

# *Modelos Atômicos*

e

# *Interação Radiação-Matéria*

*3ª série FIS – Ensino Médio Integrado*

*André Cipoli  
Rogério Burgugi*

# Cronologia



Julius Plücker  
1801 - 1868



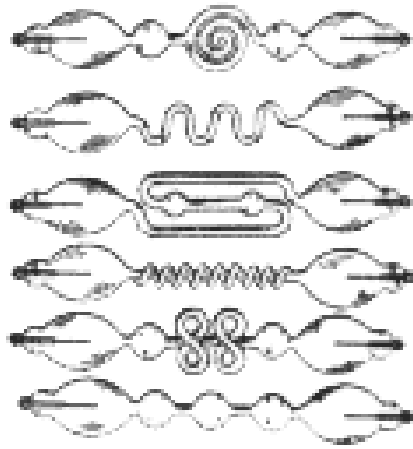
Heinrich Geissler  
1814 - 1879



Johann W. Hittorf  
1824 - 1914



c. 1880



Geissler Tubes, p. 897.



Multitubo Geissler com fluidos fluorescentes (1890)

# Cronologia

**1ª Revolução Industrial (1760 → 1850)**

**2ª Revolução Industrial (~ 1.850/70 → 1945)**

*Inglaterra, Estados Unidos, França, Alemanha, Itália, Japão*

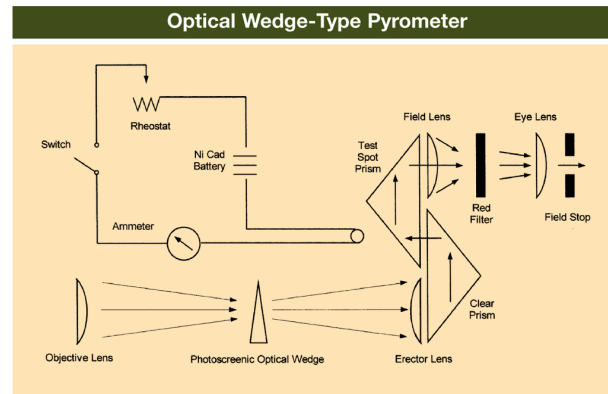


- Navios de aço movidos a vapor
- Desenvolvimento do avião
- Produção em massa de bens de consumo
- Enlatamento de comidas
- Refrigeração mecânica
- Invenção do telefone eletromagnético

## Estudos científicos para o controle de processos siderúrgicos



Pirômetro Óptico



Correct



Too High



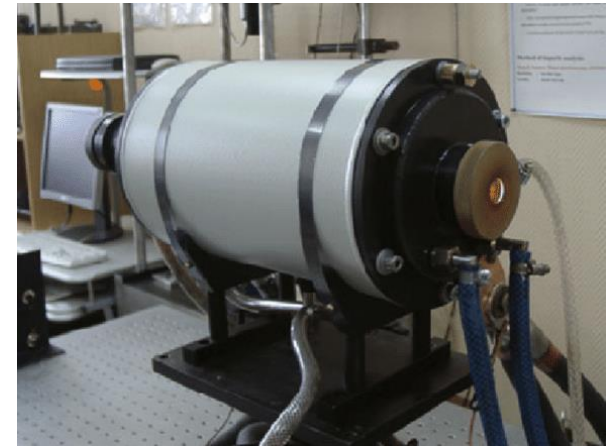
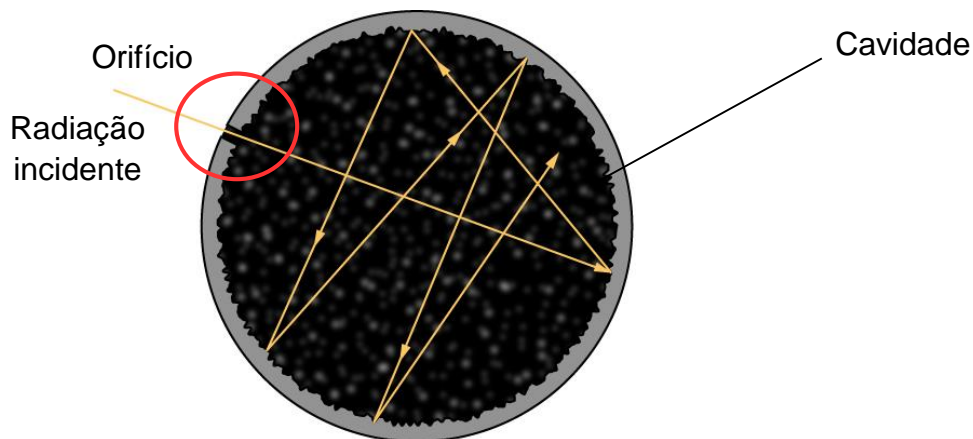
Too Low

# Definição

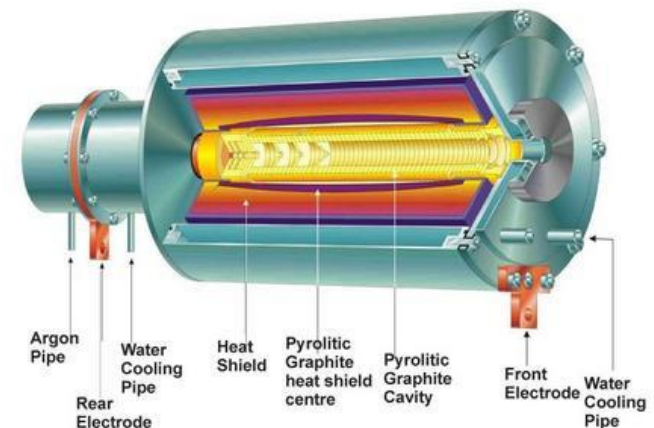
*Um corpo negro é um objeto teórico que absorve 100% de radiação que nele incide.*

*A melhor aproximação prática é a que se consegue com um pequeno orifício na parede de uma cavidade.*

*A radiação entra pelo orifício e fica confinada na cavidade devido a múltiplas reflexões.*



*BB2000/40 blackbody with a graphite radiating cavity*



# Curva de Distribuição de Energia



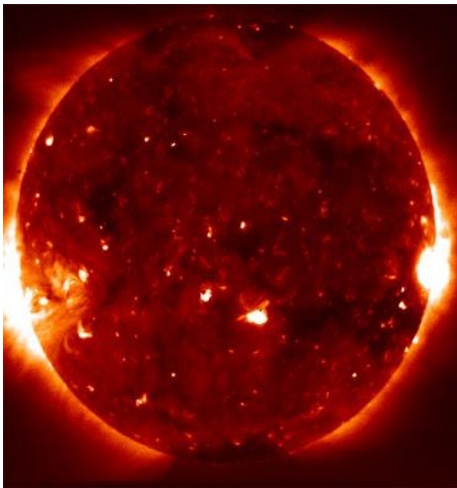
Ferradura a **400K** e **1.000K**



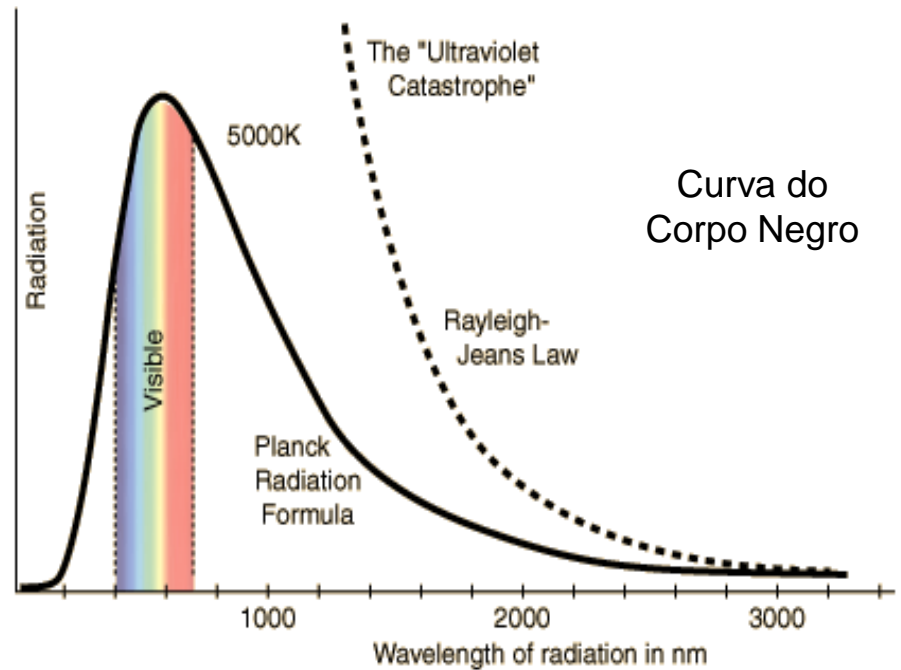
Alto-forno a **1.800K**



Filamento de tungstênio a **2.800K**



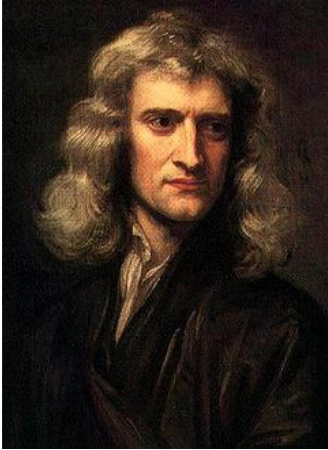
Gás a **1.000.000K** emite na faixa de raios X e  $\gamma$  (sat. *Hinode*)





# Cronologia

Isaac Newton



1643 - 1725

William Hyde Wollaston

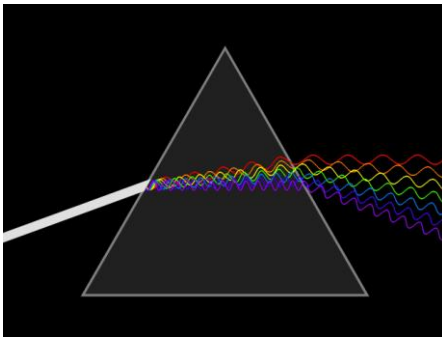


1766 - 1828

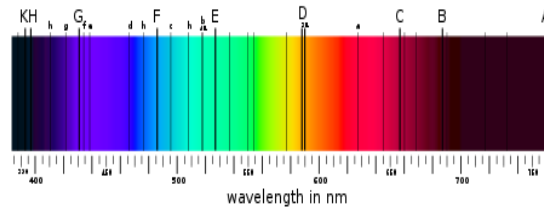
Joseph von Fraunhofer



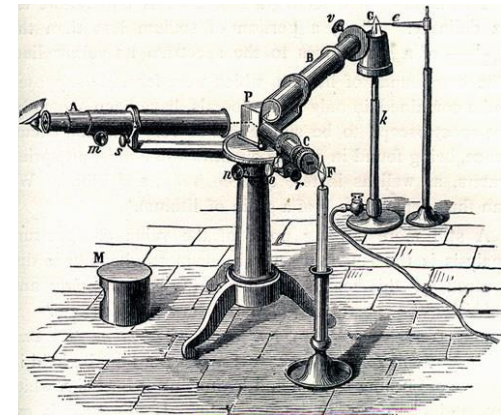
1787 - 1826



*Prisma óptico*  
**1665**



*Espectro luminoso*  
**1802**



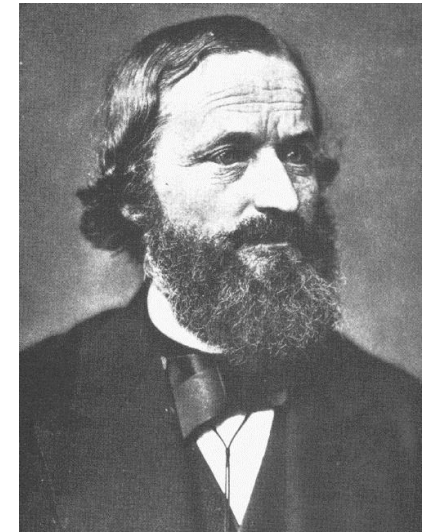
*Espectroscópio*  
**1814**

# Leis de Kirchhoff

≈1860

*“Em equilíbrio térmico, a emissividade de um corpo (ou superfície) é igual à sua absorptância.”*

*“Um objeto sólido aquecido produz luz com espectro contínuo.”*



Gustav Kirchhoff  
1824 - 1887

*“Um gás tênue produz luz com linhas espectrais em comprimentos de onda específicos que dependem da composição química do gás.”*

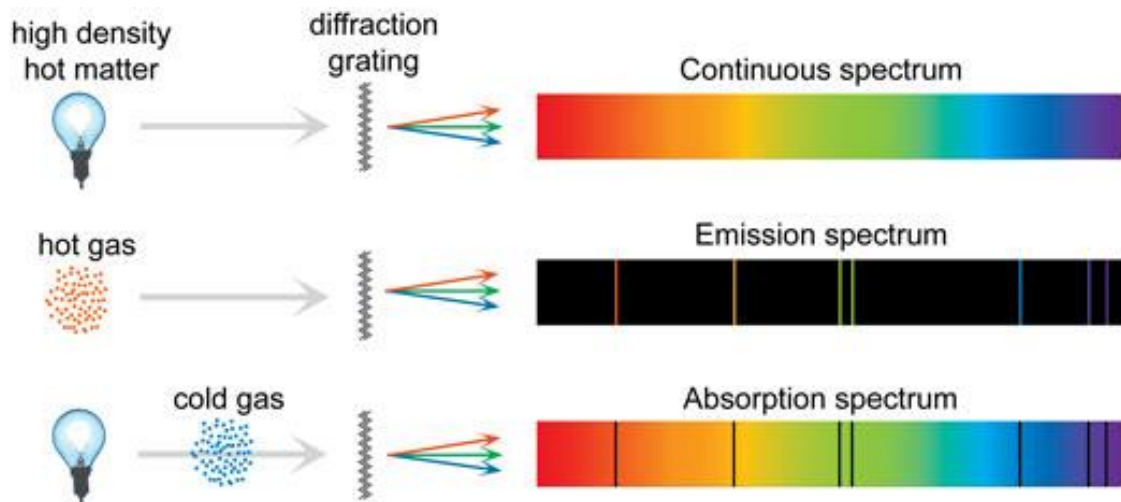


*“Um objeto sólido a alta temperatura rodeado de um gás tênue a temperaturas inferiores produz luz num espectro contínuo com linhas escuras em comprimentos de onda discretos, isto é, bem definidos, cujas posições dependem da composição química do gás.”*



# Espectroscopia

- *Materiais*
- *Química*
- *Física*
- *Astrofísica*



## Resultados Experimentais



**Série de Balmer**  
**Átomo de Hidrogênio**

- Em **1885**, Balmer apresenta a seguinte fórmula empírica:

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

where  $n = 3, 4, 5, \dots$ , and

R is the Rydberg Constant. = 10.973.731,6 m<sup>-1</sup>



Johannes Rydberg  
1854 - 1919

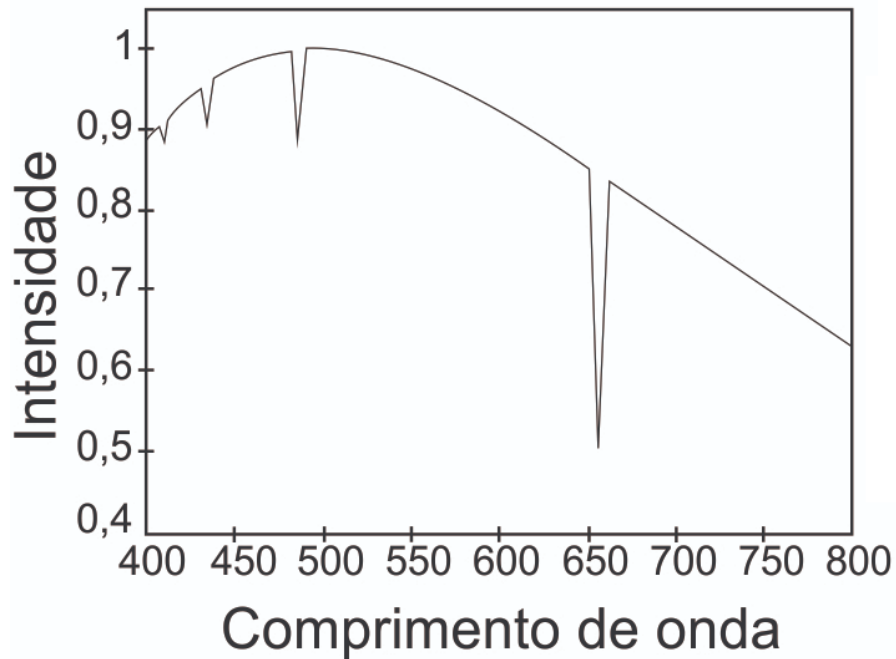


Johann Jakob Balmer  
1825 - 1898

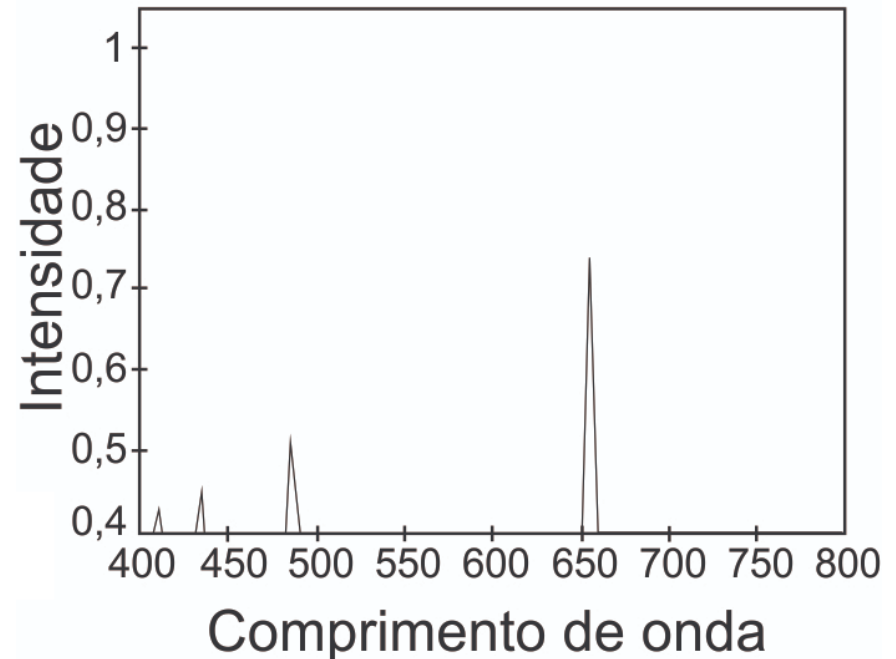


# *Spectroscopia*

*Espectro de Linhas de*  
**Absorção**

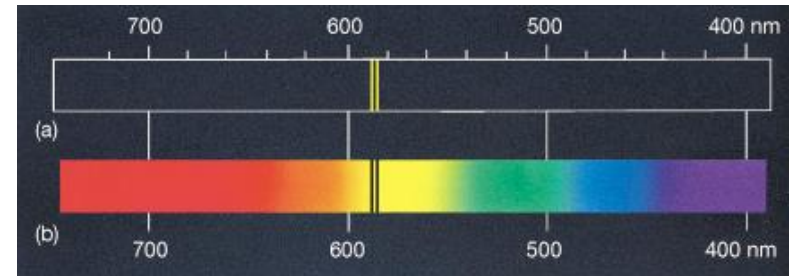
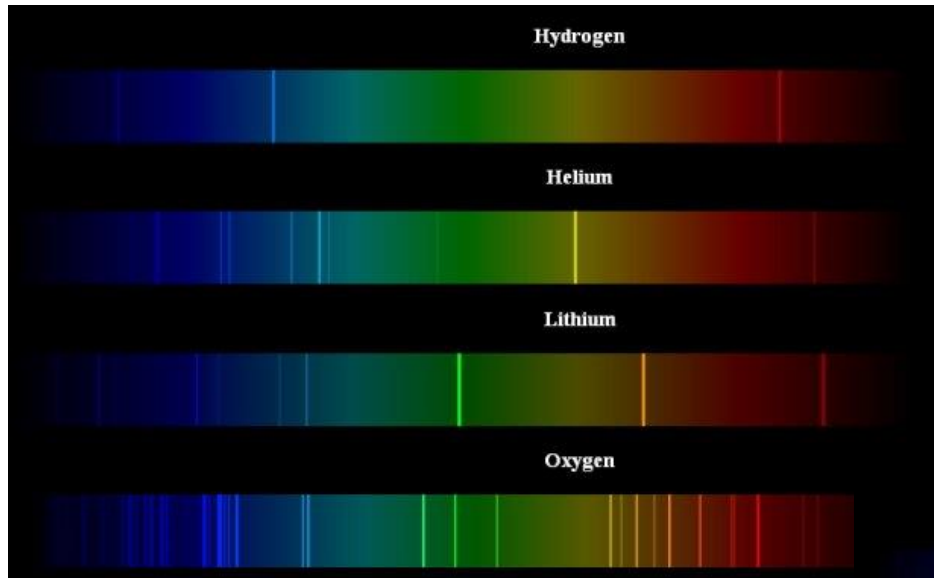


*Espectro de Linhas de*  
**Emissão**

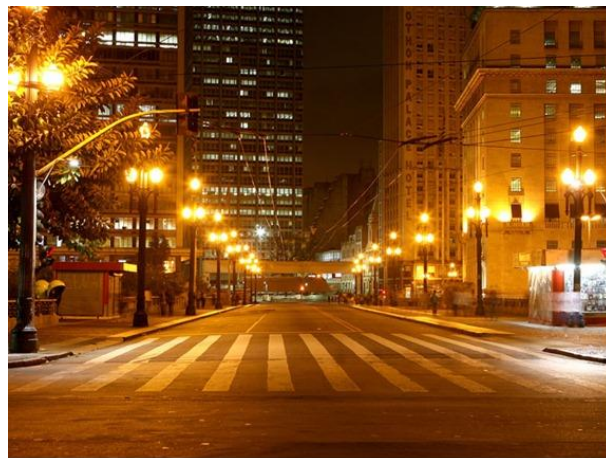


# Espectroscopia

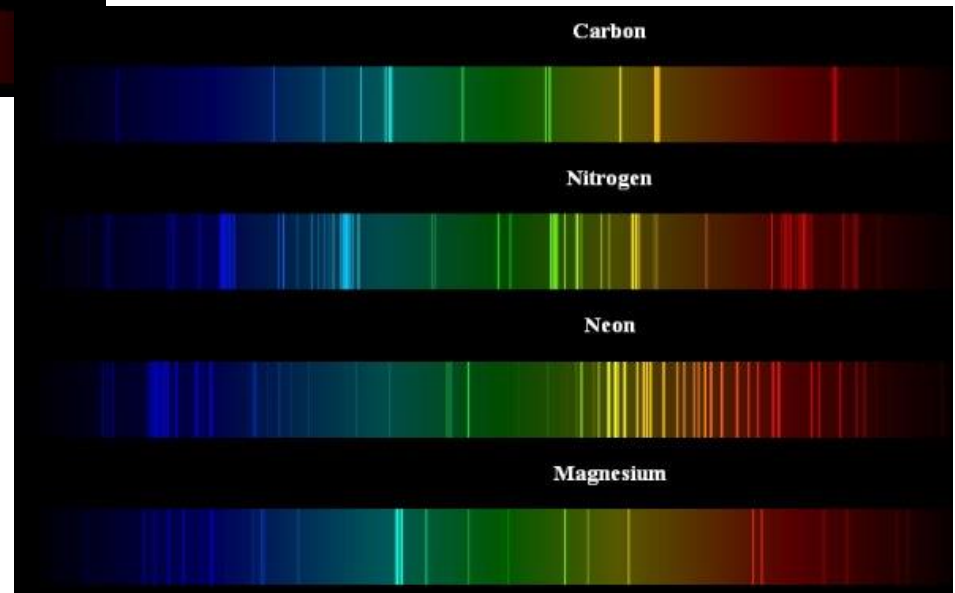
é a designação para toda técnica de levantamento de dados físico-químicos através da transmissão, absorção ou reflexão da energia radiante incidente em uma amostra.



*Espectros para o Sódio Na*



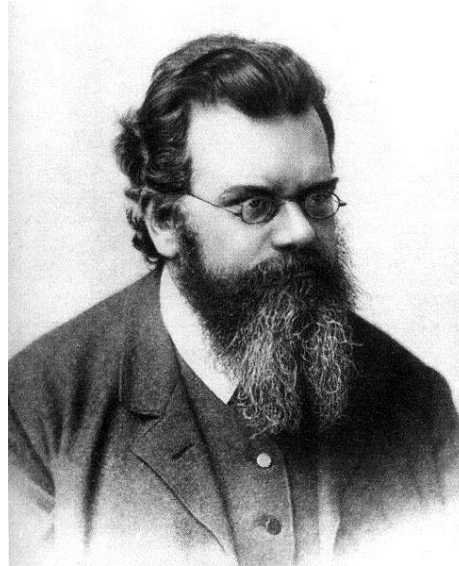
*Iluminação  
Centro de SP*



# Lei de Stefan - Boltzmann



Joseph Stefan  
1835 - 1893  
**1879**



Ludwig Boltzmann  
1844 - 1906  
**1884**

$$P = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

onde,

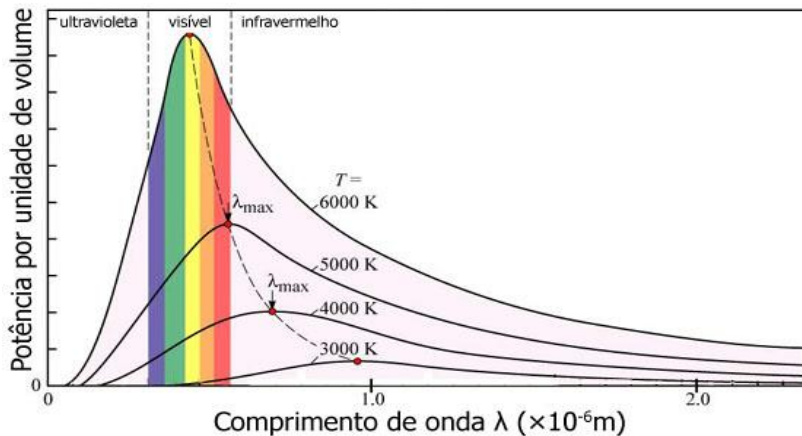
**$P$**  → **Potência emitida (ou absorvida) pelo objeto (W)**

**$\sigma$**  =  $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$   
(constante de Stefan-Boltzmann)

**Emissividade ( $e = 1$ , para Corpo Negro)**

**$A$**  → **Área superficial do corpo ( $\text{m}^2$ )**

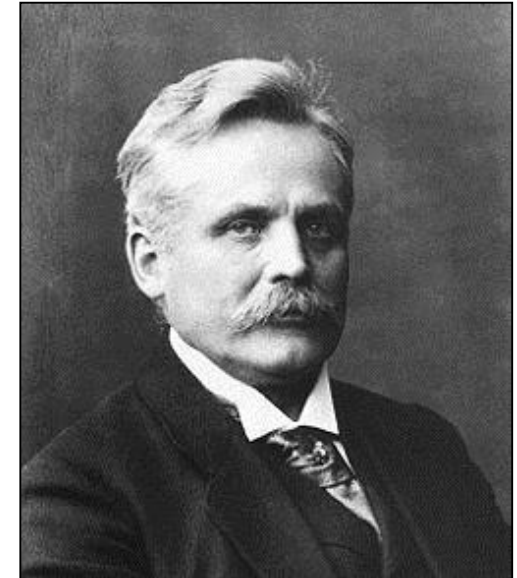
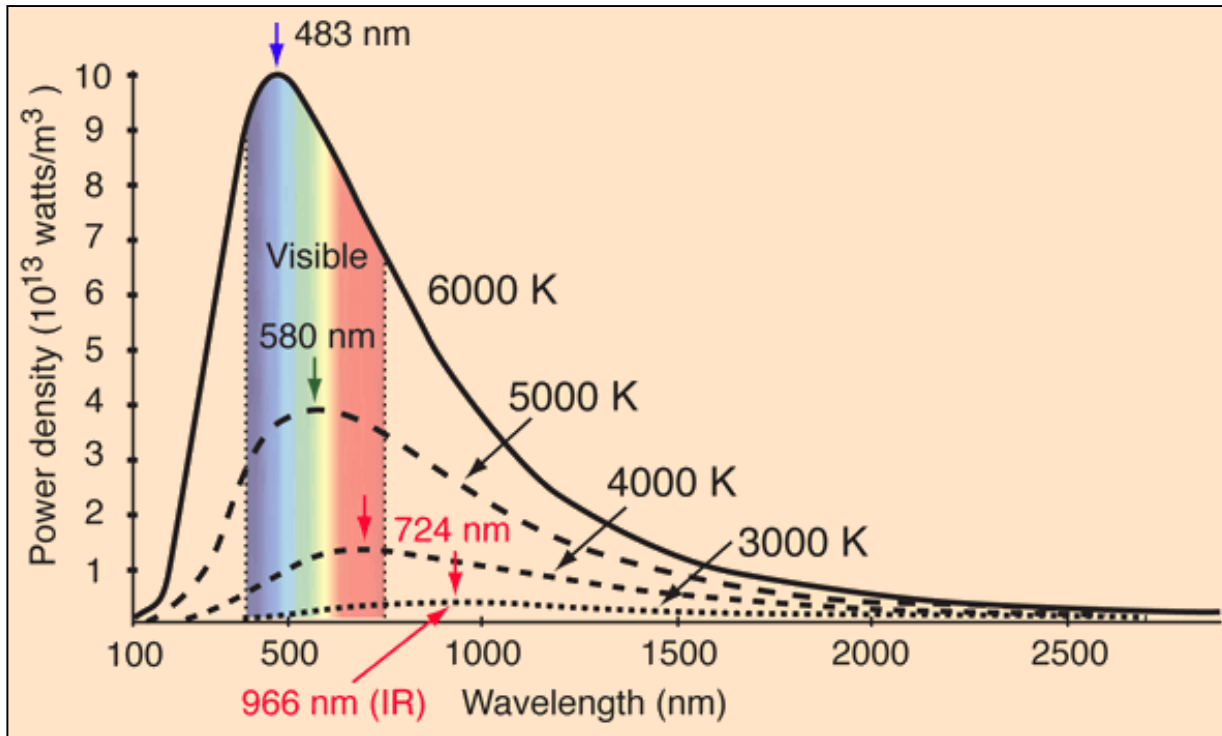
**$T$**  → **Temperatura absoluta (K)**



# Lei do Deslocamento de Wien

1893

“O comprimento de onda do **pico** de radiação da curva de um corpo negro dá a medida da temperatura.”



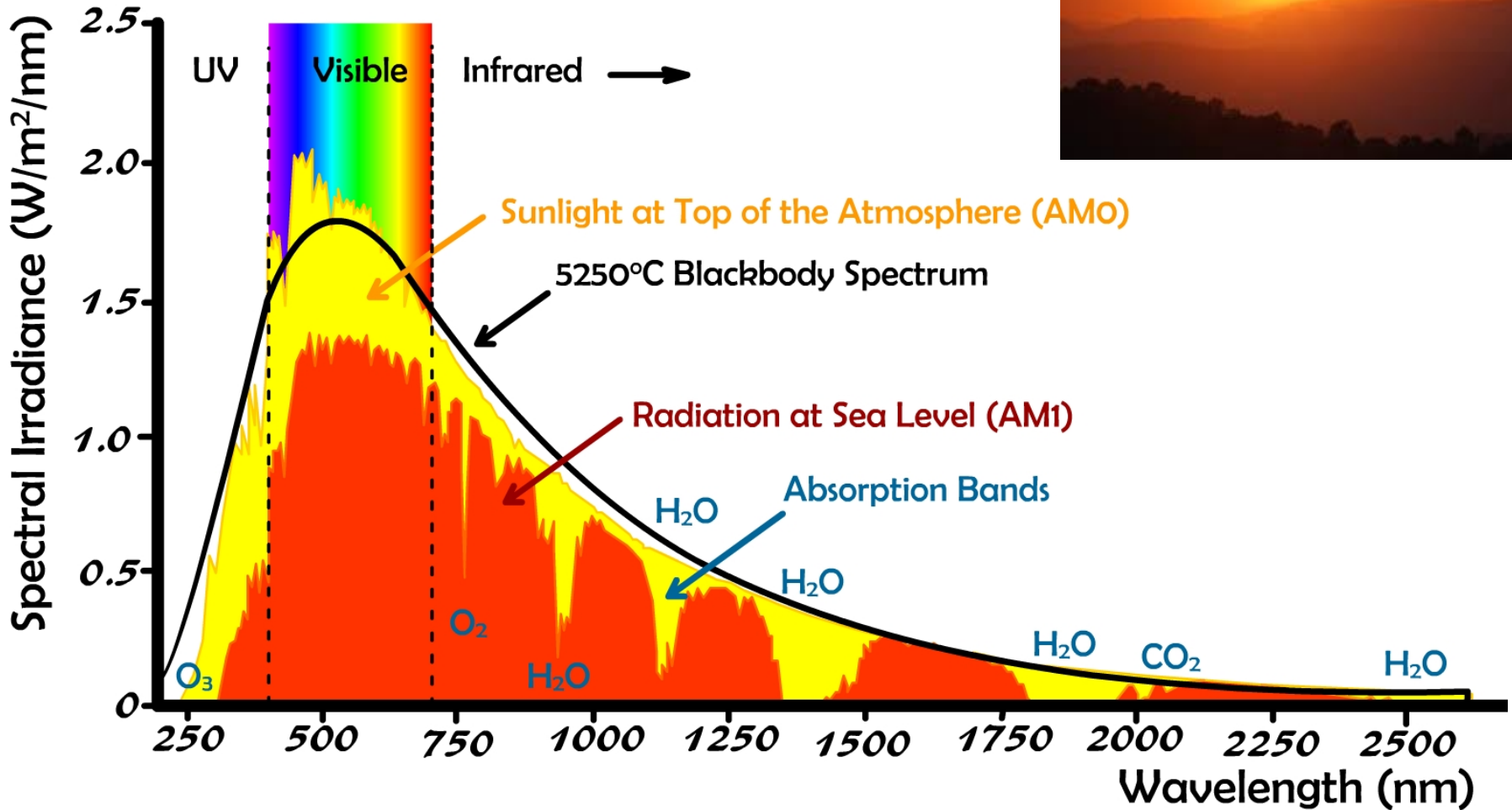
Wilhelm C. W. O. F. F. Wien  
1864 - 1928  
Nobel de **1.911**

$$\lambda_{peak} T = 2.898 \times 10^{-3} m \cdot K$$

1 Angstrom = 1 Å =  $1 \cdot 10^{-10} m$

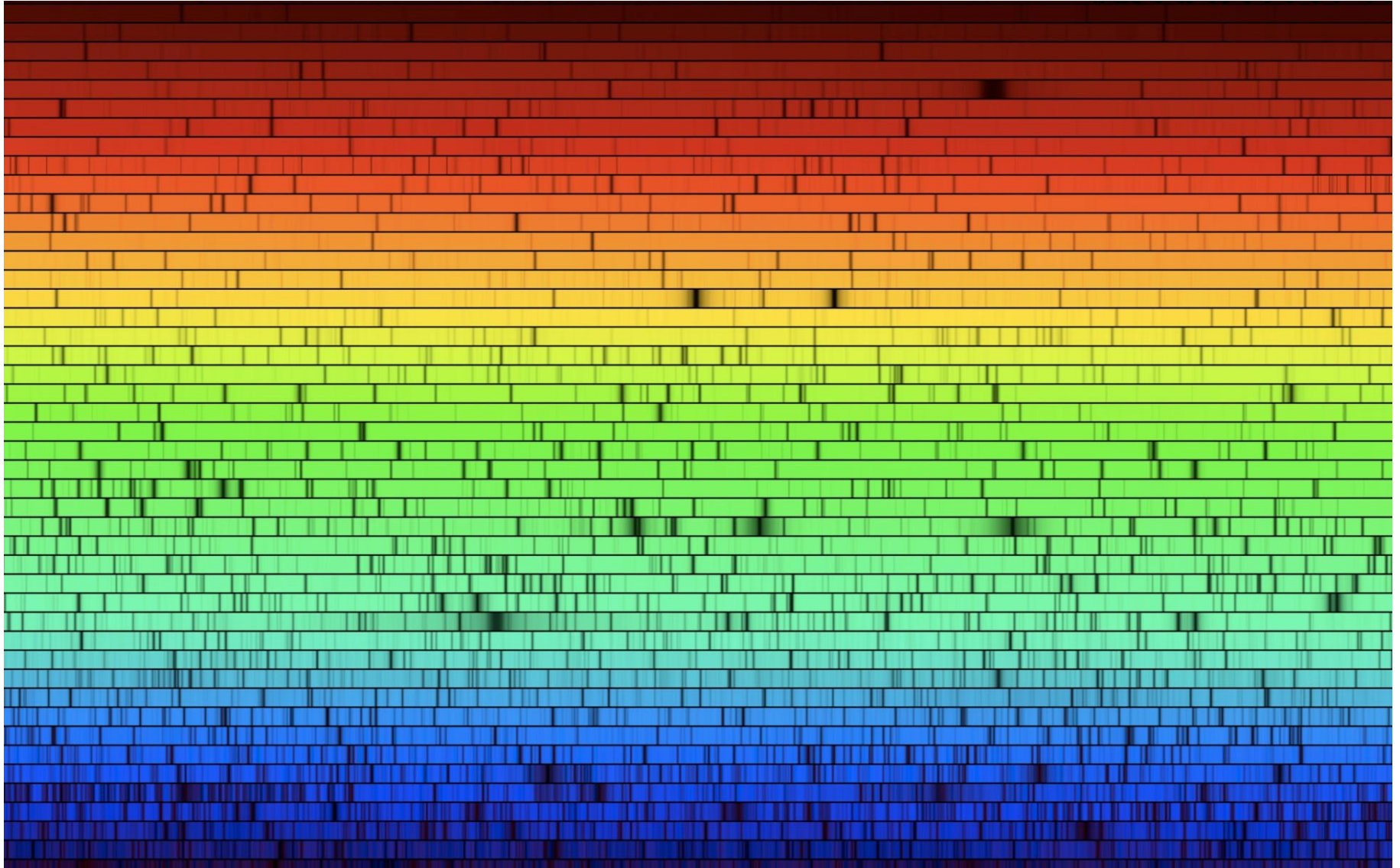


# O Sol!!

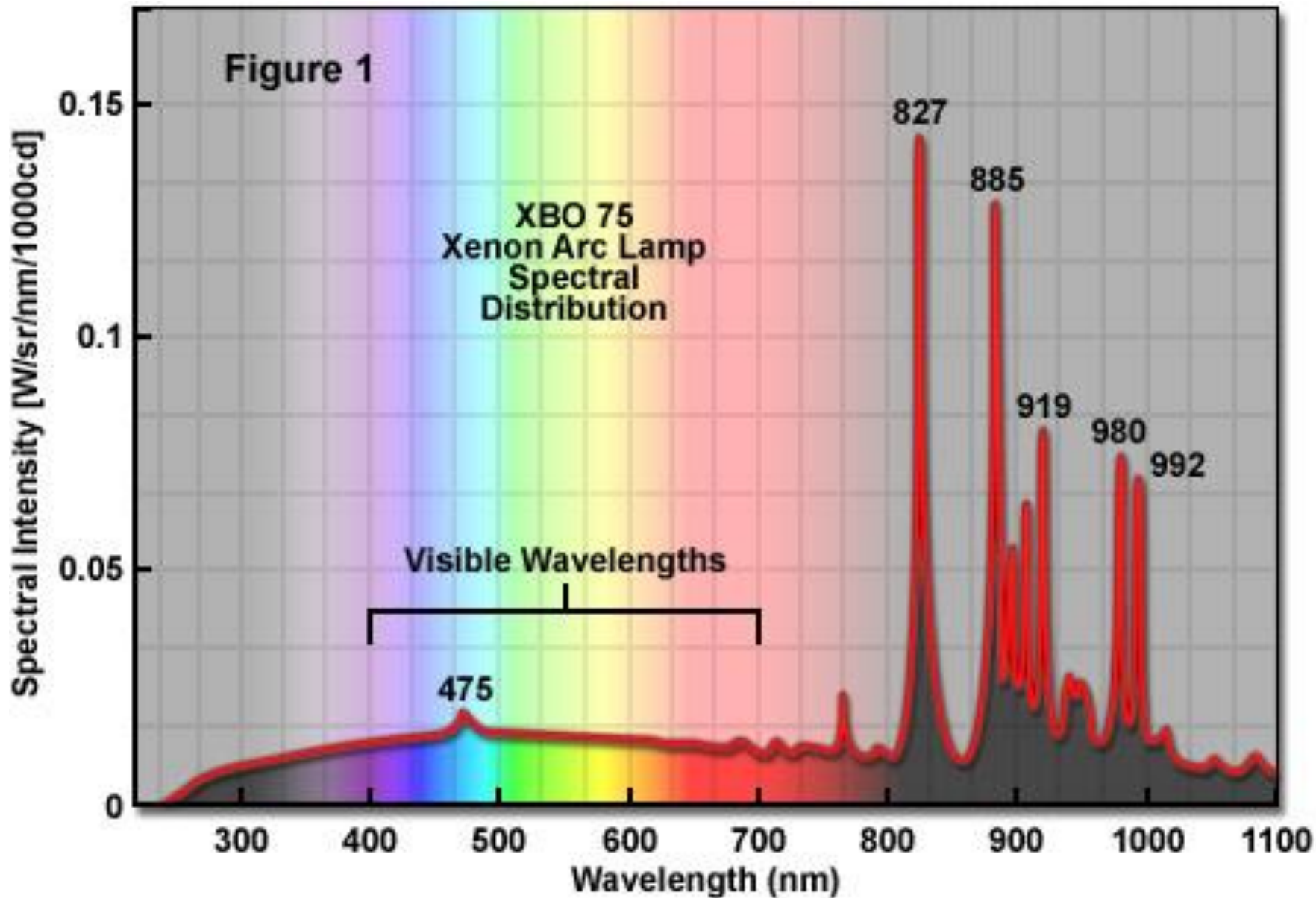


Espectro de radiação solar incidente no topo da atmosfera (região amarela), na superfície terrestre (região laranja) e da emissão de um corpo negro à temperatura de  $\approx 5.500 \text{ K}$  (linha cheia preta).

# Espectro *visível* completo do *Sol*



# Lâmpada de arco de Xenônio



# James Clerk Maxwell (1831 - 1879)

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

Lei de Gauss (eletrostática)

- relaciona os campos elétricos e suas fontes, as cargas elétricas, e pode ser aplicada mesmo para campos elétricos variáveis com o tempo.

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

Lei de Gauss (magnetostática)

- aplicável aos campos magnéticos e evidenciando ainda a não existência de monopolos magnéticos (não existe polo sul ou polo norte isolado), isto é, as linhas de campo magnético são contínuas.

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

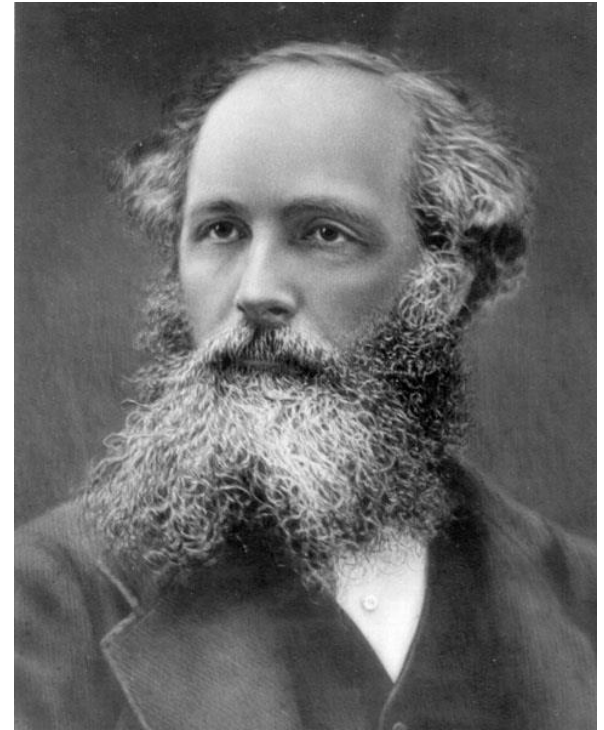
Lei de Ampère

- a relação entre um campo magnético e a corrente elétrica que o origina. Ela estabelece que um campo magnético é sempre produzido por uma corrente elétrica ou por um campo elétrico variável. Essa segunda maneira de se obter um campo magnético foi prevista pelo próprio Maxwell, com base na simetria de natureza: se um campo magnético variável induz um campo elétrico, e conseqüentemente, uma corrente elétrica, então um campo elétrico variável deve induzir um campo magnético.

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

Lei de Faraday

- descreve as características do campo elétrico originando um fluxo magnético variável. Os campos magnéticos originados são variáveis no tempo, gerando assim campos elétricos do tipo rotacionais.



Teoria Eletromagnética  
Clássica da luz (1873)

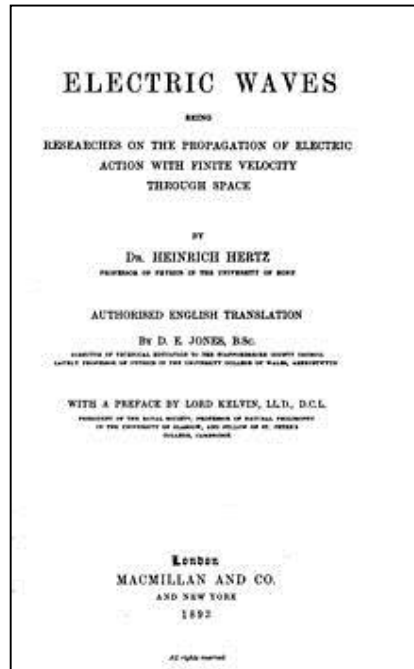
• Eletromagnetismo

• Óptica

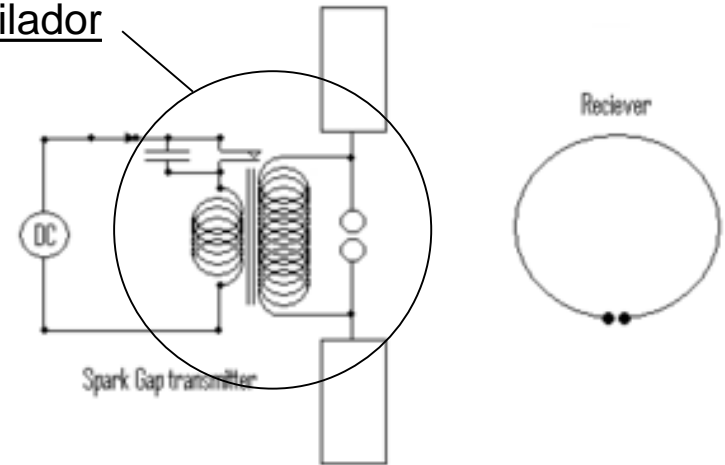


# Heinrich Rudolf Hertz (1857 - 1894)

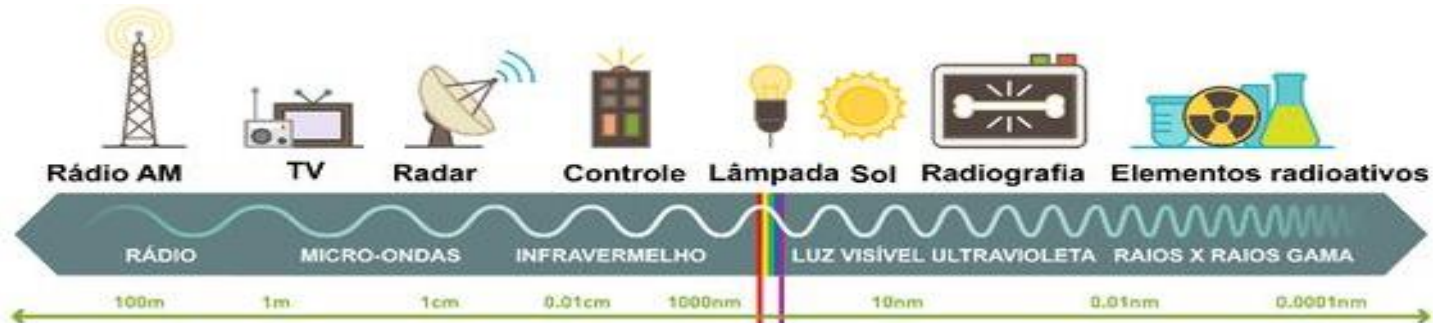
*Realização de experiências para a comprovação da T.E.C.*



Oscilador

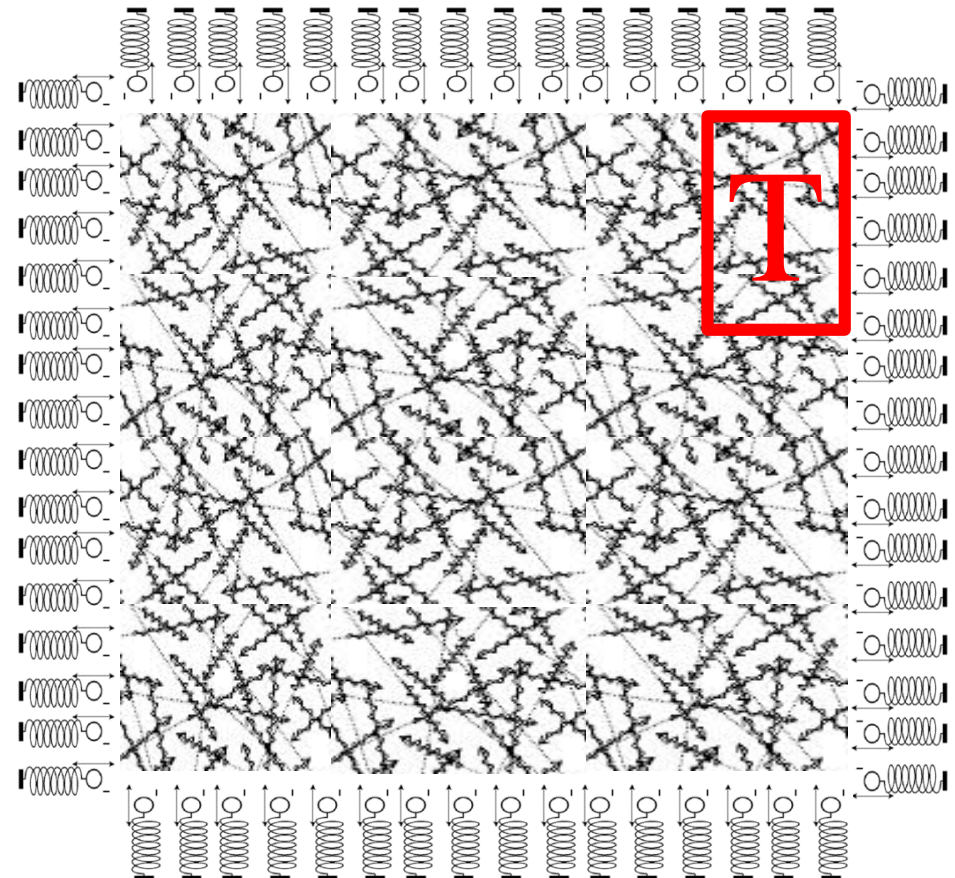
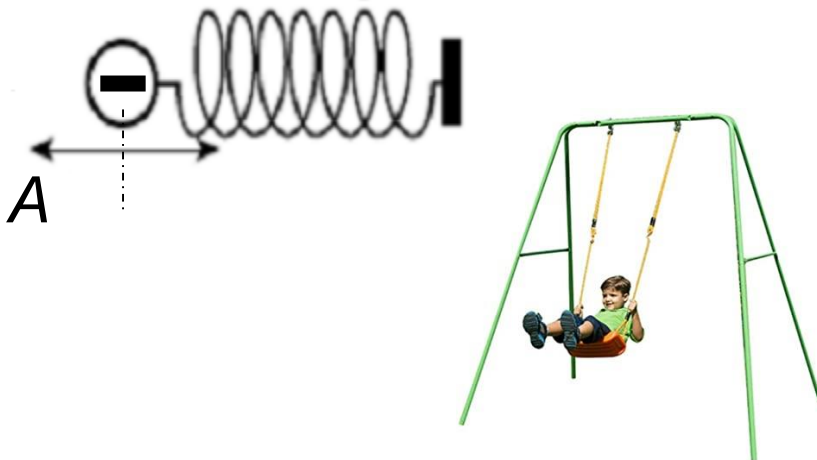


*Esquema do aparato de Hertz (1.887)*



# Considerações clássicas (T.E.C.)

- São válidos todos os conceitos físicos e as leis da Termodinâmica, da Mecânica e do Eletromagnetismo.
- As paredes do material são compostas por ínfimos osciladores eletromagnéticos (ainda não havia sido provada a existência de átomos).
- Cada oscilador poderia vibrar com **qualquer** energia.
- Energia  $\propto A^2$ , com frequência  **$f$**  bem definida



Espectro **contínuo** de energia

# Lei da Radiação de Rayleigh-Jeans

1900 - 1905



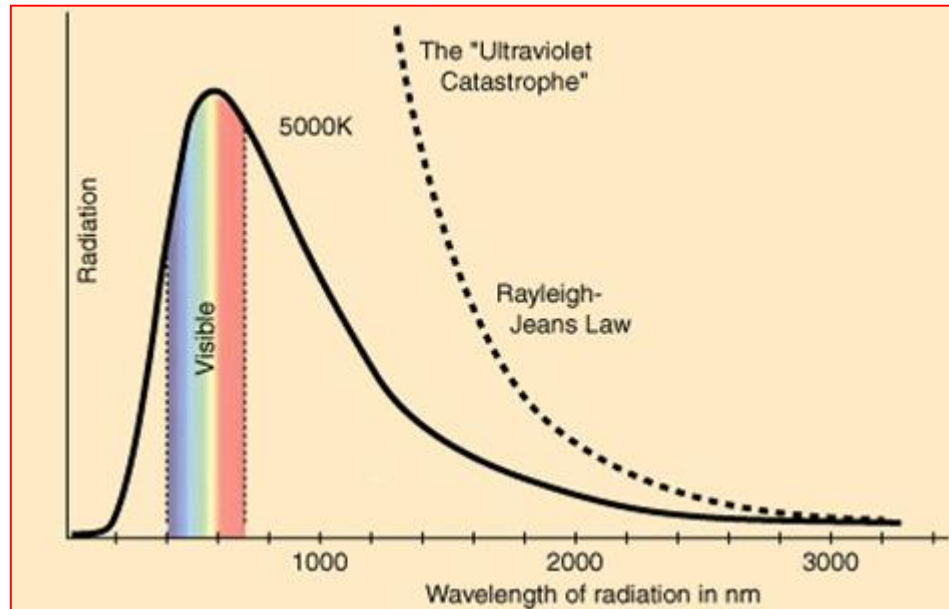
John W. Strutt  
"Lord Rayleigh"  
1842 - 1919  
Nobel de **1.904**

Intensidade monocromática ( $\lambda$ ) do  
corpo negro de temperatura  $T$  :

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2 \cdot c \cdot k \cdot T}{\lambda^4}$$



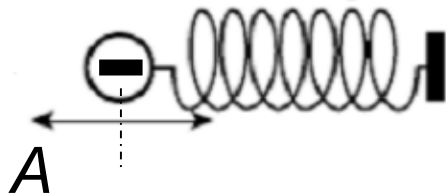
James H. Jeans  
1877 - 1946



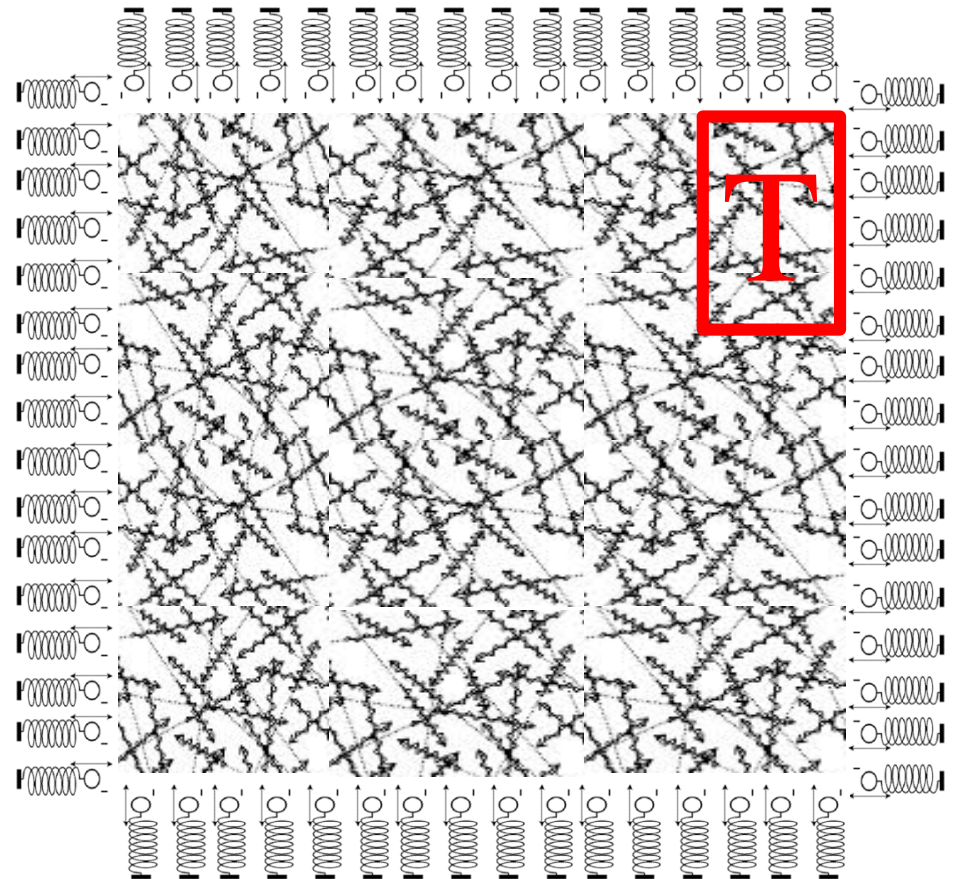
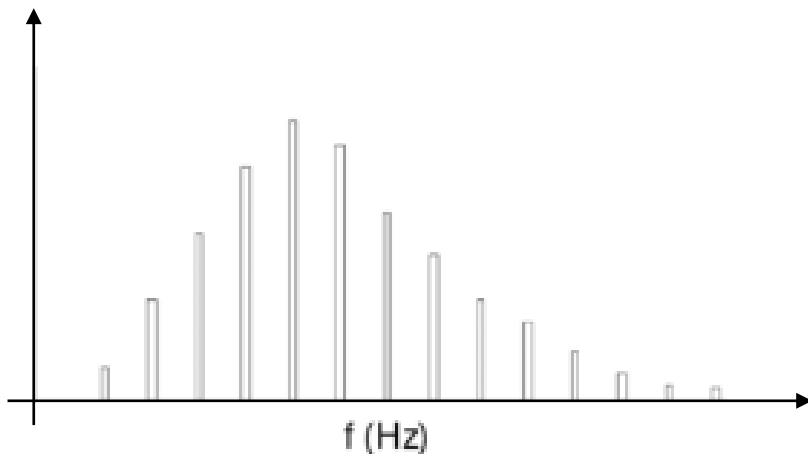
# Considerações quânticas

- Hipótese de que cada oscilador **não** poderia vibrar com qualquer energia.
- A energia de cada oscilador é diretamente proporcional a uma frequência **f** bem definida.

Energia  $\propto$  **f**



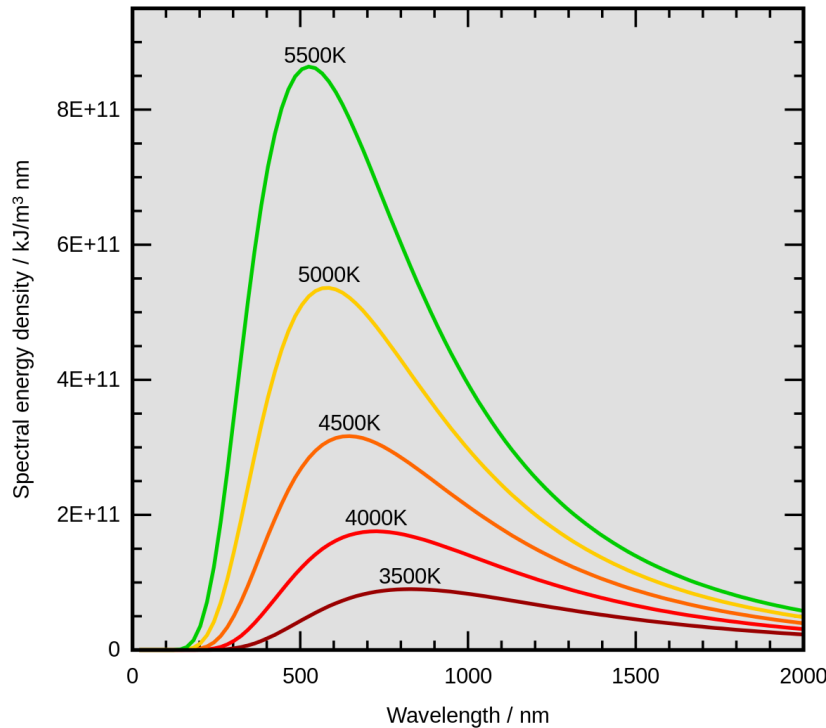
Espectro **discreto** de energia





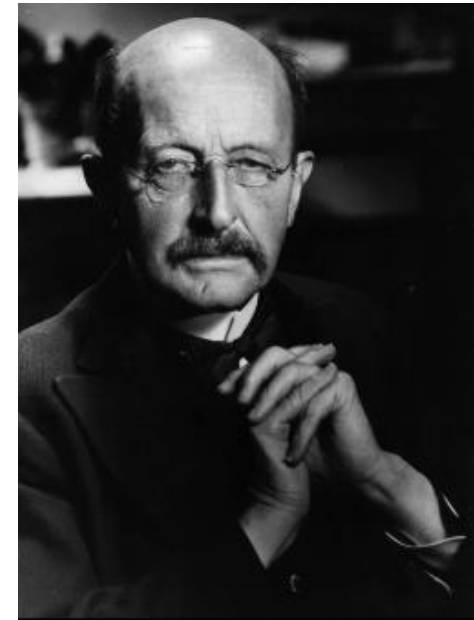
# Lei da Radiação de Planck

1900



Intensidade monocromática ( $\lambda$ ) do corpo negro de temperatura  $T$  :

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\lambda \cdot h \cdot c}{k \cdot T}} - 1}$$



Max K. E. L. Planck  
1858 - 1947  
Nobel de **1.918**

*“in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta”*

- Da superfície do corpo negro, cargas elétricas oscilantes emitem energia radiante, não de modo contínuo (como previa a física clássica), mas sim em porções, ou “*partículas*”, onde cada uma transporta uma energia “*E*” bem definida e igual a

$$E = h \cdot f$$

, onde *f* é a frequência da radiação emitida e *h* é a constante de Planck:

$$h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

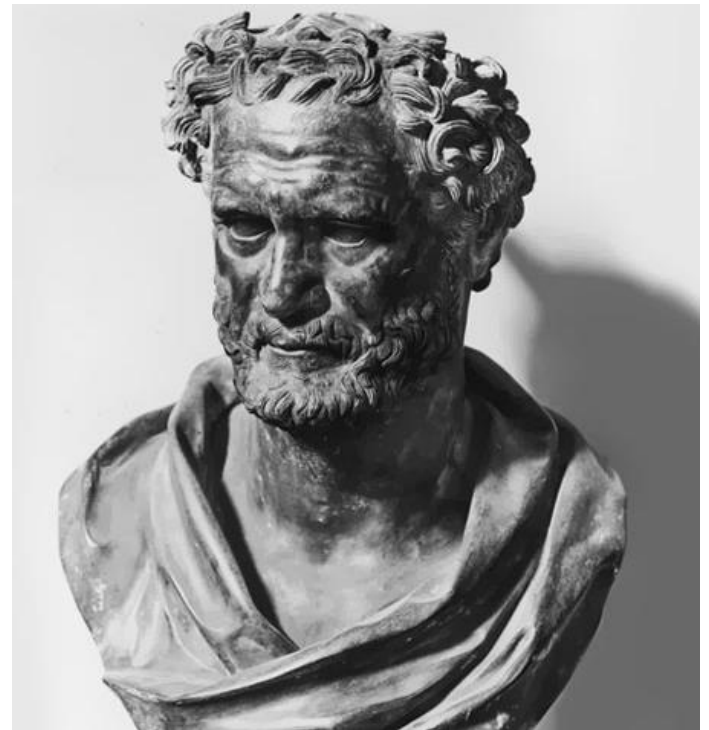
CODATA/2019

- Essas “partículas” foram denominadas “fótons”. A energia “*E*” de cada fóton é denominada quantum de ação.

# Modelos Atômicos

• Na antiguidade, alguns filósofos acreditavam que, dividindo-se a matéria em pedaços cada vez menores, chegar-se-ia em partículas invisíveis, indivisíveis, imutáveis, indestrutíveis e incriados. Elas receberam o nome de átomo. Foi quando surgiu, entre os filósofos gregos (Heráclito, Demócrito, Leucipo, Epicuro etc.), o termo atomismo.

• Para os atomistas existe o vazio, um espaço entre os átomos, que permite seu movimento, para que se agreguem e se separem. Caso não existisse o vazio, os átomos não poderiam se mover e, assim, formar tudo o que observamos.



Demócrito de Abdera  
(460 a.C. - 370 a.C.)

# Modelo de Dalton

- Em **1.808**, John Dalton propôs que a matéria seria formada por uma minúscula esfera maciça, impenetrável, indestrutível, indivisível e sem carga, chamada **átomo**.
- Átomos de diferentes elementos têm diferentes propriedades.
- Átomos de diferentes elementos podem se combinar para formar novas substâncias.
- Todos os átomos de um mesmo elemento são idênticos em propriedades como massa e tamanho.



1766 - 1844

ELEMENTS					
○	Hydrogen	1	⊕	Strontian	46
⊖	Azote	5	⊗	Barytes	68
●	Carbon	5	⊖	Iron	50
○	Oxygen	7	⊕	Zinc	56
⊕	Phosphorus	9	⊖	Copper	56
⊕	Sulphur	13	⊖	Lead	90
⊖	Magnesia	20	⊖	Silver	190
⊖	Limé	24	⊖	Gold	190
⊖	Soda	28	⊖	Platina	190
⊖	Potash	42	⊗	Mercury	167



“Modelo Atômico da Bola de Bilhar”



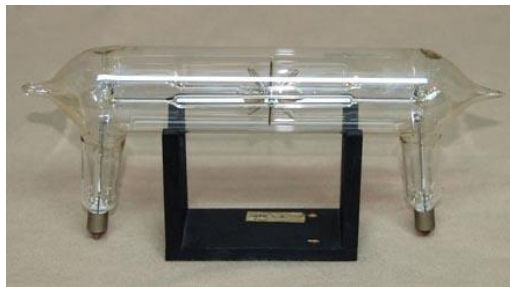
# O Modelo de Thomson

- Em **1.897**, Joseph John Thomson descobriu a relação **carga/massa** do elétron, realizando experimentos com tubo de raios catódicos.
- Em **1.904**, propôs o modelo de uma esfera maciça de carga elétrica positiva, distribuída uniformemente no volume, que continha **corpúsculos** (**elétrons**) de carga negativa, também distribuídos uniformemente.



1856 - 1940  
Nobel de **1.906**

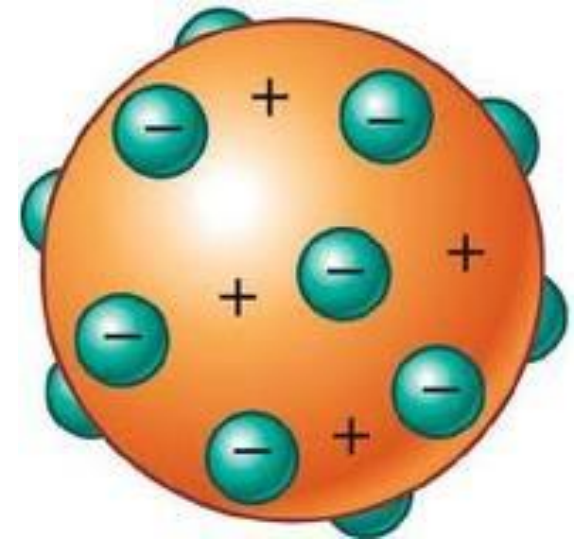
*“in recognition of the great merits of his theoretical and experimental investigations on the conduction of electricity by gases”.*



*Roda com pás sobre trilhos (partículas)*



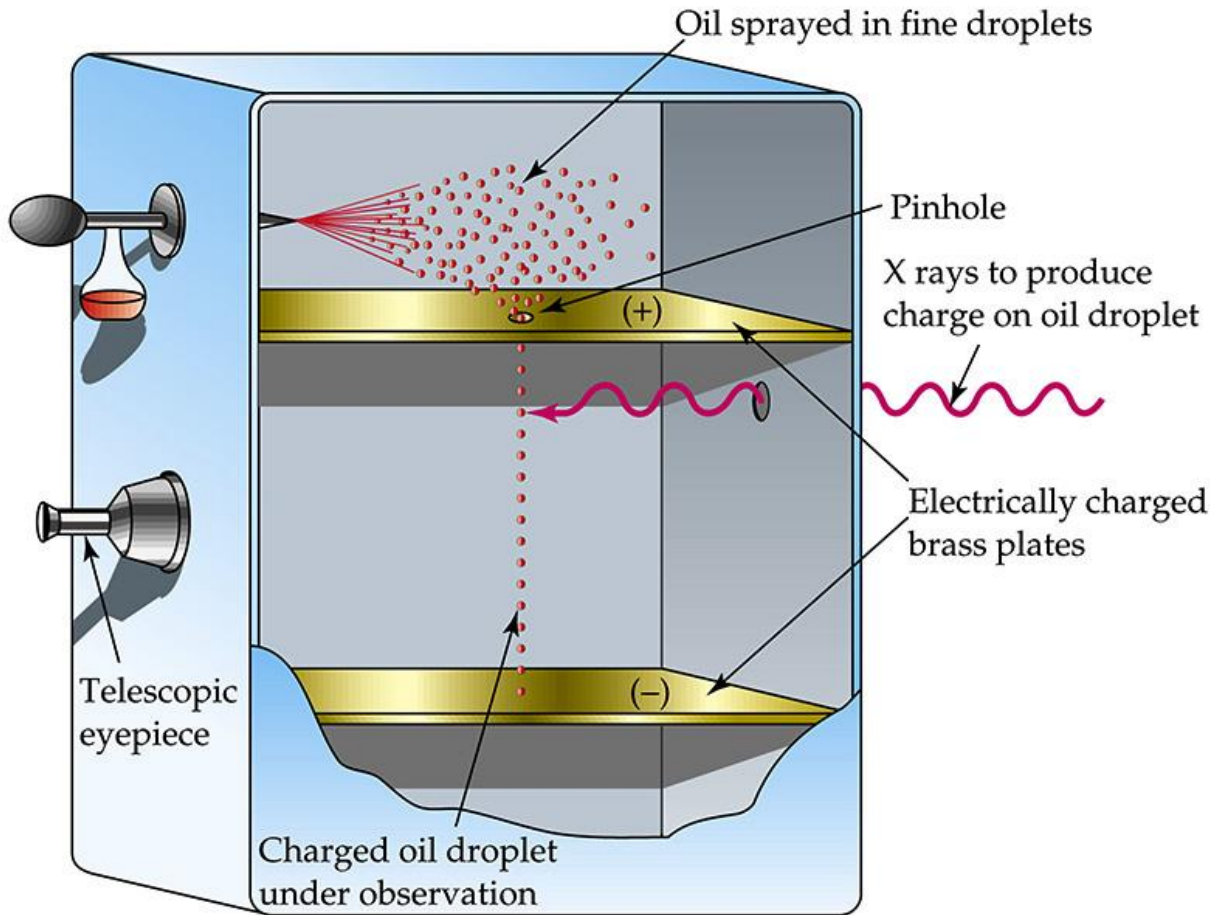
*Ampola de Crookes*



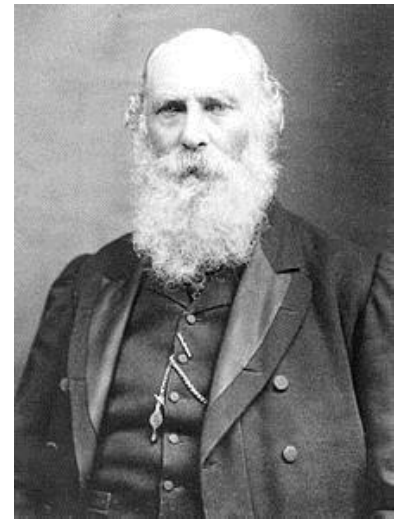
*“Modelo do Pudim de Passas”*

# Elétron (1.891)

“Unidade fundamental da eletricidade”



$$e (-) = 1,602176565(35) \times 10^{-19} \text{ C}$$



George J. Stoney  
1826 - 1911



Robert A. Millikan  
1868 - 1953  
Nobel de **1.923**

# Emissão Termoiônica



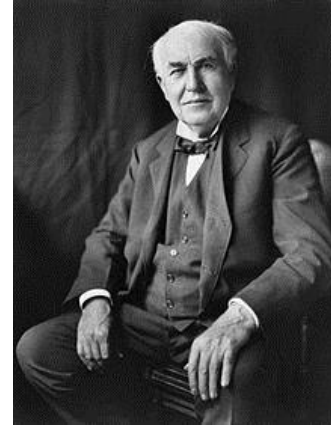
Alexandre E. Becquerel  
1820 - 1891

Efeito Fotovoltaico (1839) - **1853**



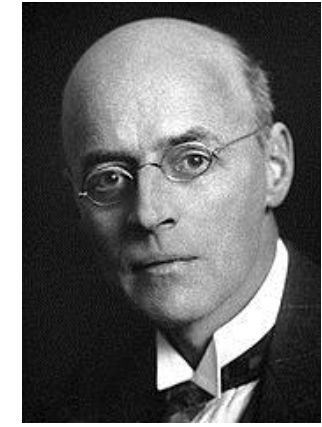
Frederick Guthrie  
1833 - 1886

**1873**



Thomas A. Edison  
1847 - 1931

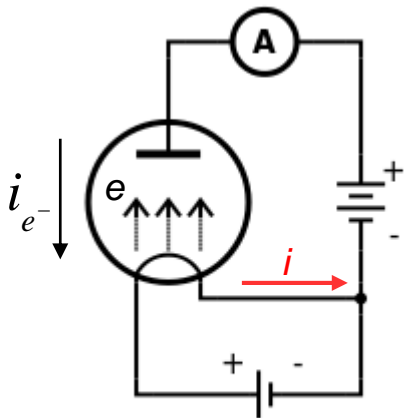
**1880**



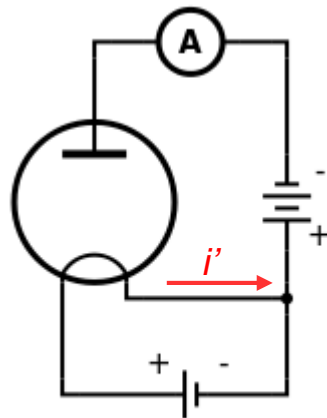
Owen W. Richardson  
1879 - 1959

Nobel de **1.928**

## • Efeito Edison

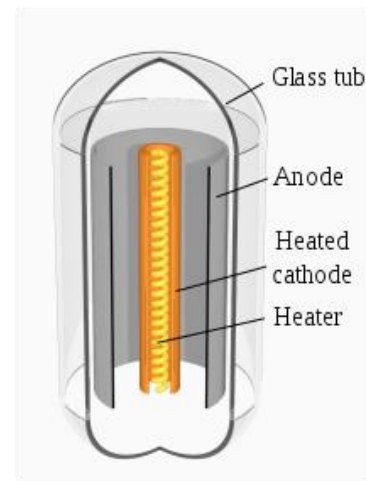


**Electron flow**



**No current**

## • Diodo de tubo de vácuo



Válvulas



• Diodo de estado sólido



Karl F. Braun  
1847 - 1931

Nobel de **1.909**

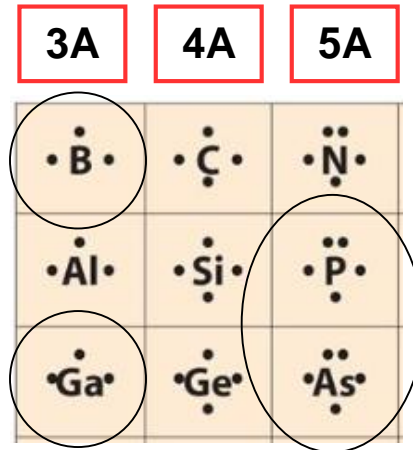
Condução unilateral (**1874**)



Greenleaf W. Pickard  
1877 - 1956

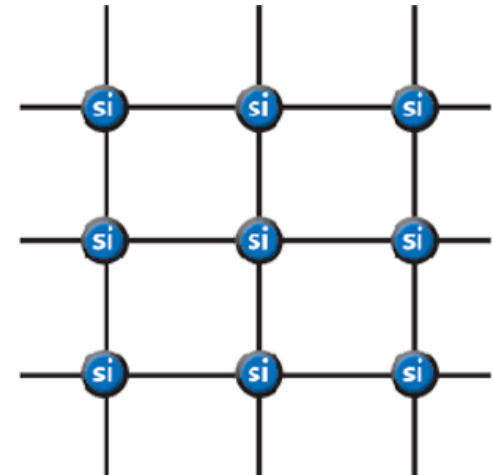
Detector de cristal de silício (**1903**)

• Diodo



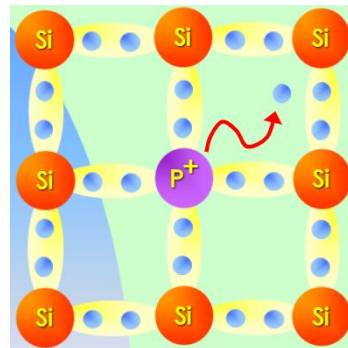
Elétrons de valência

Cristal de Silício  
(*isolante*)



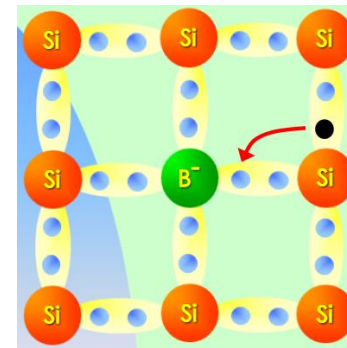
Dopagem  
(*impureza*)

Tipo N  
(*P, As ou Sb*)



Silício tipo N  
(catodo)  
(semicondutor)

Tipo P  
(*B, Ga ou In*)



Silício tipo P  
(anodo)  
(semicondutor)

# CLASSIFICAÇÃO PERIÓDICA DOS ELEMENTOS.

Com massas atômicas referidas ao isótopo 12 do Carbono

**TABELA PERIÓDICA DOS ELEMENTOS**

**ATENÇÃO:**

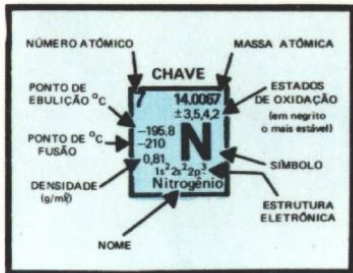
- O carbono 12 serve como referência às massas atômicas.
- Os elementos artificiais são apresentados em **côr verde**.
- São chamados: — representativos ou não de transição os elementos dos grupos — A (todos) B (somente 1B e 2B)
- transição simples: 3B até 8B
- transição interna: Terras-Raras (Lantanídeos (57 a 71) Actinídeos (89 a 103))

**ELEMENTOS DE TRANSIÇÃO**

1	2											18	19	20			
1.00797 H 1 Hidrogênio	4.0026 He 2 Hélio											18.9984 F 9 Fluor	19.9984 Ne 10 Neônio	20.183 Ne 10 Neônio			
3 Li 3 Lítio	4 Be 4 Berílio											5 B 5 Boro	6 C 6 Carbono	7 N 7 Nitrogênio	8 O 8 Oxigênio	9 F 9 Fluor	10 Ne 10 Neônio
11 Na 11 Sódio	12 Mg 12 Magnésio											13 Al 13 Alumínio	14 Si 14 Silício	15 P 15 Fósforo	16 S 16 Enxofre	17 Cl 17 Cloro	18 Ar 18 Argônio
19 K 19 Potássio	20 Ca 20 Cálcio	21 Sc 21 Escândio	22 Ti 22 Titânio	23 V 23 Vanádio	24 Cr 24 Cromo	25 Mn 25 Manganês	26 Fe 26 Ferro	27 Co 27 Cobalto	28 Ni 28 Níquel	29 Cu 29 Cobre	30 Zn 30 Zinco	31 Ga 31 Gálio	32 Ge 32 Germano	33 As 33 Arsênio	34 Se 34 Selênio	35 Br 35 Bromo	36 Kr 36 Criptônio
37 Rb 37 Rubídio	38 Sr 38 Estrôncio	39 Y 39 Ítrio	40 Zr 40 Zircônio	41 Nb 41 Nióbio	42 Mo 42 Molibdênio	43 Tc 43 Técneio	44 Ru 44 Rutênio	45 Rh 45 Ródio	46 Pd 46 Paládio	47 Ag 47 Prata	48 Cd 48 Cádmio	49 In 49 Índio	50 Sn 50 Estanho	51 Sb 51 Antimônio	52 Te 52 Telúrio	53 I 53 Iodo	54 Xe 54 Xenônio
55 Cs 55 Césio	56 Ba 56 Bário	57 La* 57 Lantânio	58 Ce 58 Célio	59 Pr 59 Praseodímio	60 Nd 60 Neodímio	61 Pm 61 Promécio	62 Sm 62 Samário	63 Eu 63 Európio	64 Gd 64 Gadolínio	65 Tb 65 Térbio	66 Dy 66 Disprósio	67 Ho 67 Hólmio	68 Er 68 Érbio	69 Tm 69 Túlio	70 Yb 70 Ítérbio	71 Lu 71 Lutécio	
87 Fr 87 Frâncio	88 Ra 88 Rádio	89 Ac* 89 Actínio	90 Th 90 Tório	91 Pa 91 Protactínio	92 U 92 Urânio	93 Np 93 Netúnio	94 Pu 94 Plutônio	95 Am 95 Americio	96 Cm 96 Cúrio	97 Bk 97 Berquélio	98 Cf 98 Califórnio	99 Es 99 Einstênio	100 Fm 100 Férmio	101 Md 101 Mendelévio	102 No 102 Nobélio	103 Lw 103 Lawrêncio	

**LEGENDA:**

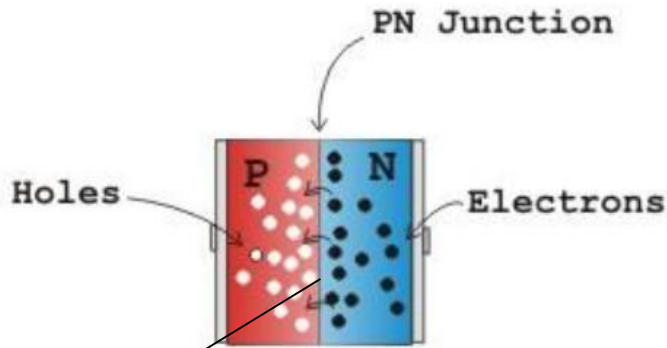
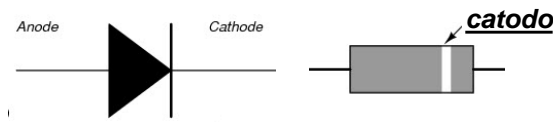
- Metals (Yellow)
- Não-Metals (Red)
- Artificiais (Green)
- Gases e Não-Metals (Light Blue)
- Semi-metals (Orange)
- Líquidos (Brown)



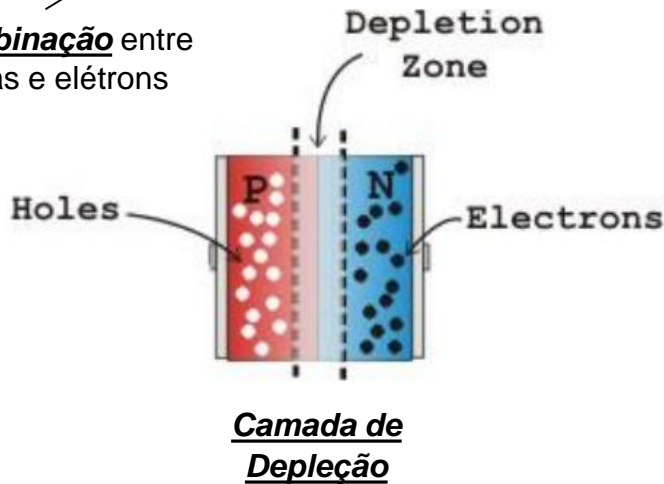
58 140,12 3,4 Ce 3 Célio	59 140,907 3,4 Pr 3 Praseodímio	60 144,24 3 Nd 3 Neodímio	61 (147) 3 Pm 3 Promécio	62 150,35 3,2 Sm 3 Samário	63 151,96 3,2 Eu 3 Európio	64 157,25 3 Gd 3 Gadolínio	65 158,924 3,4 Tb 3 Térbio	66 162,50 3 Dy 3 Disprósio	67 164,930 3 Ho 3 Hólmio	68 167,26 3 Er 3 Érbio	69 168,934 3,2 Tm 3 Túlio	70 173,04 3,2 Yb 3 Ítérbio	71 174,97 3,4 Lu 3 Lutécio
90 232,038 4 Th 4 Tório	91 (231) 5,4 Pa 5 Protactínio	92 238,03 6,5,4,3 U 6 Urânio	93 (237) 6,5,4,3 Np 6 Netúnio	94 (242) 6,5,4,3 Pu 6 Plutônio	95 (243) 6,5,4,3 Am 6 Americio	96 (247) 3 Cm 3 Cúrio	97 (247) 3 Bk 3 Berquélio	98 (249) 3 Cf 3 Califórnio	99 (254) 3 Es 3 Einstênio	100 (253) 3 Fm 3 Férmio	101 (256) 3 Md 3 Mendelévio	102 (254) 3 No 3 Nobélio	103 (257) 3 Lw 3 Lawrêncio



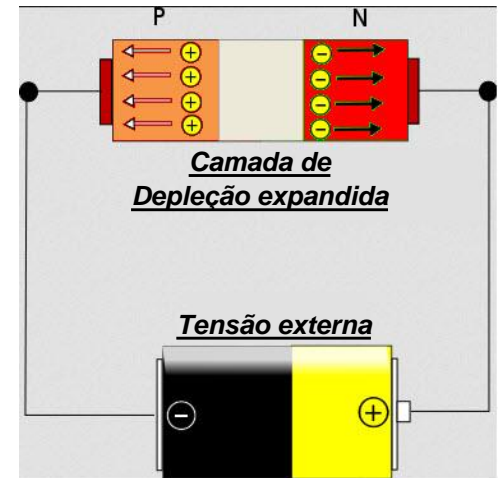
• **Diodo de junção** →  
(Russell S. Ohl - 1939)



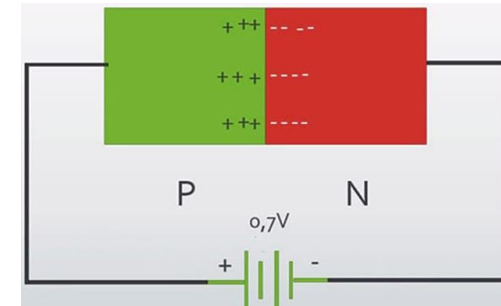
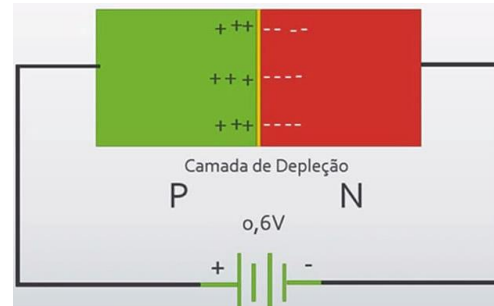
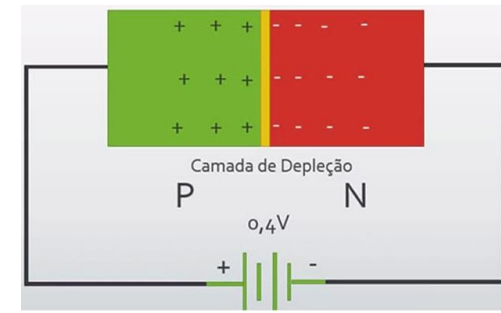
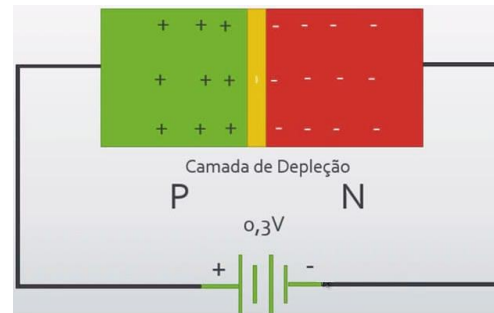
**Recombinação** entre lacunas e elétrons



**Polarização Inversa**



**Polarização Direta**



# E mais descobertas...

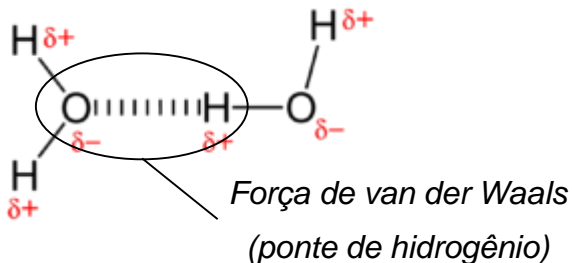
• Equação de estado de gases e líquidos

• Supercondutividade



Johannes D. van der Waals  
1837 - 1923  
Nobel de **1.910**

*"for his work on the equation of state for gases and liquids."*



1908



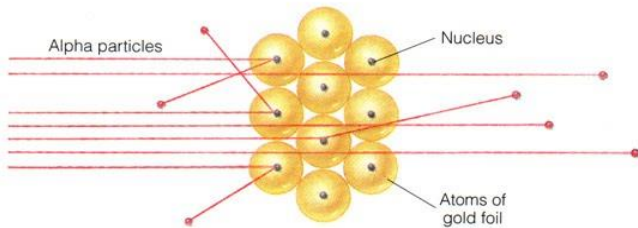
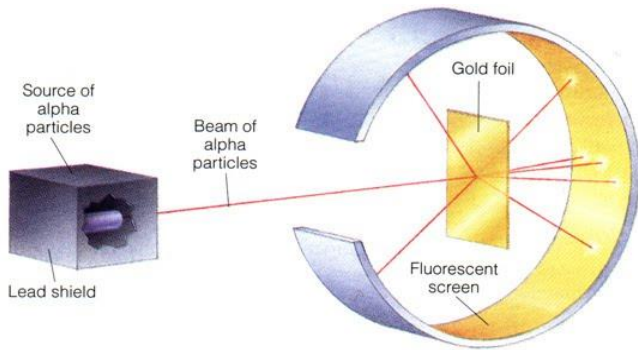
H. Kamerlingh Onnes  
1856 - 1923  
Nobel de **1.913**

*"his investigations on the properties of matter at low temperatures which led, inter alia, to the production of liquid helium".*

<i>Propriedades do Hélio Líquido</i>	<i>Hélio-4</i>	<i>Hélio-3</i>
Ponto de ebulição a 1atm	4,2K	3,2K
Temperatura crítica	5,2K	3,3K

# O Modelo de Rutherford

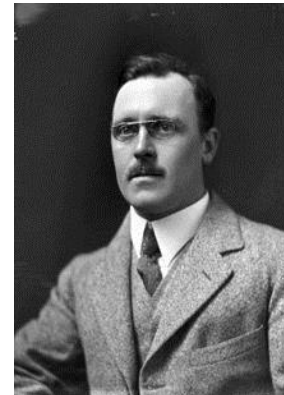
• As bases da física nuclear foram lançadas pelas experiências de Ernest Rutherford. Uma das inúmeras experiências realizadas ( $\approx 1.909$ ), foi a que demonstrava o espalhamento das **partículas alfa** (núcleos de Hélio) por uma folha fina de ouro.



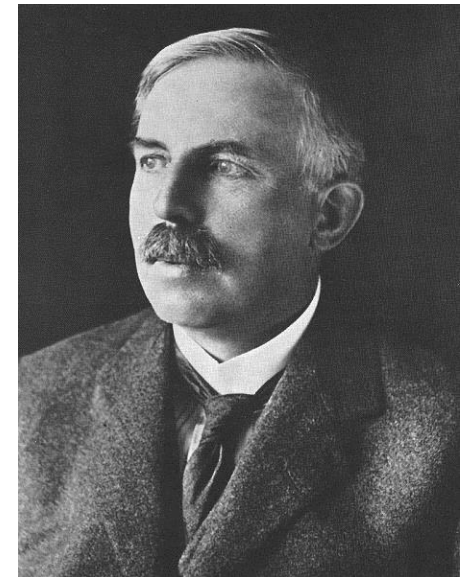
*Experimento de Geiger – Marsden*  
1908 - 1913



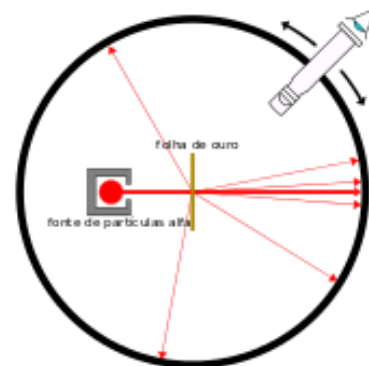
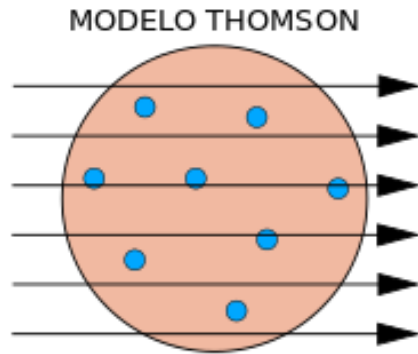
Johannes W. Geiger  
1882 - 1945



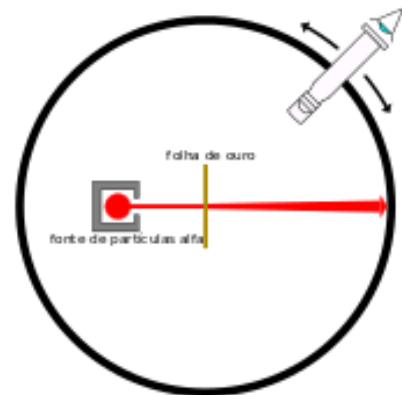
Ernest Marsden  
1889 - 1970



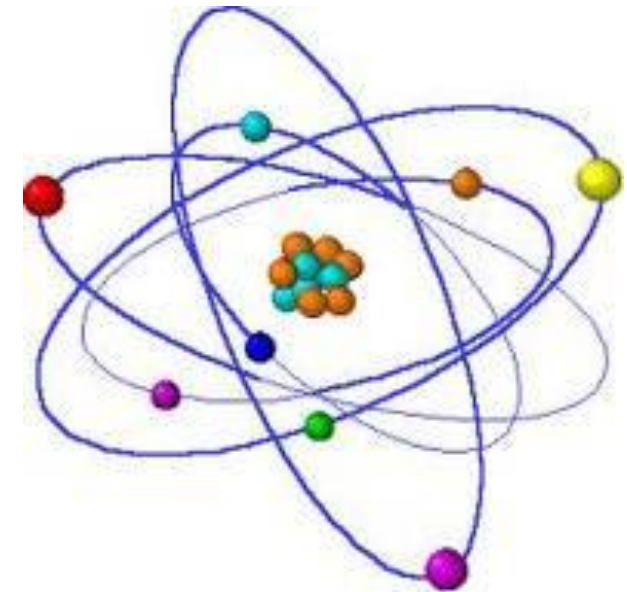
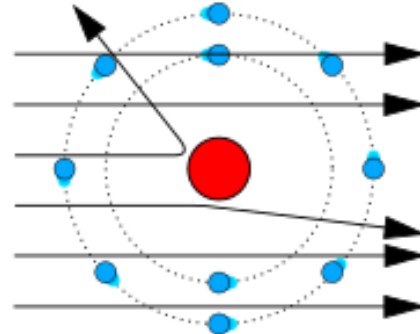
1871 - 1937  
Nobel de Química **1.908**  
Radioatividade



RESULTADO OBSERVADO



MODELO RUTHERFORD

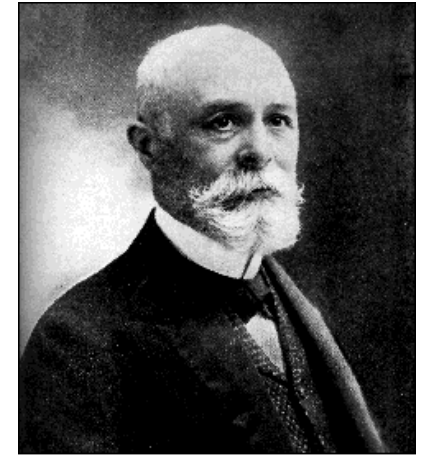
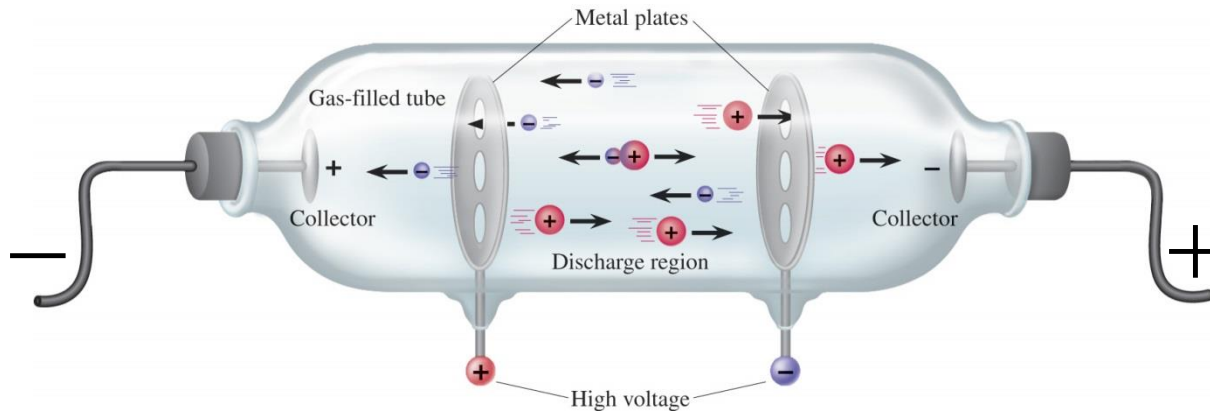


*Modelo planetário do átomo*

- Esta foi a base experimental do modelo atômico do chamado **átomo nucleado**, onde elétrons orbitavam um núcleo de carga positiva.
- Em **1.911**, Ernest Rutherford propôs o modelo de átomo com **movimentos planetários**. Esse modelo foi aperfeiçoado por **Niels Bohr**, demonstrando, também, a natureza das partículas alfa como núcleos de **Hélio** (**He**).



# Próton ( $\approx 1.920$ ) "primeiro"



G. Eugen Goldstein  
1850 - 1930

Em **1.886**, usando um tubo de vácuo dotado de placas perfuradas eletrizadas, Goldstein descobriu que:

- Para diferentes gases existem relações  $q/m$  **positivas** e variadas (**raios canais** ou **anódicos**);
- A **maior** das relações  $q/m$  refere-se ao Hidrogênio atômico (H).

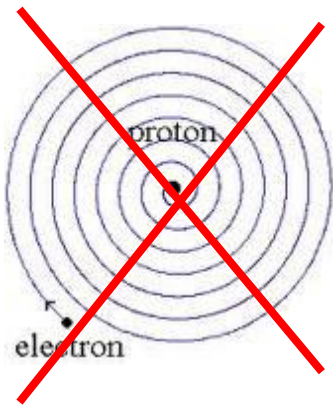
$$massa_{próton} = 1,672621777(74) \times 10^{-27} \text{kg}$$



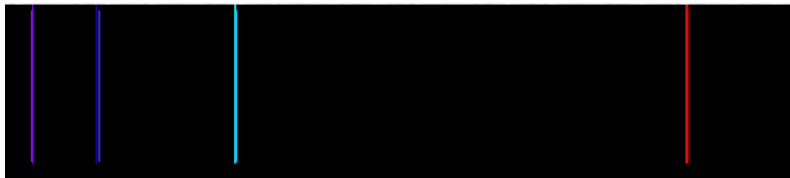
Ernest Rutherford  
1871 - 1937

# O Modelo de Bohr

- A teoria orbital de Rutherford encontrou uma dificuldade teórica baseada na *Teoria Eletromagnética de Maxwell*.
- O movimento do elétron girando ao redor de um núcleo de carga positiva geraria uma perda de energia devido à emissão constante de radiação. O elétron vai se aproximar do núcleo num movimento em espiral e cair sobre ele.



Resultado esperado  
pela Teoria de Maxwell



Resultado **experimental**  
para as linhas de emissão do  
átomo de **Hidrogênio**

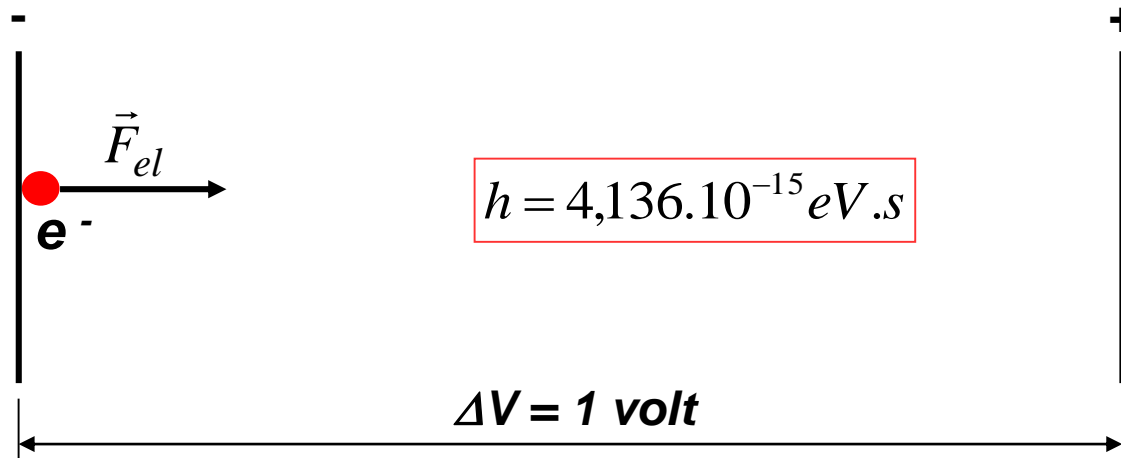


Niels H. D. Bohr  
1885 - 1962  
Nobel de **1.922**

*"for his services in the investigation of the structure  
of atoms and of the radiation emanating from them."*

- Conhecendo outra unidade de energia:

**“Elétron-volt”**



$$U = q \times \Delta V = E_{Cin} = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

$$q = 1,602 \times 10^{-19} C = e$$

$$U = 1V \times 1,602 \times 10^{-19} C = 1,602 \times 10^{-19} [C \times V] \rightarrow [J]$$

$$\therefore, 1eV \rightarrow 1,602 \times 10^{-19} J$$

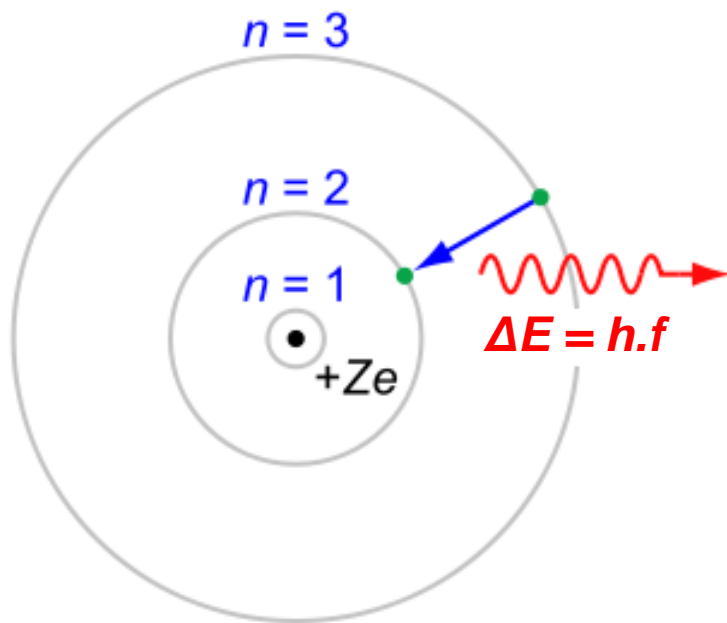


*Física  
Atômica e  
Molecular*

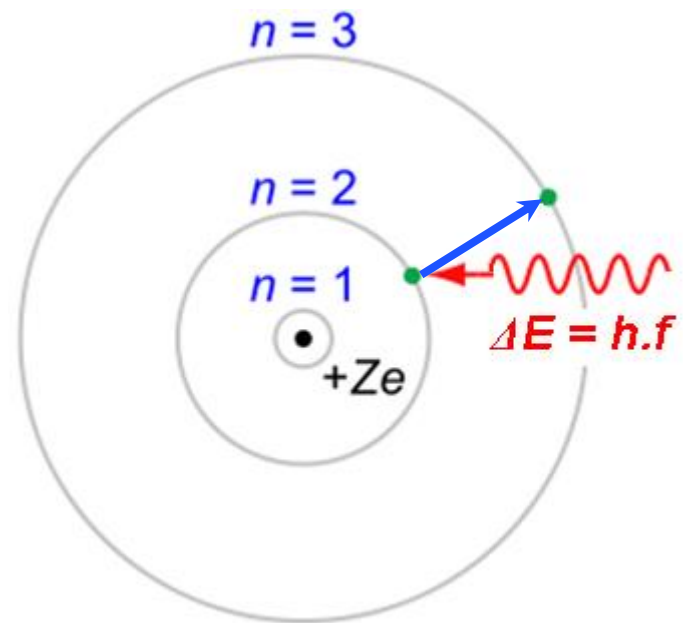
$$h = 6,62607015 \times 10^{-34} J.s$$

$$h = 4,136.10^{-15} eV.s$$

- Entre 1.912 e 1.920, Bohr desenvolve um modelo atômico que, *grosso modo*, juntava a teoria atômica de **Rutherford** com a teoria quântica de **Max Planck**.
- Ao girar em torno de um núcleo, os elétrons descreveriam órbitas específicas em níveis energéticos bem definidos (os **estados estacionários**).
- Haveria a emissão ou absorção de **pacotes** discretos de energia, chamados **“QUANTA”**, **somente quando o elétron mudasse de órbita**.



$$\Delta E_{emissão} = h.f = -(E_f - E_i)$$



$$\Delta E_{absorção} = h.f = E_f - E_i$$



- As órbitas permitidas dependeriam de valores quantizados (discretos) de **momento angular orbital**,  $\underline{L}$ , de acordo com a equação:

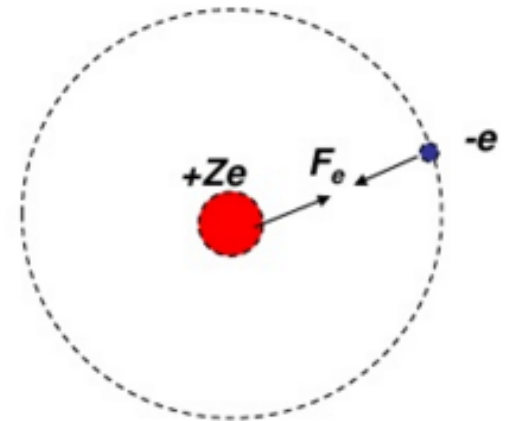
$$L = n.\hbar = n.\frac{h}{2.\pi}$$

onde  $n = 1, 2, 3, \dots$  é chamado de **Número Quântico Principal** e  $\hbar$  é a **constante de Planck**.

Segue, abaixo, um desenvolvimento do modelo de Bohr, que demonstra os níveis de energia no hidrogênio atômico observados experimentalmente:

### ***Física Clássica + Física Quântica***

- O elétron mantém-se em órbitas **circulares** pela ação de forças eletrostáticas, isto é, a **força eletrostática** faz o papel da **resultante centrípeta**:



$$\frac{k \cdot q_e^2}{r_e^2} = \frac{m_e \cdot v_e^2}{r_e} \quad (1) \quad k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \quad \left\{ \begin{array}{l} q_e = \text{carga do elétron} \\ m_e = \text{massa do elétron} \\ k = \text{constante eletrostática} \end{array} \right.$$

- Utilizando a expressão da energia total, temos:

$$E = E_{\text{cinética}} + E_{\text{pot.eletr.}} = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v_e^2 - \frac{k \cdot q_e^2}{r_e} \quad (2)$$

- Substituindo (1) em (2), tem-se:  $E = -\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v_e^2$  e  $E = -\frac{k \cdot q_e^2}{2 \cdot r_e}$

- Utilizando um pouco de álgebra e lembrando que  $L = m \cdot v \cdot r$  e  $L = n \cdot h / 2 \cdot \pi$ , resulta que (resolução no eslaide seguinte):

$$E_n = -2 \cdot \pi^2 \cdot k^2 \cdot \left( \frac{m_e \cdot q_e^4}{h^2} \right) \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{m_e \cdot q_e^4}{8 \cdot h^2 \cdot \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad \left\{ \begin{array}{l} m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} \\ q_e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} \\ h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s} \\ \epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \end{array} \right.$$

$$E = -\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v_e^2$$

(1)

$$E = -\frac{k \cdot q_e^2}{2 \cdot r_e}$$

(2)

$$L = m_e \cdot v_e \cdot r_e$$

(3)

$$L = n \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi}$$

(4)

$$(3) = (4) \quad m_e \cdot v_e \cdot r_e = n \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi} \rightarrow v_e = n \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi \cdot m_e \cdot r_e} \quad (5)$$

$$(5) \text{ em } (1) \quad E = -\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot \left( \frac{h}{2 \cdot \pi \cdot m_e \cdot r_e} \cdot n \right)^2 \rightarrow E = -\frac{m_e \cdot h^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot m_e^2 \cdot r_e^2} \cdot n^2 \quad (6)$$

$$(2) \quad r_e = -\frac{k \cdot q_e^2}{2 \cdot E} \quad (2) \text{ em } (6) \quad E = -\frac{h^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot m_e \cdot \left( -\frac{k \cdot q_e^2}{2 \cdot E} \right)^2} \cdot n^2$$

$$E = - \frac{h^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot m_e \cdot \left( -\frac{k \cdot q_e^2}{2 \cdot E} \right)^2} \cdot n^2$$

$$E = - \frac{h^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot m_e \cdot \frac{k^2 \cdot q_e^4}{4 \cdot E^2}} \cdot n^2 \rightarrow \cancel{E} = - \frac{h^2 \cdot \cancel{E^2}}{2 \cdot \pi^2 \cdot m_e \cdot k^2 \cdot q_e^4} \cdot n^2$$

$$E = - \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot m_e \cdot k^2 \cdot q_e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}$$

$$E = - \frac{\cancel{2} \cdot \cancel{\pi^2} \cdot m_e \cdot q_e^4}{16 \cdot \cancel{\pi^2} \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \rightarrow E = - \frac{m_e \cdot q_e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

constante

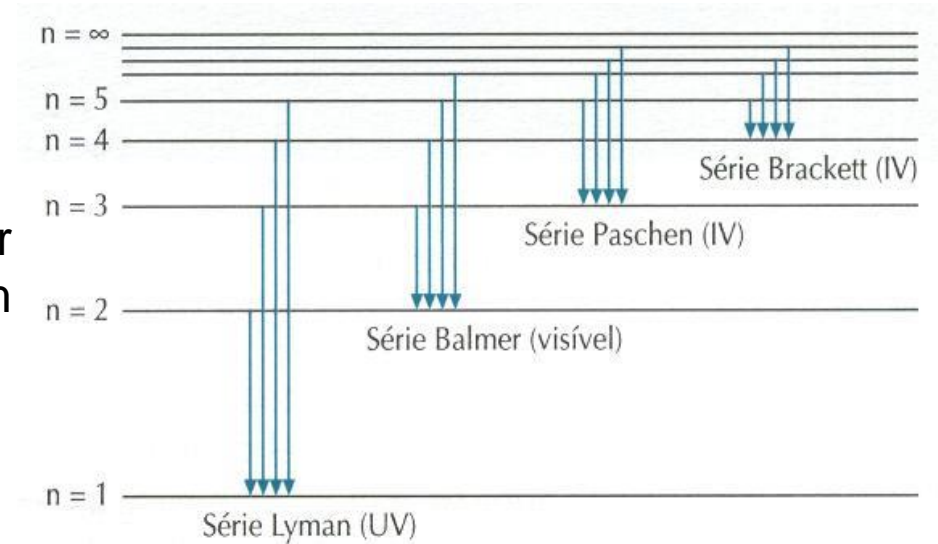


- Finalmente, a equação para calcular os **níveis de energia** para o átomo de Hidrogênio será:

$$E_n = -13,6 \cdot \frac{1}{n^2} (eV)$$

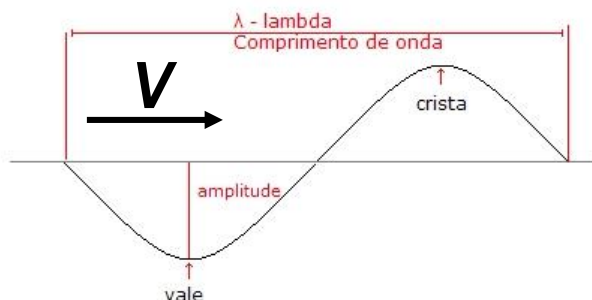
- O modelo inicial do **átomo de Bohr** explica bem o comportamento do átomo de hidrogênio, mas é insuficiente para átomos com **mais de um elétron**.

- Além disso, se as hipóteses de Bohr estiverem corretas, outras séries deveriam ser descobertas.



- Como **atividade em grupo**, determinar as expressões gerais para o raio atômico, a velocidade orbital, a frequência e o período do elétron do átomo de **Hidrogênio**, em particular, para seu estado de mais baixa energia (isto é, para **n=1**).

# Equação Fundamental da Ondulatória



$$v = \lambda \cdot f$$

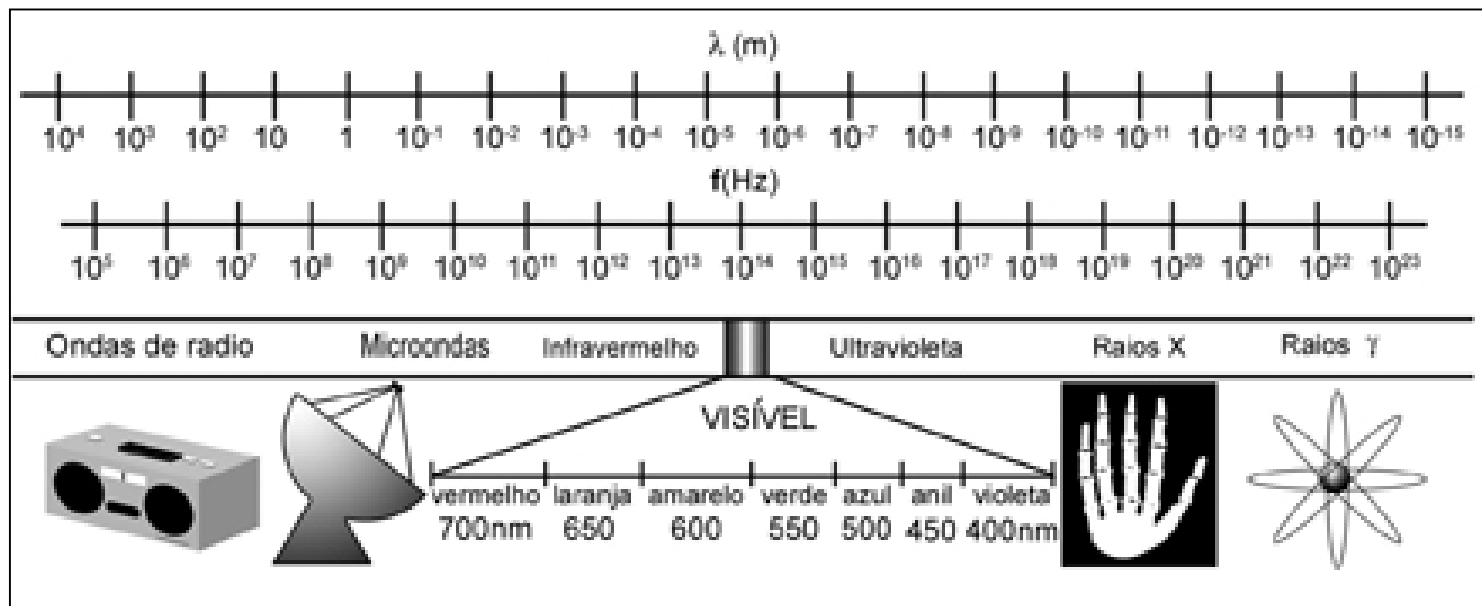
$V$  = velocidade da onda  
 $\lambda$  = comprimento da onda  
 $f$  = frequência da onda

Velocidade da luz  
(vácuo)



$$C_{\text{vácuo}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

## Espectro Eletromagnético



# E a série de Balmer?

- Transição do nível  $n$  até o nível  $2$ :

$$\Delta E_{emissão} = h \cdot f = -(E_f - E_i) \quad E_n = \frac{-13,6}{n^2} (eV)$$

- Determinar os comprimentos de onda para as linhas de emissão e compará-los com os valores experimentais.

$$h = 4,136 \cdot 10^{-15} eV \cdot s$$

$$c = 2,998 \cdot 10^8 m/s$$

Cor	$\lambda$ (nm)
Vermelho (3 → 2)	656,30
Azul claro (4 → 2)	486,14
Azul (5 → 2)	434,05
Violeta 1 (6 → 2)	410,17
Violeta 2 (7 → 2)	397,0
Violeta 3 ( $\infty$ → 2)	364,6

# E outras séries?

- Transição do nível  $n$  até o nível  $1$ :

“Cor”	$\lambda$ (nm)
2 → 1	121,6
3 → 1	102,6
4 → 1	97,2
$\infty$ → 1	91,2

“Região do espectro eletromagnético, referente a emissões no **ultravioleta** (1.906 - 1.914).”

$$n_{\infty} \rightarrow \lambda = 91,175 \text{ nm}$$



Victor Schumann  
1841 - 1913



Theodore Lyman  
1874 - 1954

- Transição do nível **3** até o nível **2**:  $\Delta E_{emissão} = h.f = -(E_f - E_i)$

$$c = \lambda.f$$

$$E_n = \frac{-13,6}{n^2} (eV)$$

$$h = 4,136.10^{-15} eV.s$$

$$c = 2,998.10^8 m/s$$

$$h.f = +E_i - E_f$$

$$4,136.10^{-15} \cdot \frac{2,998.10^8}{\lambda} = +13,6 \cdot \left( -\frac{1}{n_i^2} + \frac{1}{n_f^2} \right)$$

$$4,136.10^{-15} \cdot \frac{2,998.10^8}{\lambda} = +13,6 \cdot \left( -\frac{1}{3^2} + \frac{1}{2^2} \right) = 13,6 \cdot \frac{(-4 + 9)}{36}$$

+5

$$\lambda = \frac{4,136.2,998.36}{13,6.5} \cdot 10^{-15} \cdot 10^8 \rightarrow \lambda = 6,565.10^{-7} m$$

$$\lambda_{3 \rightarrow 2} = 656,5 nm$$

- Transição do nível  $n$  até o nível **3**:

“Cor”	$\lambda$ (nm)
4 $\rightarrow$ 3	1875
5 $\rightarrow$ 3	1282
6 $\rightarrow$ 3	1094
$\infty \rightarrow$ 3	820,4

“Região do espectro eletromagnético, referente a emissões no **infravermelho mais energético** (1.908).”

$$n_{\infty} \rightarrow \lambda = 820,4 \text{ nm}$$



Louis K. H. F. Paschen  
1865 - 1947

- Transição do nível  $n$  até o nível **4**:

“Região do espectro eletromagnético, referente a emissões no **infravermelho menos energético** (1.922).”

$$n_{\infty} \rightarrow \lambda = 1.458 \text{ nm}$$



Frederick S. Brackett  
1896 - 1988



- Transição do nível ***n*** até o nível **5**:

“Região do espectro eletromagnético, referente a emissões no ***infravermelho menos energético ainda*** (1.924).”

$$n_{\infty} \rightarrow \lambda = 2.279 \text{ nm}$$



August H. Pfund  
1879 - 1949

- Transição do nível ***n*** até o nível **6**:

“Região do espectro eletromagnético, referente a emissões no ***infravermelho bem menos energético ainda*** (1.953).”

$$n_{\infty} \rightarrow \lambda = 3.282 \text{ nm}$$

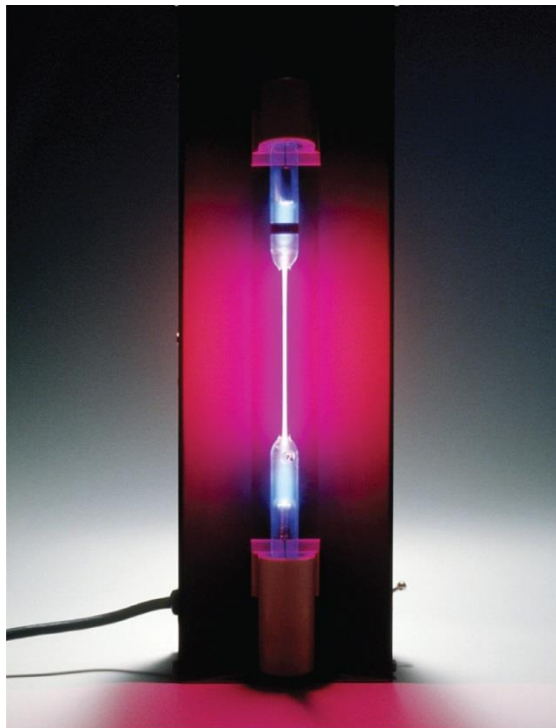


Curtis J. Humphreys  
1898 - 1986

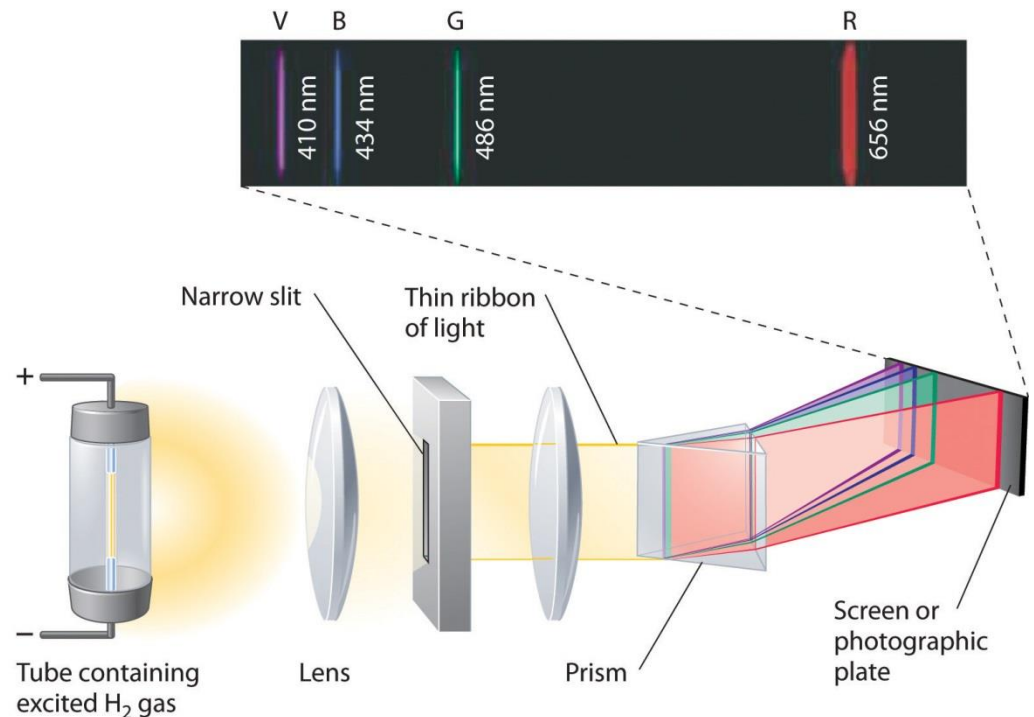
- Transição do nível ***n*** até o nível **7**: Hansen, Peter; Strong, John (1973)

# Atividade proposta

- Calcular os comprimentos de onda, em **nm**, da série de **Balmer** do átomo de hidrogênio, correspondentes às transições dos níveis  $n = 3, 4, 5$  e  $6$  para o nível  $n = 2$ . Os comprimentos de onda encontrados pertencem a qual região do espectro eletromagnético?

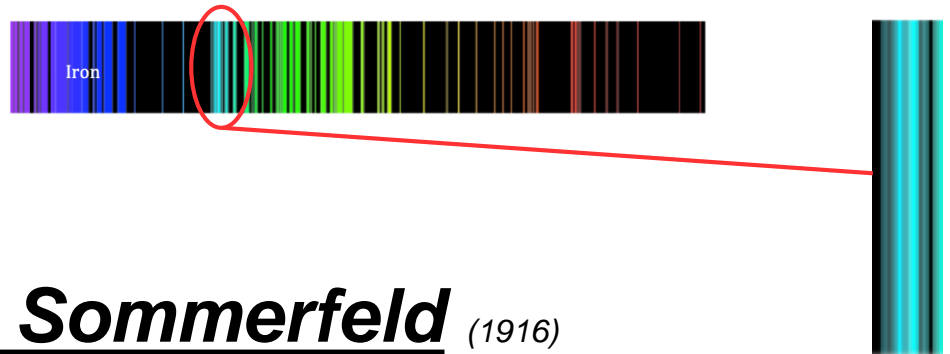


(a)

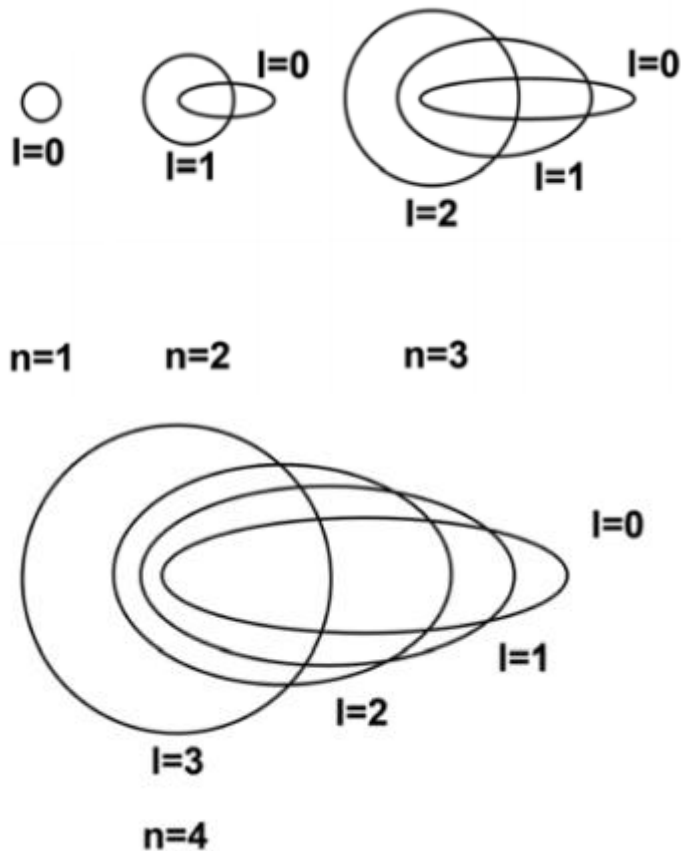


(b)

Com o advento de instrumentos com maior precisão, descobriu-se que as raias espectrais eram formadas não por linhas, mas por várias delas em torno de uma mesma posição.



## O Modelo de Sommerfeld (1916)



Um elétron, em uma mesma órbita, apresenta energias **diferentes**.



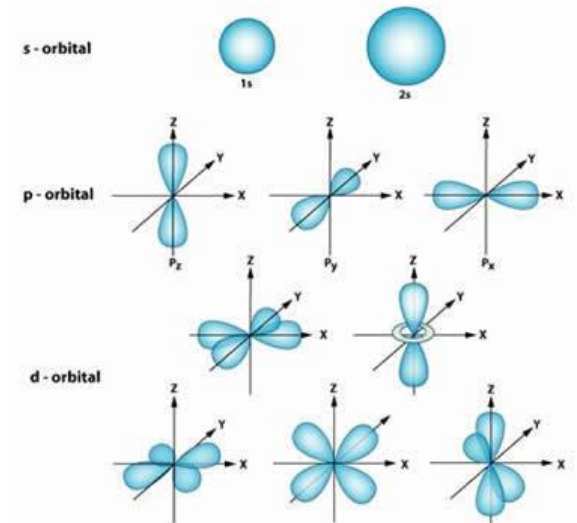
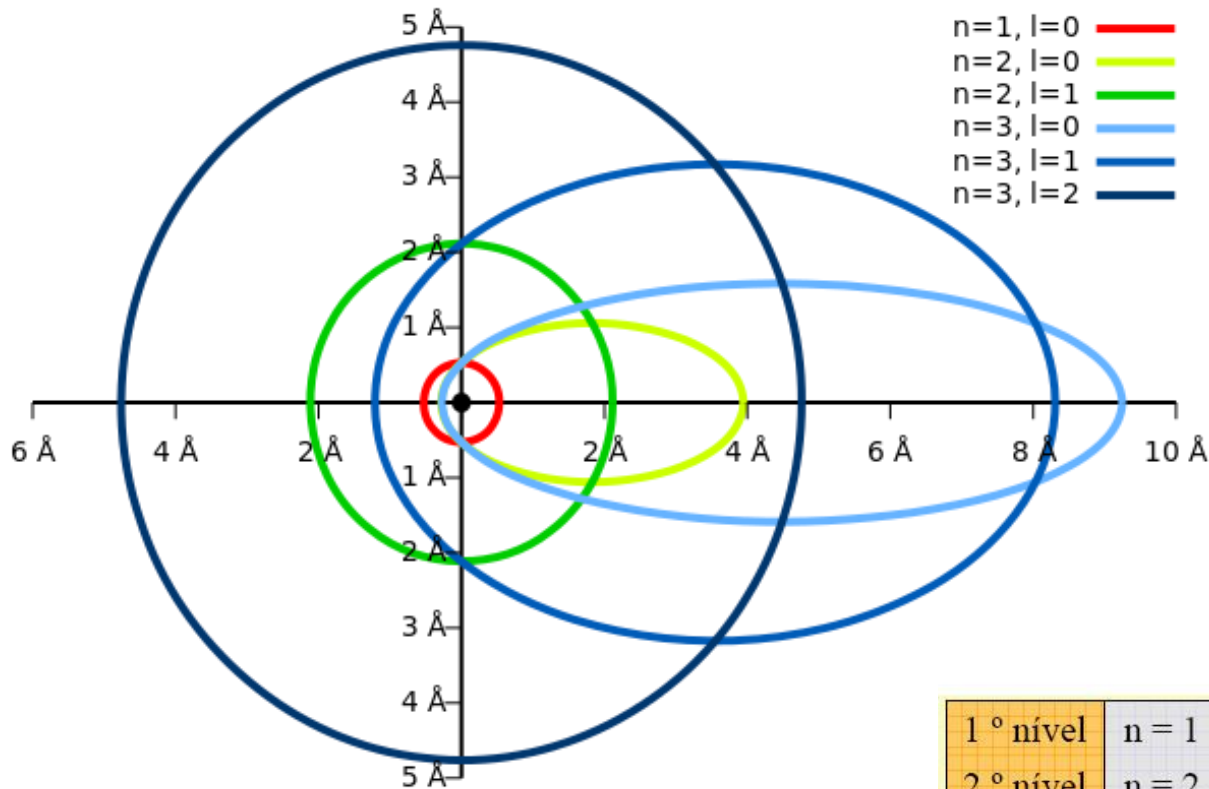
Assim, as órbitas **não** deveriam ser só **circulares**, mas, poderiam ser, também, **elípticas**!!



Arnold J. W. Sommerfeld  
1868 - 1951

# O Modelo de Sommerfeld

## Número Quântico de Momento Angular (ou Azimutal ou Secundário) ( $l$ )



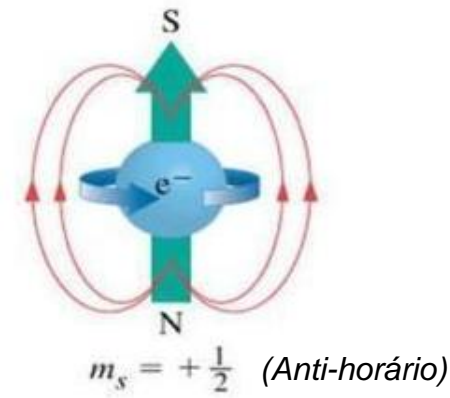
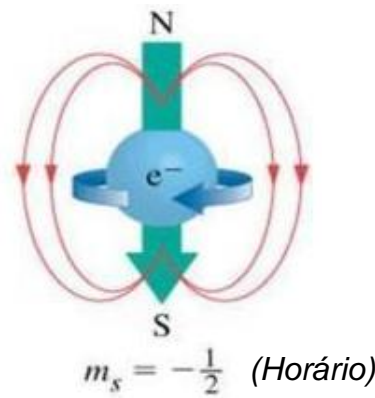
		SUBNÍVEIS						
		Conhecidos			Teóricos			
1º nível	$n = 1$	1s						
2º nível	$n = 2$	2s	2p					
3º nível	$n = 3$	3s	3p	3d				
4º nível	$n = 4$	4s	4p	4d	4f			
5º nível	$n = 5$	5s	5p	5d	5f	5g		
6º nível	$n = 6$	6s	6p	6d	6f	6g	6h	
7º nível	$n = 7$	7s	7p	7d	7f	7g	7h	7i

## Número Quântico Magnético ( $m_\ell$ )

Relationship between Quantum Numbers			
Orbital	Values	Number of Values for $m_\ell^{[4]}$	Electrons per subshell
s	$\ell = 0, m = 0$	1	2
p	$\ell = 1, m = -1, 0, +1$	3	6
d	$\ell = 2, m = -2, -1, 0, +1, +2$	5	10
f	$\ell = 3, m = -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$	7	14
g	$\ell = 4, m = -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4$	9	18

## Número Quântico de Spin ( $m_s$ )

(A. Sommerfeld)



Wolfgang E. Pauli  
1900 - 1958  
Nobel de **1.945**

"decisive contribution through his discovery of a new law of Nature, the exclusion principle or Pauli principle"

Números que determinam o estado quântico de um elétron →  $n, \ell, m_\ell, s$

"É impossível para dois elétrons terem os mesmos valores, **ao mesmo tempo**, para os quatro números quânticos."



# Mecânica Quântica

## • Personalidades e Contribuições:

- Teoria quântica
- Bases da mecânica ondulatória
- Equação de onda → Função de onda
- Mecânica matricial    • Teoria do Campo Quântico



Erwin R. J. A. Schrodinger  
1887 - 1961  
Nobel de **1.933**

*"for the formulation of  
the Schrödinger equation"*



Werner K. Heisenberg  
1901 - 1976  
Nobel de **1.932**

*"for the creation  
of quantum mechanics"*



Max Born  
1882 - 1970  
Nobel de **1.954**

*"fundamental research in  
quantum mechanics,  
especially in the  
statistical interpretation  
of the wave function"*

# Exercícios

1. (ITA 99) A tabela abaixo mostra os níveis de energia de um átomo do elemento X que se encontra no estado gasoso.

$E_0$	0
$E_1$	7,0 eV
$E_2$	13,0 eV
$E_3$	17,4 eV
ionização	21,4 eV

Dentro as possibilidades abaixo, a energia que poderia restar a um elétron com energia de 15eV, após colidir com um átomo de X seria de:

a) 0 eV   b) 4,4 eV   c) 16,0 eV   d) 2,0 eV   e) 14,0 eV

2. (ITA 2006) O átomo de hidrogênio no modelo de Boh é constituído de um elétron de carga  $-e$  e massa  $m$ , que se move em órbitas circulares de raio  $r$  em torno do próton, sob a influência da atração coulombiana. Sendo  $a_0$  o raio de Bohr, determine o período orbital para o nível  $n$ , envolvendo a permissividade do vácuo.

- 3. Suponha que o átomo de hidrogênio emita energia quando seu elétron sofre uma transição entre os estados inicial  $n=4$ , e final  $n=1$ . Qual é a energia do fóton emitido? Qual é a frequência da radiação emitida (Constante de Planck =  $6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s)**
- 4. (ITA 2002) Sabendo que um fóton de energia 10,19 eV excitou o átomo de hidrogênio do estado fundamental ( $n=1$ ) até o estado  $p$ , qual deve ser o valor de  $p$ ? Justifique.**
- 5. (ITA 2003) Utilizando o modelo de Bohr para o átomo, calcule o número aproximado de revoluções efetuadas por um elétron no primeiro estado excitado do átomo de hidrogênio, se o tempo de vida do elétron, nesse estado excitado, é de  $10^{-8}$  s. São dados: o raio da órbita do estado fundamental é de  $5,3 \cdot 10^{-11}$  m e a velocidade do elétron nessa órbita é de  $2,2 \cdot 10^6$  m/s**
- 6. Determine a expressão para a velocidade do elétron na órbita em função do número  $n$  do nível.**

- Transição do nível **1** até o nível **p**:

$$\Delta E_{\text{absorção}} = h \cdot f = E_f - E_i$$

$$E_n = \frac{-13,6}{n^2} (eV)$$

$$10,19 = -\frac{13,6}{p^2} + \frac{13,6}{1^2}$$

$$-3,41 = -\frac{13,6}{p^2} \rightarrow p^2 = \frac{13,6}{3,41} \rightarrow$$

$$p^2 \approx 3,988$$

$$p = 2$$

# Referências

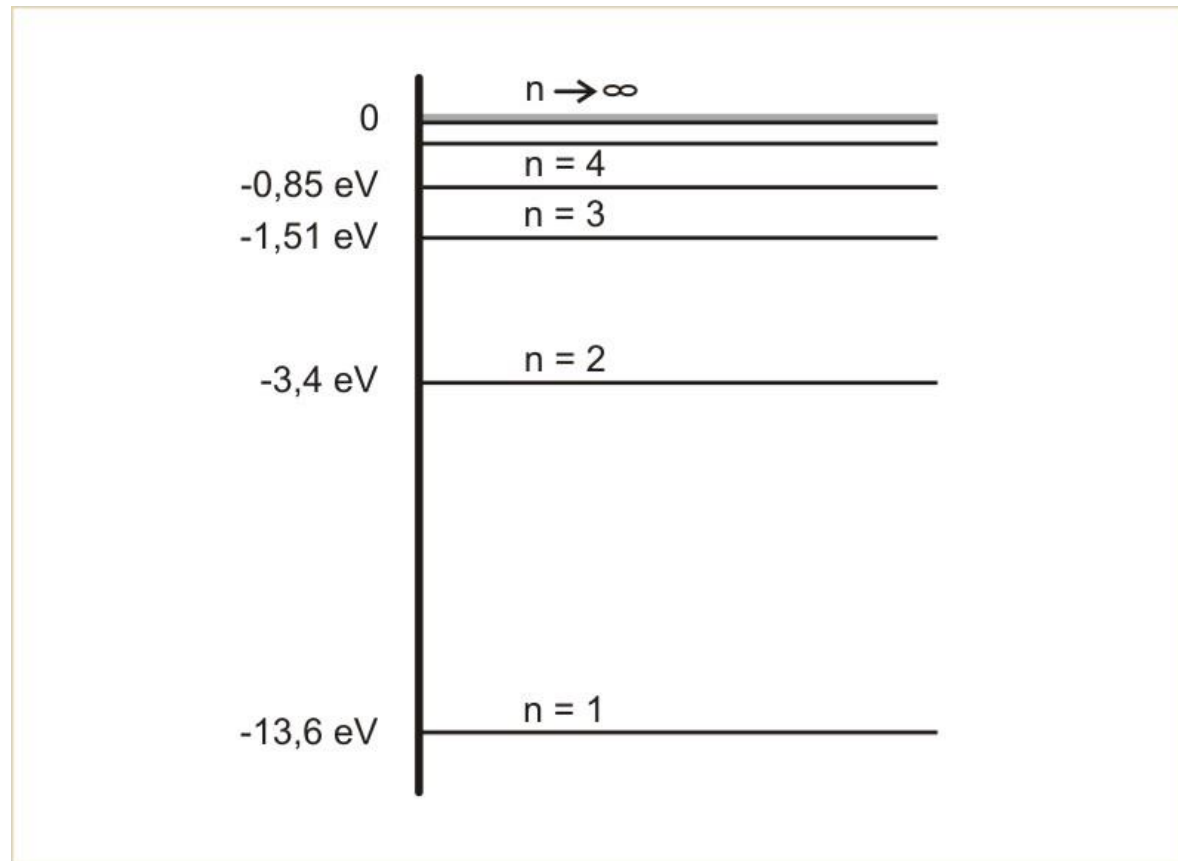
<http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/absorption.html>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Black\\_body#Radiation\\_emitted\\_by\\_a\\_human\\_body](http://en.wikipedia.org/wiki/Black_body#Radiation_emitted_by_a_human_body)  
[http://www.google.com.br/imgres?imgurl=http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/fig11Cavity\\_web.jpg&imgrefurl=http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node134.html&h=168&w=217&sz=8&tbnid=JcO\\_HfB1qSjCgM:&tbnh=83&tbnw=107&prev=/images%3Fq%3Dblack%2Bbody%2Bcavity&zoom=1&q=black+body+cavity&hl=pt-BR&usg=\\_\\_mMf5CQx7NpTCLfZzWRNca80Sjc=&sa=X&ei=vT28TICCKoH78Ab0rZTbDg&ved=0CDEQ9QEwBA](http://www.google.com.br/imgres?imgurl=http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/fig11Cavity_web.jpg&imgrefurl=http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node134.html&h=168&w=217&sz=8&tbnid=JcO_HfB1qSjCgM:&tbnh=83&tbnw=107&prev=/images%3Fq%3Dblack%2Bbody%2Bcavity&zoom=1&q=black+body+cavity&hl=pt-BR&usg=__mMf5CQx7NpTCLfZzWRNca80Sjc=&sa=X&ei=vT28TICCKoH78Ab0rZTbDg&ved=0CDEQ9QEwBA)  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Revolu%C3%A7%C3%A3o\\_Industrial](http://pt.wikipedia.org/wiki/Revolu%C3%A7%C3%A3o_Industrial)  
[http://www.azom.com/images/Equipments/EquipmentImage\\_325.jpg](http://www.azom.com/images/Equipments/EquipmentImage_325.jpg)  
[http://profs.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Stefan\\_Boltzmann/Lei\\_Stefan\\_Boltzmann.html#Lei de Stefan-Boltzmann](http://profs.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Stefan_Boltzmann/Lei_Stefan_Boltzmann.html#Lei de Stefan-Boltzmann)  
<http://www.ija.csic.es/gt/tele/Cursos/SIEG2.JPG>  
<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/images/xenonlampsfigure1.jpg>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Plum\\_pudding\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/Plum_pudding_model)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Ernest\\_Rutherford](http://en.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Rutherford\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/Rutherford_model)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Bohr\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/Bohr_model)  
<http://www.ufsm.br/gef/Moderna17.htm>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Gas-discharge\\_lamp](http://en.wikipedia.org/wiki/Gas-discharge_lamp)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Julius\\_Pl%C3%BCcker](http://en.wikipedia.org/wiki/Julius_Pl%C3%BCcker)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich\\_Gei%C3%9Fler](http://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Gei%C3%9Fler)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Glow\\_discharge](http://en.wikipedia.org/wiki/Glow_discharge)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Geissler\\_tube](http://en.wikipedia.org/wiki/Geissler_tube)  
<http://www.sparkmuseum.com/GLASS.HTM>  
<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/modeloboehr/modeloboehrhist.html>  
<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/modeloboehr/modeloboehindex.html>  
<http://lief.if.ufrgs.br/~jader/atenuacao.pdf>  
[http://www.feiradeciencias.com.br/sala23/23\\_MA05.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala23/23_MA05.asp)  
[http://www.profpc.com.br/n%C3%BAmoros\\_qu%C3%A2nticos.htm#N.C3.BAmero\\_qu.C3.A2ntico\\_de\\_momento\\_angular.2C\\_I](http://www.profpc.com.br/n%C3%BAmoros_qu%C3%A2nticos.htm#N.C3.BAmero_qu.C3.A2ntico_de_momento_angular.2C_I)  
<http://zeus.qui.ufmg.br/~qgeral/downloads/aulas/aula%208%20-%20modelo%20quanticos..pdf>  
<https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes-in-physics>  
[http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Ademar%20de%20Oliveira%20Ferreira\\_D.pdf](http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Ademar%20de%20Oliveira%20Ferreira_D.pdf)  
[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/39/120/39120257.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/120/39120257.pdf)  
<http://atom.kaeri.re.kr/nuchart/?zlv=1 - carta de núclídeos>  
[https://portal.if.usp.br/labdid/sites/portal.if.usp.br/labdid/files/Apostila\\_interacao\\_da\\_radiacao\\_com\\_a\\_materia\\_L.pdf](https://portal.if.usp.br/labdid/sites/portal.if.usp.br/labdid/files/Apostila_interacao_da_radiacao_com_a_materia_L.pdf)



# Referências

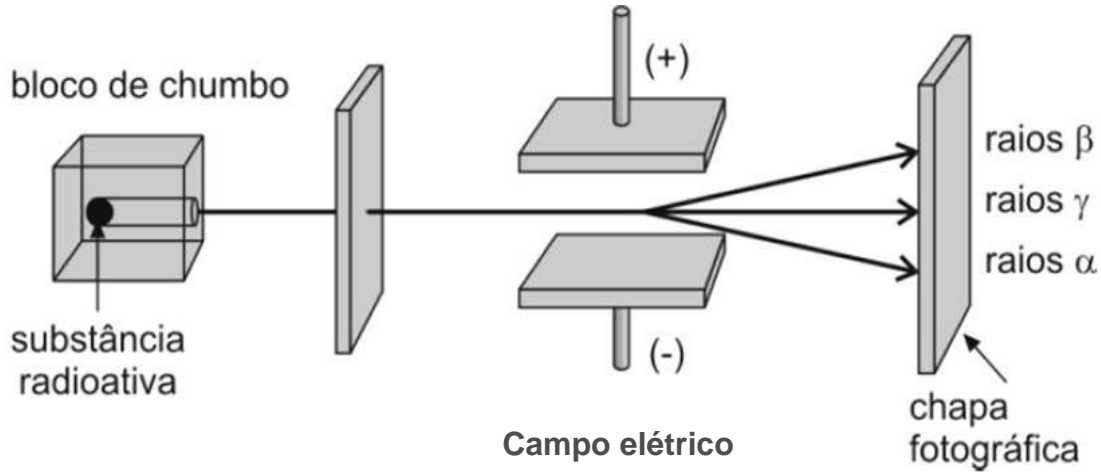
<http://www.iq.ufrgs.br/aeq/html/publicacoes/matdid/livros/pdf/radio.pdf>  
<http://www.scielo.br/pdf/qn/v35n2/24.pdf>  
<http://www.worldofchemicals.com/254/chemistry-articles/johann-jakob-balmer-discoverer-of-balmer-formula.html>  
<http://quimicasemsegredos.com/radioatividade-parte1.php>  
<http://143.107.9.121/Ensino/Graduacao/Disciplinas/LinkAula/My-Files/interacao.htm>  
[http://www.fisicaevestibular.com.br/atualizacao/Exercicios2013/fis\\_moderna.htm](http://www.fisicaevestibular.com.br/atualizacao/Exercicios2013/fis_moderna.htm)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Eugen\\_Goldstein](http://en.wikipedia.org/wiki/Eugen_Goldstein)  
[http://www.mast.br/multimedia\\_instrumentos/cintilometro\\_historico.html](http://www.mast.br/multimedia_instrumentos/cintilometro_historico.html)  
[http://ebm.ufabc.edu.br/wp-content/uploads/2011/10/Exerc%C3%ADcios\\_-F%C3%ADsica-M%C3%A9dica\\_1oQUA2012.pdf](http://ebm.ufabc.edu.br/wp-content/uploads/2011/10/Exerc%C3%ADcios_-F%C3%ADsica-M%C3%A9dica_1oQUA2012.pdf)  
<http://dc173.4shared.com/doc/dCpT4UqR/preview.html>  
<http://www.seara.ufc.br/donafifi/datacao/datacao1.htm>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Victor\\_Schumann](https://en.wikipedia.org/wiki/Victor_Schumann)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Friedrich\\_Paschen](https://en.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Paschen)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Frederick\\_Sumner\\_Brackett](https://en.wikipedia.org/wiki/Frederick_Sumner_Brackett)  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Bohr-sommerfeld\\_Atommodell\\_\(Elektronenbahnen\).svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Bohr-sommerfeld_Atommodell_(Elektronenbahnen).svg)  
<http://acta-arhiv.chem-soc.si/58/58-4-876.pdf> (sommerfeld)  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/wien.html>  
<https://www.juliantrubin.com/bigten/lightexperiments.html> (applet prisma )  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Max\\_Born](https://en.wikipedia.org/wiki/Max_Born)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Werner\\_Heisenberg](https://en.wikipedia.org/wiki/Werner_Heisenberg)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Erwin\\_Schr%C3%B6dinger](https://en.wikipedia.org/wiki/Erwin_Schr%C3%B6dinger)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Wolfgang\\_Pauli](https://en.wikipedia.org/wiki/Wolfgang_Pauli)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_quantum\\_number](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_quantum_number)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Spin\\_quantum\\_number](https://en.wikipedia.org/wiki/Spin_quantum_number)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Pauli\\_exclusion\\_principle](https://en.wikipedia.org/wiki/Pauli_exclusion_principle)  
<https://brasilescola.uol.com.br/geografia/primeira-revolucao-industrial.htm>  
<http://maranhaohoje.com/empresarios-e-politicos-buscam-saida-para-o-setor-de-ferro-gusa/>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Thermionic\\_emission#History](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermionic_emission#History)  
<https://electronics.howstuffworks.com/diode.htm>  
<https://www.infoescola.com/quimica/tabela-periodica/>  
<https://slideplayer.com.br/slide/3627825/>  
[http://www.ufjf.br/pedro\\_almeida/files/2015/04/CEL099-%E2%80%93002-Diodos-e-outros-dispositivos-de-2-terminais.pdf](http://www.ufjf.br/pedro_almeida/files/2015/04/CEL099-%E2%80%93002-Diodos-e-outros-dispositivos-de-2-terminais.pdf)  
<https://hastonforthehouse.com/pt/electronics/653-pn-junction-diode-theory-and-vi-characteristics-of-pn-junction-diode.html>  
<http://www.stonevintageradio.com/description.php?II=473&UID=20190808214929> (tubos Crookes)  
[https://filosofianaescola.com/filosofos/democrito/#Todo\\_e\\_composto\\_de\\_atomos\\_e\\_vazio](https://filosofianaescola.com/filosofos/democrito/#Todo_e_composto_de_atomos_e_vazio)  
[https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-of-the-BB2000-40-blackbody-with-a-graphite-radiating-cavity-dimensions-in\\_fig1\\_251268291](https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-of-the-BB2000-40-blackbody-with-a-graphite-radiating-cavity-dimensions-in_fig1_251268291)

<https://fisicaevestibular.com.br/novo/fisica-moderna/estrutura-atomica-atomo-de-bohr/2489-2/>



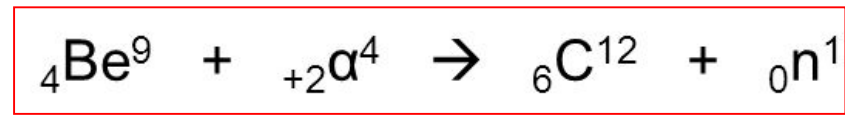
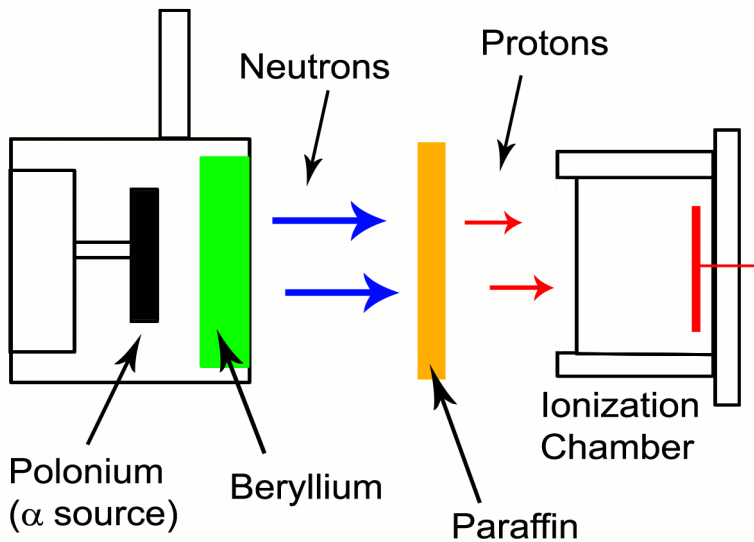
# Nêutron (1.932)

*"partícula sem carga elétrica"*



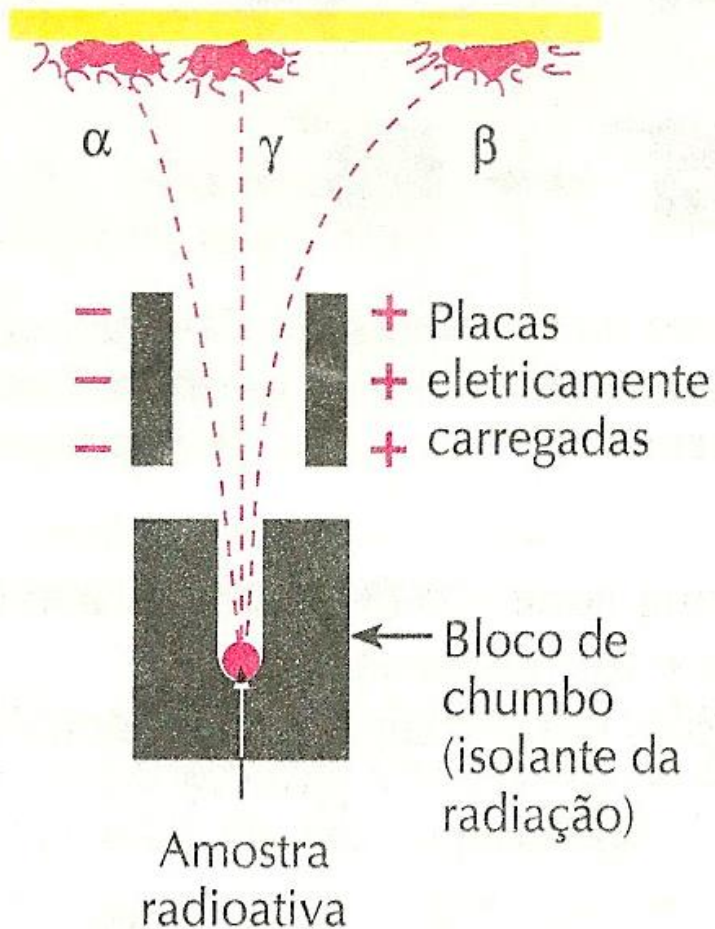
James Chadwick  
1891 - 1974  
Nobel de **1.935**

*"for the discovery of the neutron."*

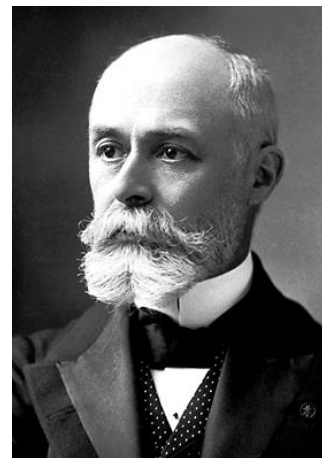


# Interação Radiação-Matéria

Tela fluorescente onde aparecem manchas luminosas



**1.898** - Ernest Rutherford



Antoine H. Becquerel  
1852 - 1908  
Nobel de **1.903**

Descoberta da  
Radioatividade  
Natural  
**1.896**

Emissão espontânea de  
luz por sais de urânio



Maria Sklodowska Curie  
1867 - 1934  
Nobel de **1.903**



Pierre Curie  
1859 - 1906  
Nobel de **1.903**

Nobel de Química de **1.911** (*Ra e Po*)

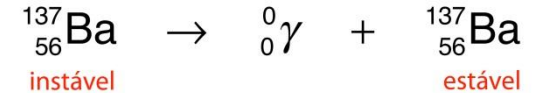
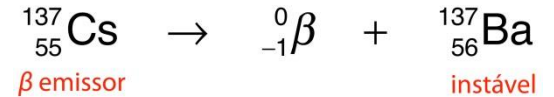
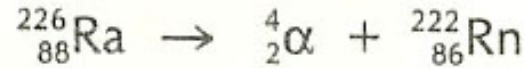
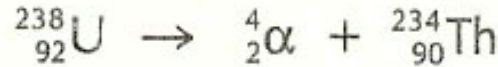
# Interação Radiação-Matéria



Nuclídeo inicial  
(representação  
esquemática)

Nuclídeo  
final

Partícula alfa  
(2 prótons  
e 2 nêutrons)



Radiação	Alfa	Beta	Gama
<b>Poder de Ionização</b>	Alto. A partícula alfa captura 2 elétrons do meio, se transformando em átomo de hélio.	Médio. Por possuírem carga elétrica menor possuem menor poder de ionização.	Pequeno. Não possuem carga.
<b>Danos ao ser humano</b>	Pequenos. São detidos pela camada de células mortas da pele, podendo no máximo causar queimaduras.	Médio. Podem penetrar até 2 cm e ionizar moléculas gerando radicais livres.	Alto. Pode atravessar completamente o corpo humano, causando danos irreparáveis como alteração na estrutura do DNA.
<b>Velocidade</b>	5% da velocidade da luz	95% da velocidade da luz	Igual a velocidade da luz 300000 Km/s
<b>Poder de Penetração</b>	Pequeno. Uma folha de papel pode deter.	Médio. É 50 a 100 vezes mais penetrantes que a alfa. São detidas por uma chapa de chumbo de 2 mm.	Alto. Os raios Gama são mais penetrantes que os raios x. São detidos por uma chapa de chumbo de 5 cm.



# Interação Radiação-Matéria

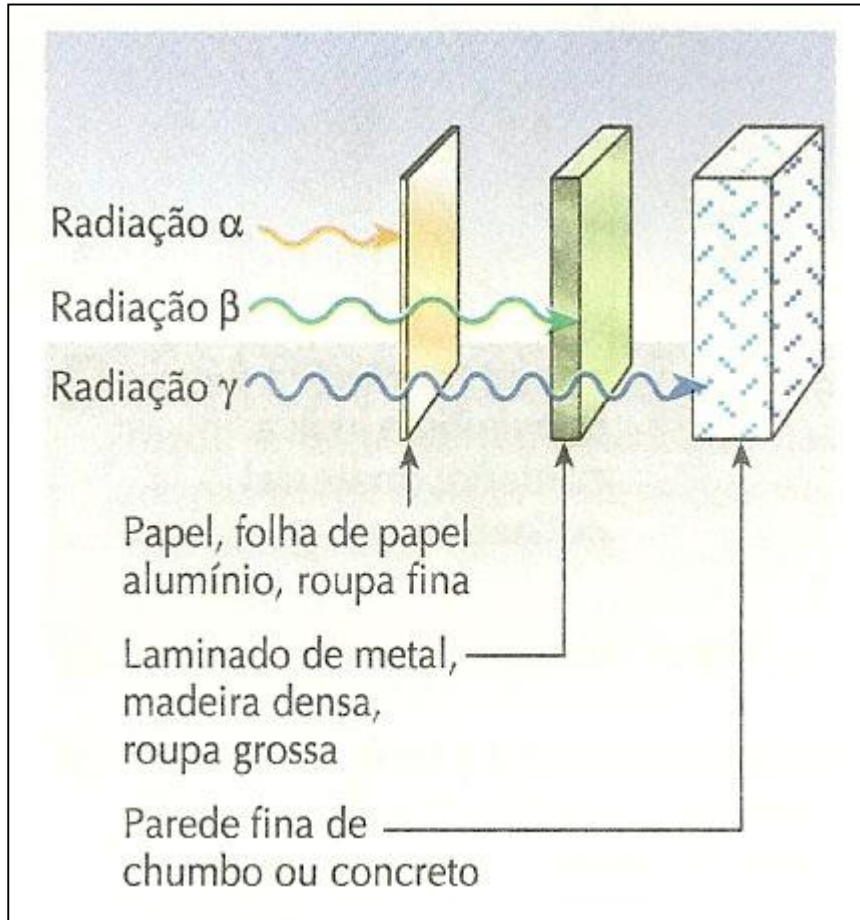
$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

$I_0$  : Intensidade do feixe antes de atravessar o material absorvedor

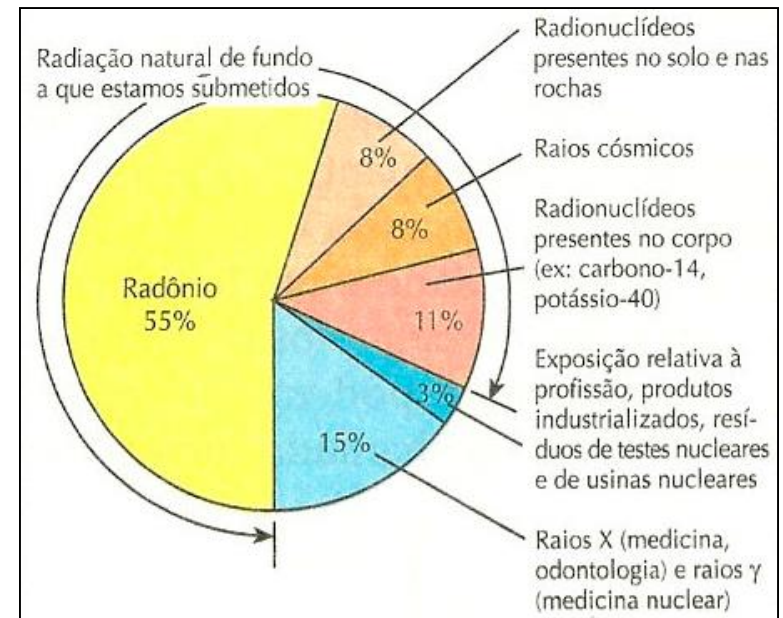
$I$  : Intensidade do feixe após atravessar o material absorvedor

$\mu$  : coeficiente de atenuação linear

$x$  : espessura do material absorvedor

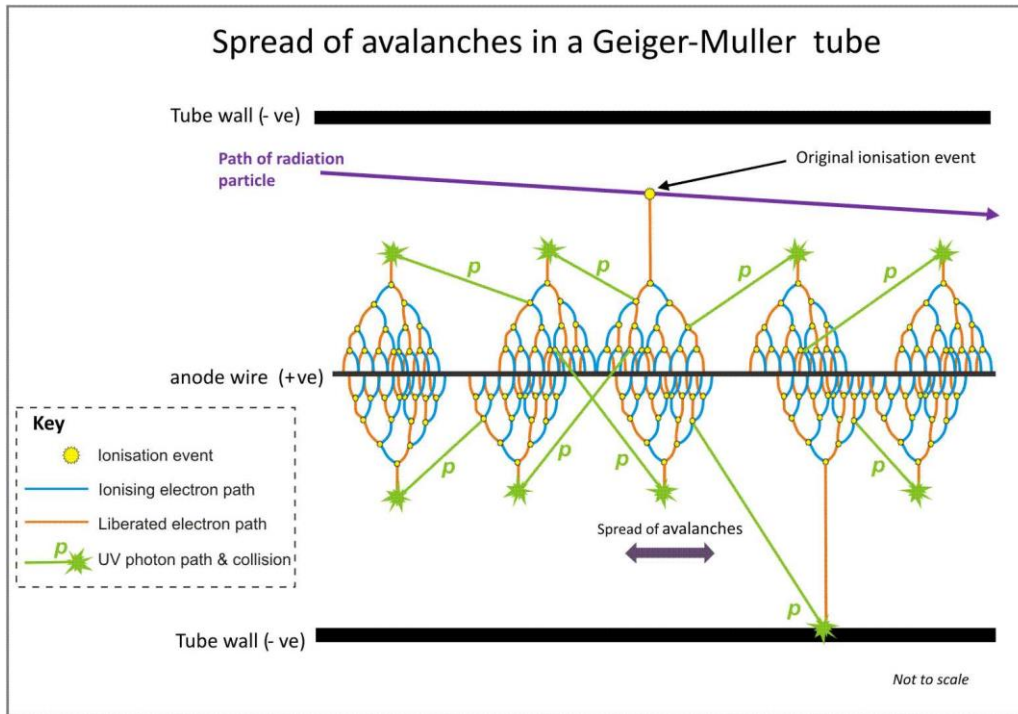


Absorção

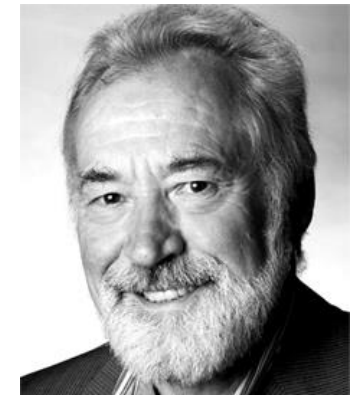


# • Contador Geiger - Müller

(1928)



Johannes W. Geiger  
1882 - 1945



Walther Müller  
1905 - 1979



## • Areia Monazítica



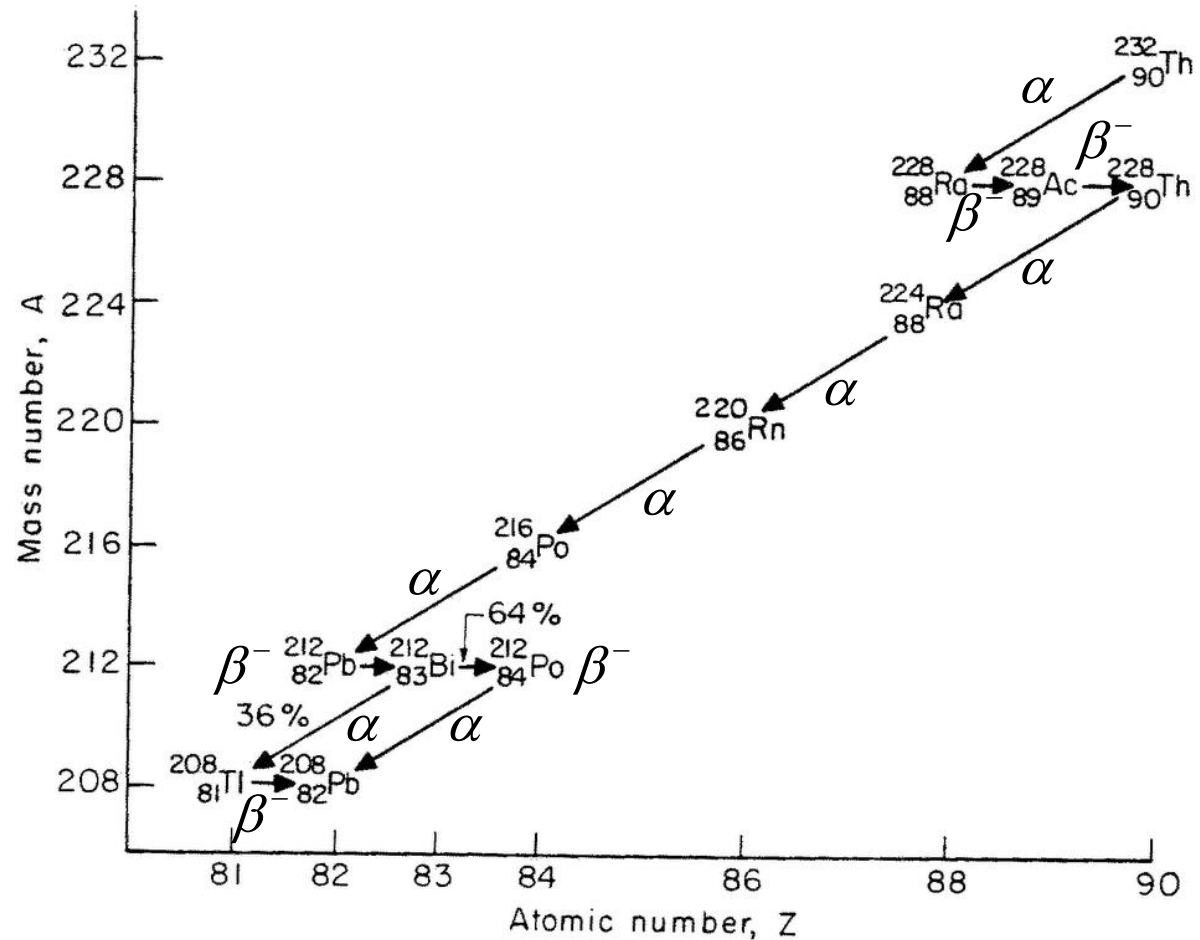
Tório e Urânio



Praia de Areia Preta  
Guarapari, ES

O conjunto de todas as substâncias radioativas que vão se desintegrando sucessivamente umas nas outras é chamado **família radioativa**.

### Decaimento da família do Tório

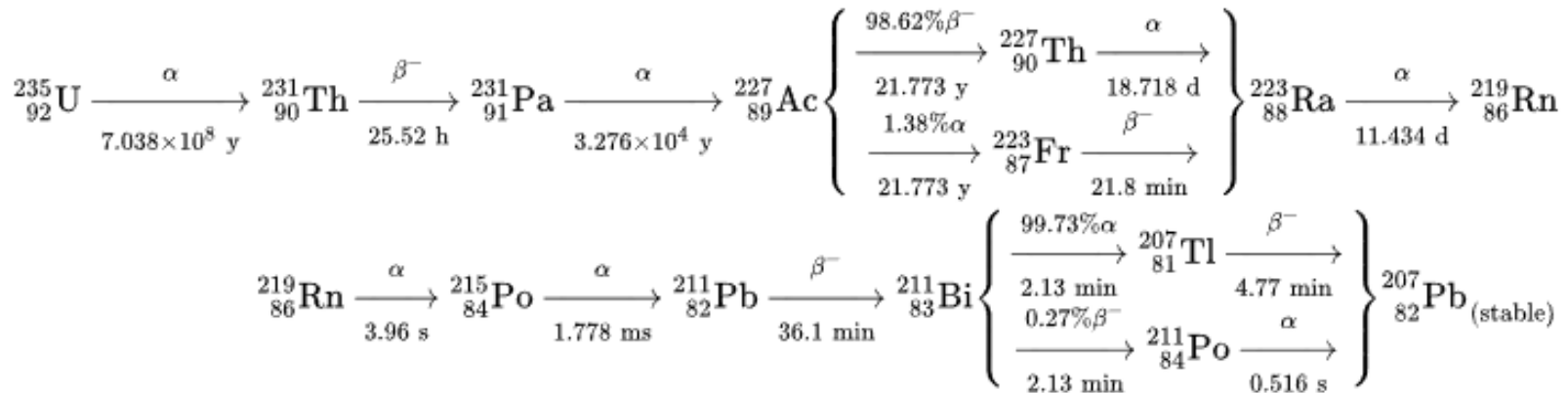
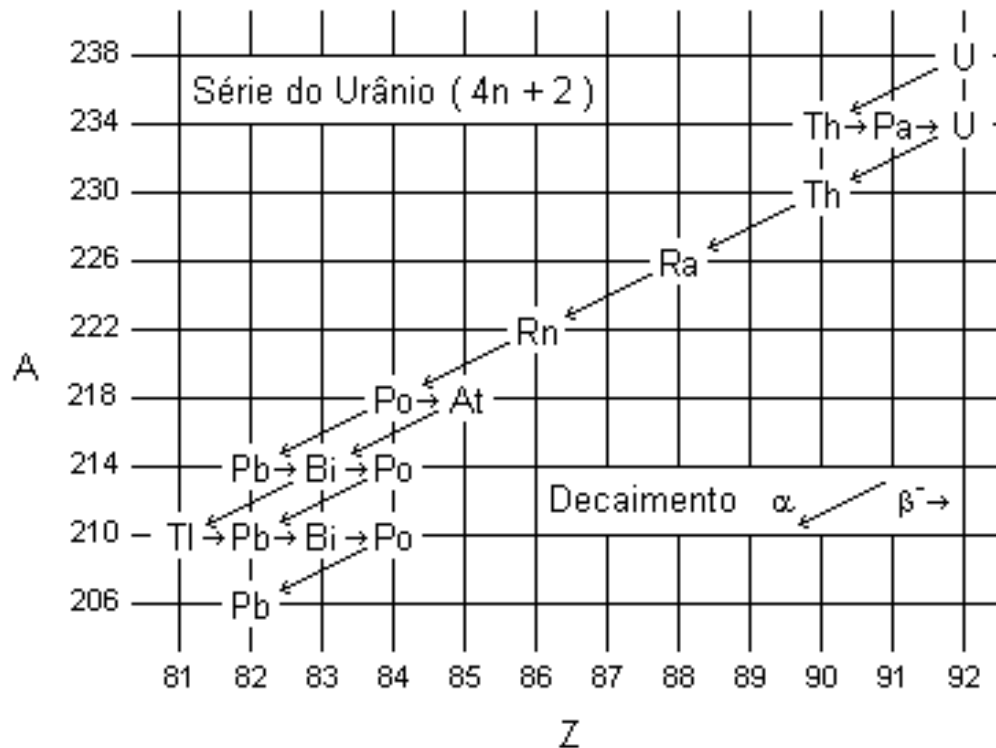


*Dcaimento da família do Tório*

Radioisótopo	Modo de decaimento	Meia Vida	Gama (MeV)	P <sub>γ</sub> (%)
<sup>232</sup> Th	Alfa	1,39 x 10 <sup>10</sup> anos	-	-
↓				
<sup>228</sup> Ra	Beta	5,75 anos	-	-
↓				
<sup>228</sup> Ac	Beta	6,13 horas	0,34 0,908 0,96	15 25 20
↓				
<sup>228</sup> Th	Alfa	1,91 anos	0,084 0,214	1,6 0,3
↓				
<sup>224</sup> Ra	Alfa	3,64 dias	0,241	3,7
↓				
<sup>220</sup> Rn	Alfa	55,6 segundos	0,55	0,07
↓				
<sup>216</sup> Po	Alfa	0,15 segundos	-	-
↓				
<sup>212</sup> Pb	Beta	10,64 horas	0,239 0,300	47 3,2
↓				
<sup>212</sup> Bi	Alfa e beta	60,5 minutos	0,040 0,727 1,620	2 7 1,8
↙ 64,06%				
<sup>212</sup> Po	Alfa	304 nanosegundos	-	-
↘ 35,94%				
<sup>208</sup> Tl	Beta	3,1 minutos	0,511 0,583 0,860 2,614	23 86 12 100
↓				
<sup>208</sup> Pb	-	Estável	-	-

• Areia Monazítica

Decaimento da família do Urânio





# Decaimento da família do Urânio

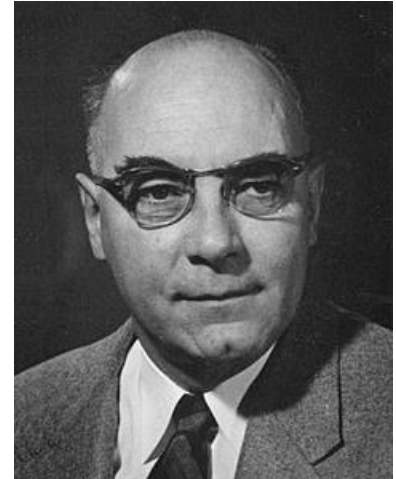
## Série Radioativa do Urânio 235

Radioisótopo	Modo de decaimento	Meia Vida	Gama (MeV)	P <sub>γ</sub> (%)
<sup>235</sup> U	Alfa	7,038 x 10 <sup>8</sup> anos	0,143 0,185 0,204	11 54 5
<sup>231</sup> Th	Beta	25,6 horas	0,026 0,084	2 10
<sup>231</sup> Pa	Alfa	3,43 x 10 <sup>4</sup> anos	0,027 0,29	6 6
<sup>227</sup> Ac	Alfa e beta	21,6 anos	0,070	0,08
<sup>227</sup> Th (98,6%) <sup>223</sup> Fr (1,2%)	Alfa	18,2 dias	0,050 0,237 0,31	8 15 8
<sup>223</sup> Ra	Alfa e beta	22 minutos	0,050 0,080 0,234	40 13 4
<sup>223</sup> Ra	Alfa	11,68 dias	0,149 0,270 0,33	10 10 6
<sup>219</sup> Rn	Alfa	3,92 segundos	0,272 0,401	9 5
<sup>215</sup> Po	Alfa	1,83 milisegundos	-	-
<sup>211</sup> Pb	Beta	36,1 minutos	0,405 0,427 0,832	3,4 1,8 3,4
<sup>211</sup> Bi	Alfa e beta	2,15 minutos	0,351	14
<sup>211</sup> Po (0,28%) <sup>207</sup> Tl (99,7%)	Alfa	0,52 segundos	0,570 0,90	0,5 0,5
<sup>207</sup> Pb	Beta	4,79 minutos	0,897	0,16
<sup>207</sup> Pb	-	Estável	-	-

## Série Radioativa do Urânio 238

Radionuclideo	Modo de decaimento	Meia Vida	Gama (MeV)	P <sub>γ</sub> (%)
<sup>238</sup> U	Alfa	4,468 x 10 <sup>9</sup> anos	-	-
<sup>234</sup> Th	Beta	24,1 dias	0,063 0,093	3,5 4
<sup>234</sup> Pa (99,8%) <sup>234m</sup> Pa (0,13%)	Beta	1,17 minutos	0,765 1,001	0,30 0,60
<sup>234</sup> Pa	Beta	6,7 horas	0,10 0,70 0,90	50 24 70
<sup>234</sup> U	Alfa	2,48 x 10 <sup>5</sup> anos	0,053	0,2
<sup>230</sup> Th	Alfa	7,52 x 10 <sup>4</sup> anos	0,068 0,142	0,6 0,07
<sup>226</sup> Ra	Alfa	1602 anos	0,186	4
<sup>222</sup> Rn	Alfa	3,823 dias	0,510	0,07
<sup>218</sup> Po	Alfa e beta	3,05 minutos	-	-
<sup>214</sup> Pb (99,98%) <sup>218</sup> At (0,02%)	Alfa e beta	26,8 minutos	0,295 0,352	0,19 36
<sup>214</sup> Pb	Beta	2 segundos	-	-
<sup>214</sup> Bi	Beta Alfa	19,7 minutos	0,609 1,120 1,764	47 17 17
<sup>214</sup> Po (99,98%) <sup>210</sup> Tl (0,02%)	Alfa	164 microsegundos	0,799	0,014
<sup>214</sup> Po	Beta	1,3 minutos	0,296 0,795 1,31	80 100 21
<sup>210</sup> Pb	Alfa e beta	~22 anos	0,047	4
<sup>210</sup> Bi	Alfa e beta	5,01 dias	-	-
<sup>210</sup> Po (100%) <sup>210</sup> Tl (0,0001%)	Alfa	138,4 dias	0,803	0,0011
<sup>210</sup> Po	Beta	4,19 minutos	-	-
<sup>206</sup> Pb	-	Estável	-	-

# Pósitron



Carl D. Anderson  
1905 - 1991  
Nobel de **1.936** ( $\frac{1}{2}$ )

*“ for his discovery of the positron.”*

# Radioatividade Artificial

*"in recognition of their synthesis of new radioactive elements."*



Frédéric Joliot  
1900 - 1958

Irène Joliot-Curie  
1897 - 1956

Nobel de Química de **1.935**

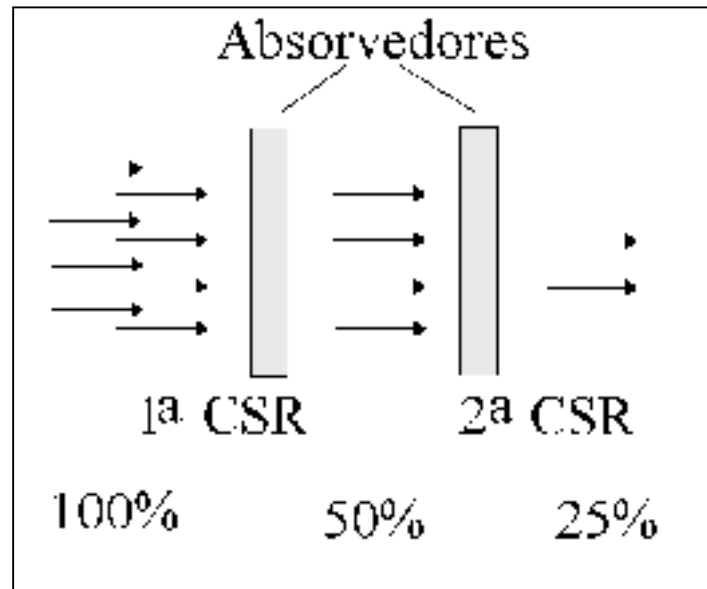
# Exercícios

1) Os coeficientes de atenuação linear para RX de certa energia na água e no cálcio são,  $400 \text{ m}^{-1}$  e  $1,57 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ . Calcule:

a) A percentagem de absorção de RX em 1 mm de água

b) A espessura de cálcio necessária para produzir a mesma redução na intensidade que a calculada em (a)

- Camada Semirredutora (CSR) é a espessura necessária de um certo material capaz de reduzir a intensidade do feixe incidente de radiação à metade do valor inicial.



2) Um feixe de RX de 50 keV é usado para retirar uma radiografia do pulmão. Qual a razão entre a intensidade do feixe incidente na frente do tórax e a emergente nas costas? Considere a espessura do tórax de 10 cm. Ver dados tecidos humanos.

Tabela 1 - CSR para raios X e $\gamma$ (gamma) em tecido humano e alumínio		
Energia (MeV)	Camada Semi Redutora (CSR ou HVL)	
Raios X ou $\gamma$	Tecido humano	Alumínio
0,01	0,13	$0,045 \times 10^{-4}$
0,05	3,24	$0,8 \times 10^{-2}$
0,1	4,15	$1,1 \times 10^{-2}$
0,5	7,23	$38 \times 10^{-2}$
1,0	9,91	$86 \times 10^{-2}$
5,0	23,1	$12) \times 10^{-2}$

3) O coeficiente de atenuação do tecido humano para fótons de 1 MeV é  $7 \text{ m}^{-1}$ . Determine a CSR do tecido?



# Múon

