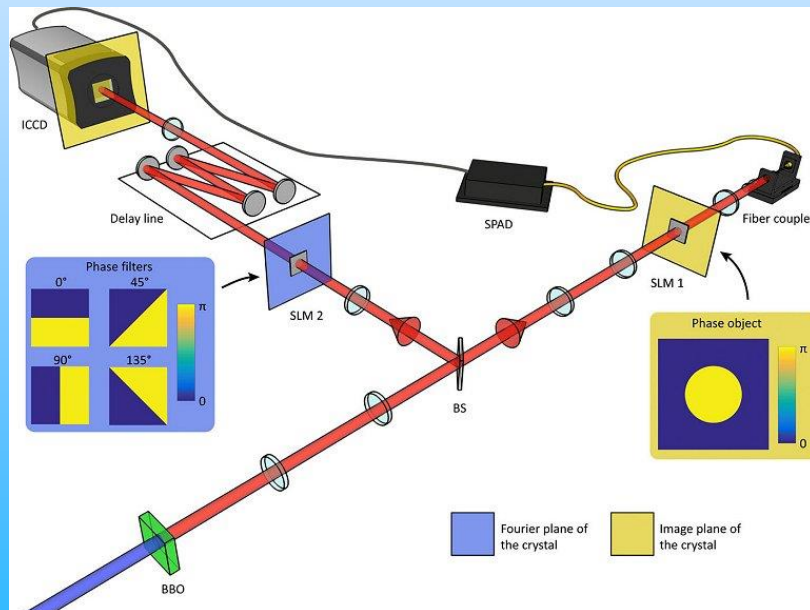
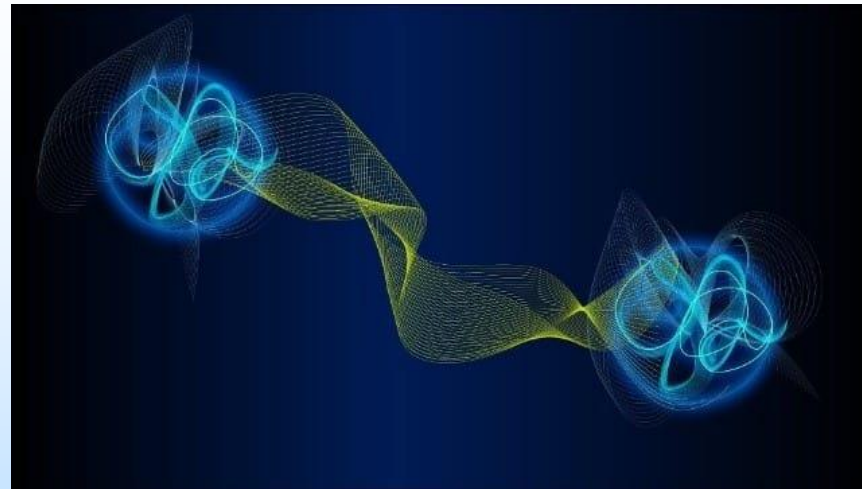




I SURVIVED

SUCK IT, SCHRODINGER

Entrelaçamento quântico é fotografado pela primeira vez





If quantum mechanics hasn't profoundly shocked you, you haven't understood it yet.

(Niels Bohr)

izquotes.com



Quantum mechanics makes
absolutely no sense.

— *Roger Penrose* —

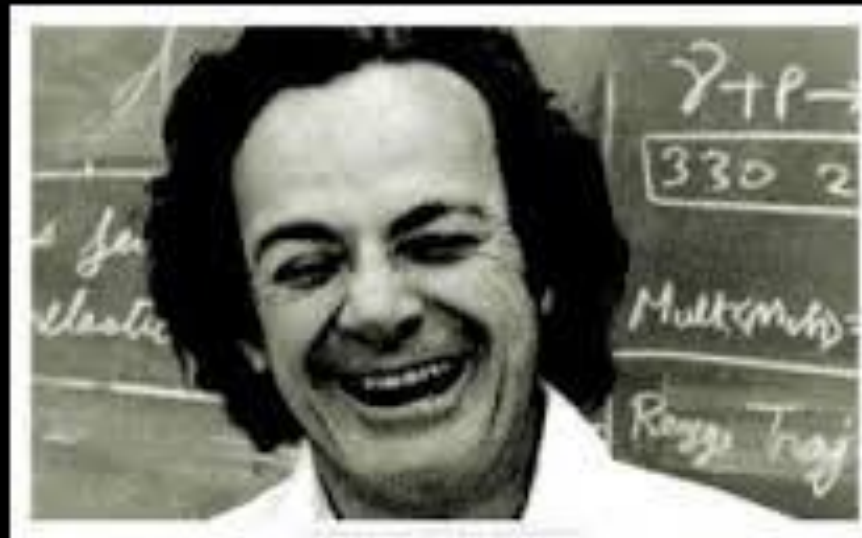
AZ QUOTES



I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.

(Richard Feynman)

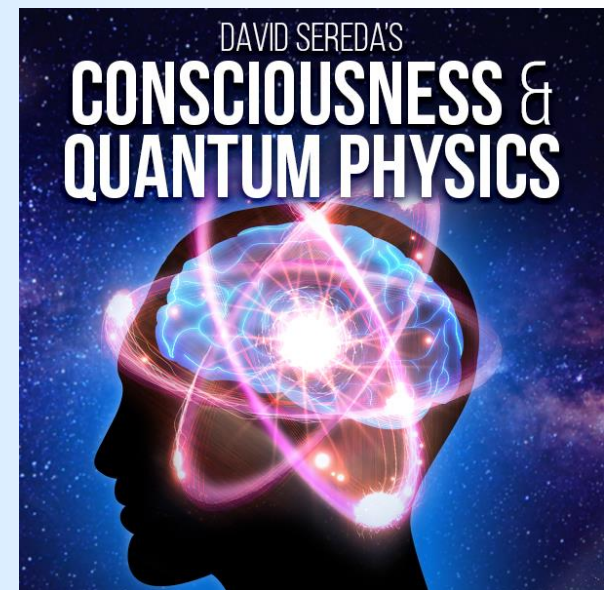
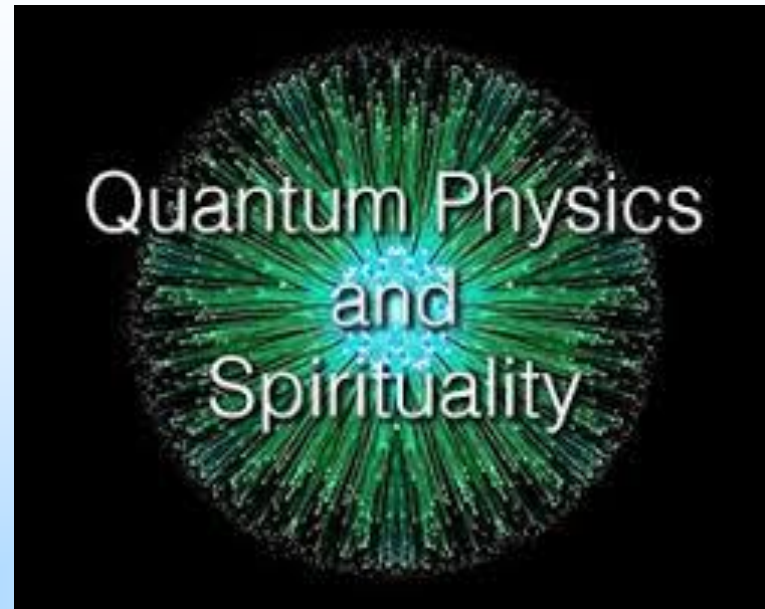
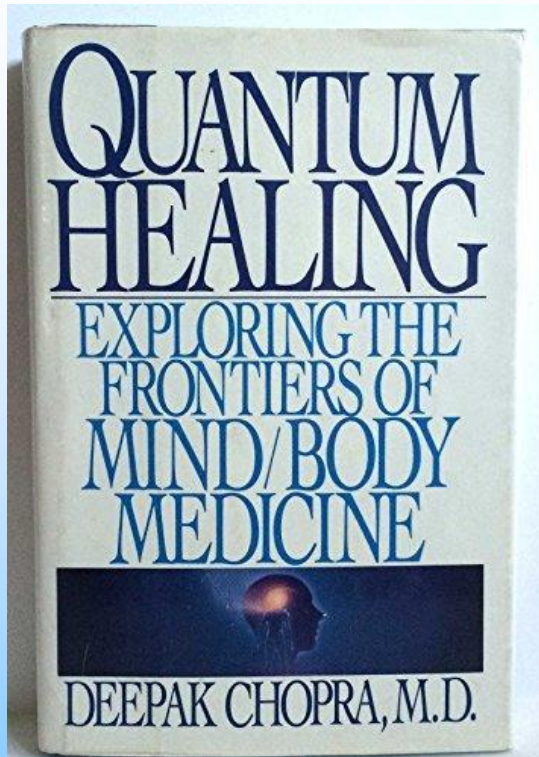
izquotes.com



"Anyone who claims to understand quantum theory is either lying or crazy."

Richard Feynman

➤ O que NÃO é Física Quântica?



➤ O que NÃO é Física Quântica?

QUANTUM PHYSICS

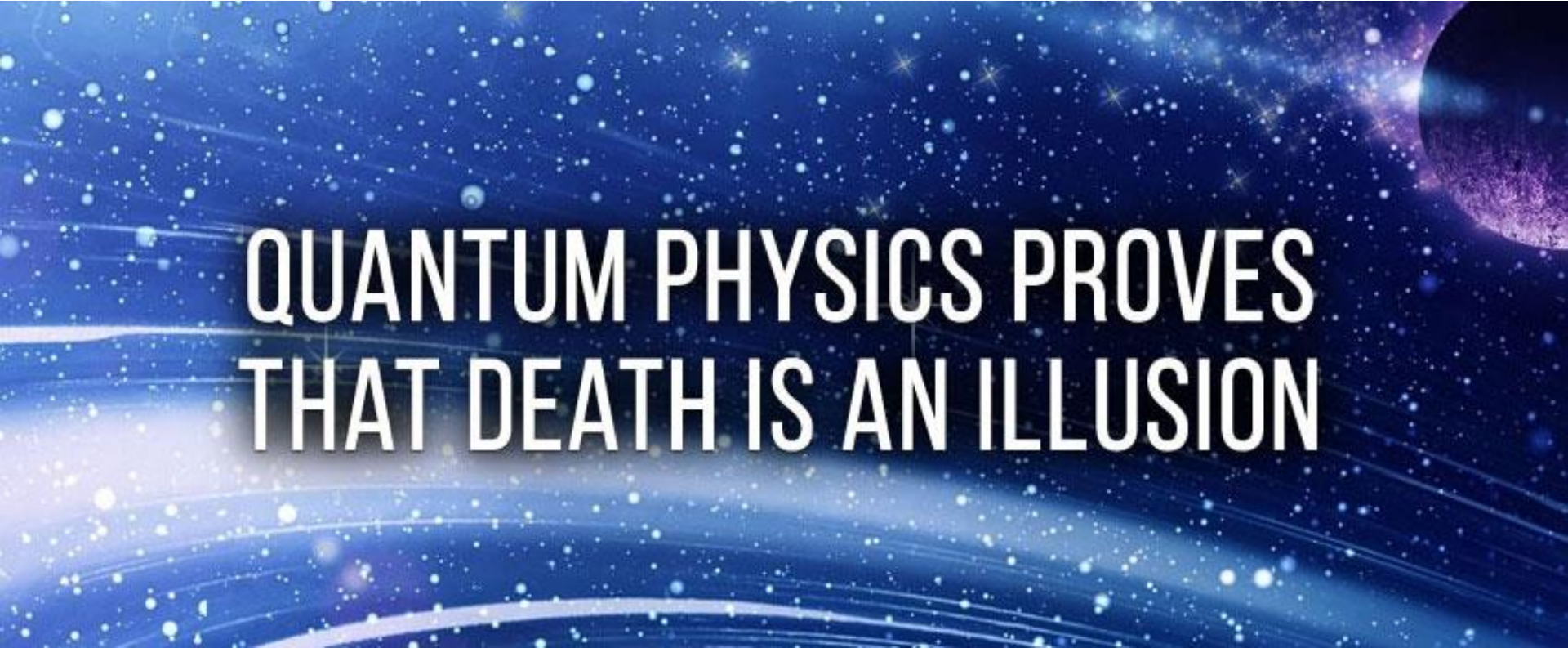
EXPLAINS THE

**LAW OF
ATTRACTION**

Manifest Your
Visions



➤ O que NÃO é Física Quântica?

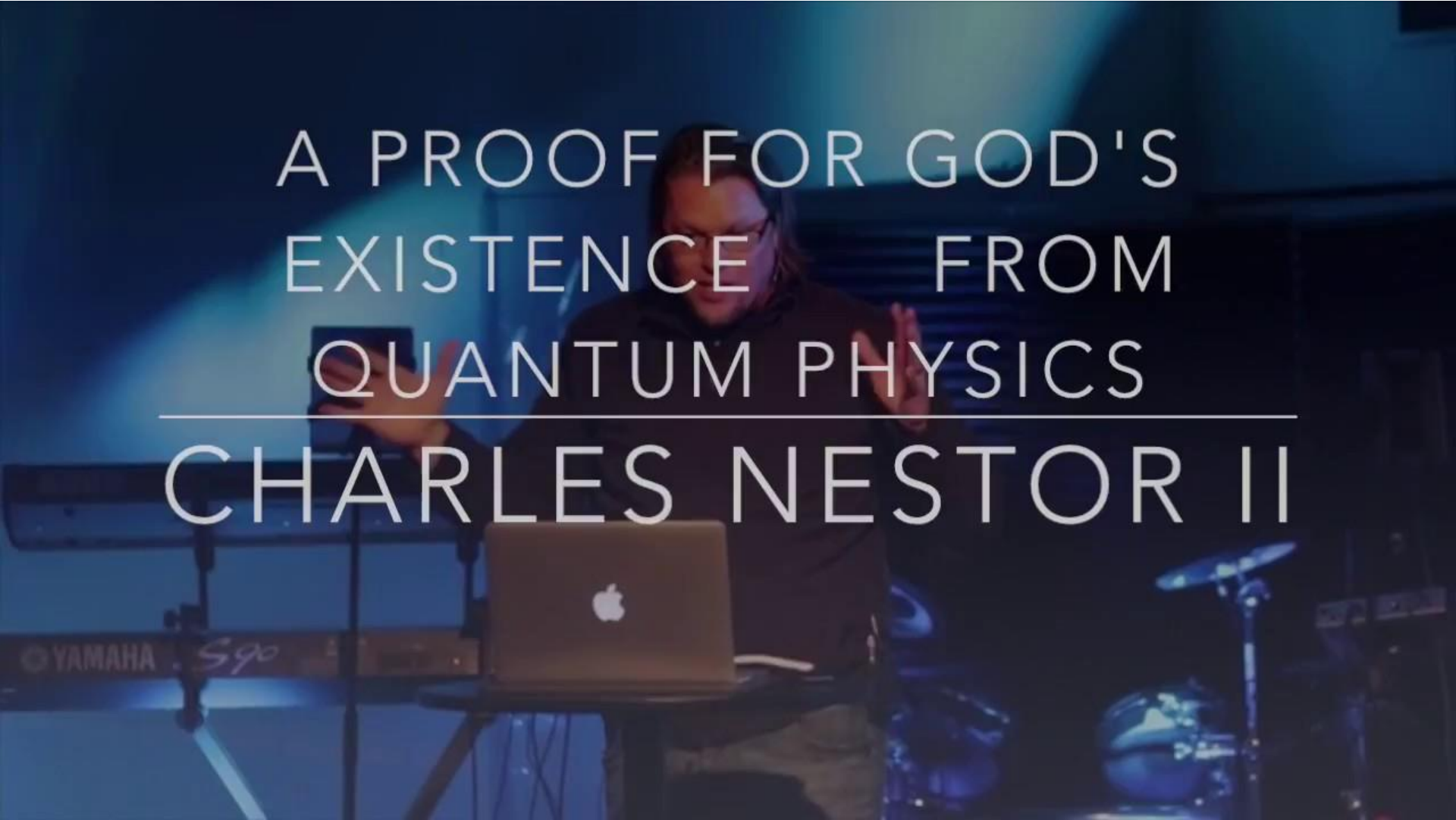


**QUANTUM PHYSICS PROVES
THAT DEATH IS AN ILLUSION**

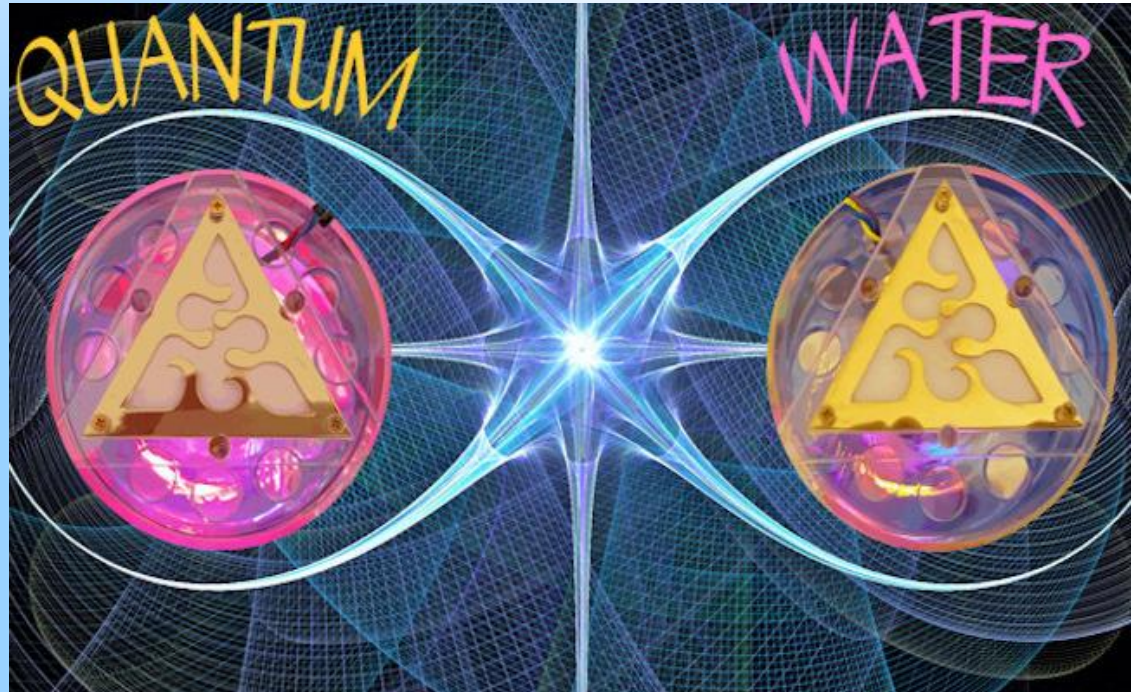
➤ O que NÃO é Física Quântica?

A PROOF FOR GOD'S
EXISTENCE FROM
QUANTUM PHYSICS

CHARLES NESTOR II



➤ O que NÃO é Física Quântica?



➤ O que NÃO é Física Quântica?



Super Energized Quantum Mattress & Multi-purpose Mat

Enjoy the benefits of "Qi", forest bath,
deep cell spa and resonant acupressure
while sleeping

QUANTUM

➤ O que NÃO é Física Quântica?

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$



QUANTUM

No colchão quântico:
ou você tem a posição ou o momento!

THAT'S NOT HOW

QUANTUM PHYSICS WORKS!

memegenerator.net

