



# UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

## Escola de Engenharia de Lorena – EEL

### *“PPE6408 – Tópicos Especiais de Física”*

*Prof. Dr. Durval Rodrigues Junior*

*Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR)*

*Escola de Engenharia de Lorena (EEL)*

*Universidade de São Paulo (USP)*

*Polo Urbo-Industrial, Gleba AI-6 - Lorena, SP 12600-970*

*[durval@demar.eel.usp.br](mailto:durval@demar.eel.usp.br)*

*[www.demar.eel.usp.br/docentes](http://www.demar.eel.usp.br/docentes) ou [www.eel.usp.br](http://www.eel.usp.br) (Página dos professores)*

Área I  
Rodovia Itajubá-Lorena, Km 74,5  
CEP 12600-970 - Lorena - SP  
Tel. (12) 3159-5007/3153-3209

USP Lorena  
[www.eel.usp.br](http://www.eel.usp.br)

Área II  
Polo Urbo-Industrial Gleba AI-6  
CEP 12600-970 - Lorena - SP  
Tel. (12) 3159-9900

# UNIDADE 10 -

(quase) Tudo sobre os átomos

# Algumas propriedades:

- Átomos são estáveis (quase sempre)
- Os átomos se combinam  
(como o fazem é descrito pela mecânica quântica)
- Os átomos podem ser agrupados em famílias  
(propriedades periódicas com o número atômico)
- Emitem e absorvem radiação EM
- Os átomos possuem momento angular e magnético...

# A tabela periódica dos elementos

Periodic table of the elements

group 1*	2											13	14	15	16	17	18
Ia**	IIa											IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	0
1 <b>H</b>												5 <b>B</b>	6 <b>C</b>	7 <b>N</b>	8 <b>O</b>	9 <b>F</b>	10 <b>Ne</b>
3 <b>Li</b>	4 <b>Be</b>											13 <b>Al</b>	14 <b>Si</b>	15 <b>P</b>	16 <b>S</b>	17 <b>Cl</b>	18 <b>Ar</b>
11 <b>Na</b>	12 <b>Mg</b>	3 IIIb	4 IVb	5 Vb	6 VIb	7 VIIb	8 VIIIb		10 Ib	12 IIb	31 <b>Ga</b>	32 <b>Ge</b>	33 <b>As</b>	34 <b>Se</b>	35 <b>Br</b>	36 <b>Kr</b>	
19 <b>K</b>	20 <b>Ca</b>	21 <b>Sc</b>	22 <b>Ti</b>	23 <b>V</b>	24 <b>Cr</b>	25 <b>Mn</b>	26 <b>Fe</b>	27 <b>Co</b>	28 <b>Ni</b>	29 <b>Cu</b>	30 <b>Zn</b>	49 <b>In</b>	50 <b>Sn</b>	51 <b>Sb</b>	52 <b>Te</b>	53 <b>I</b>	54 <b>Xe</b>
37 <b>Rb</b>	38 <b>Sr</b>	39 <b>Y</b>	40 <b>Zr</b>	41 <b>Nb</b>	42 <b>Mo</b>	43 <b>Tc</b>	44 <b>Ru</b>	45 <b>Rh</b>	46 <b>Pd</b>	47 <b>Ag</b>	48 <b>Cd</b>	81 <b>Tl</b>	82 <b>Pb</b>	83 <b>Bi</b>	84 <b>Po</b>	85 <b>At</b>	86 <b>Rn</b>
55 <b>Cs</b>	56 <b>Ba</b>	57 <b>La</b>	72 <b>Hf</b>	73 <b>Ta</b>	74 <b>W</b>	75 <b>Re</b>	76 <b>Os</b>	77 <b>Ir</b>	78 <b>Pt</b>	79 <b>Au</b>	80 <b>Hg</b>	113 *** <b>(Uub)</b>	114 *** <b>(Uut)</b>	115 *** <b>(Uuq)</b>	116 *** <b>(Uup)</b>	117 *** <b>(Uuh)</b>	
87 <b>Fr</b>	88 <b>Ra</b>	89 <b>Ac</b>	104 <b>Rf</b>	105 <b>Db</b>	106 <b>Sg</b>	107 <b>Bh</b>	108 <b>Hs</b>	109 <b>Mt</b>	110 <b>Ds</b>	111 <b>Rg</b>							
lanthanide series		6	58 <b>Ce</b>	59 <b>Pr</b>	60 <b>Nd</b>	61 <b>Pm</b>	62 <b>Sm</b>	63 <b>Eu</b>	64 <b>Gd</b>	65 <b>Tb</b>	66 <b>Dy</b>	67 <b>Ho</b>	68 <b>Er</b>	69 <b>Tm</b>	70 <b>Yb</b>	71 <b>Lu</b>	
actinide series		7	90 <b>Th</b>	91 <b>Pa</b>	92 <b>U</b>	93 <b>Np</b>	94 <b>Pu</b>	95 <b>Am</b>	96 <b>Cm</b>	97 <b>Bk</b>	98 <b>Cf</b>	99 <b>Es</b>	100 <b>Fm</b>	101 <b>Md</b>	102 <b>No</b>	103 <b>Lr</b>	

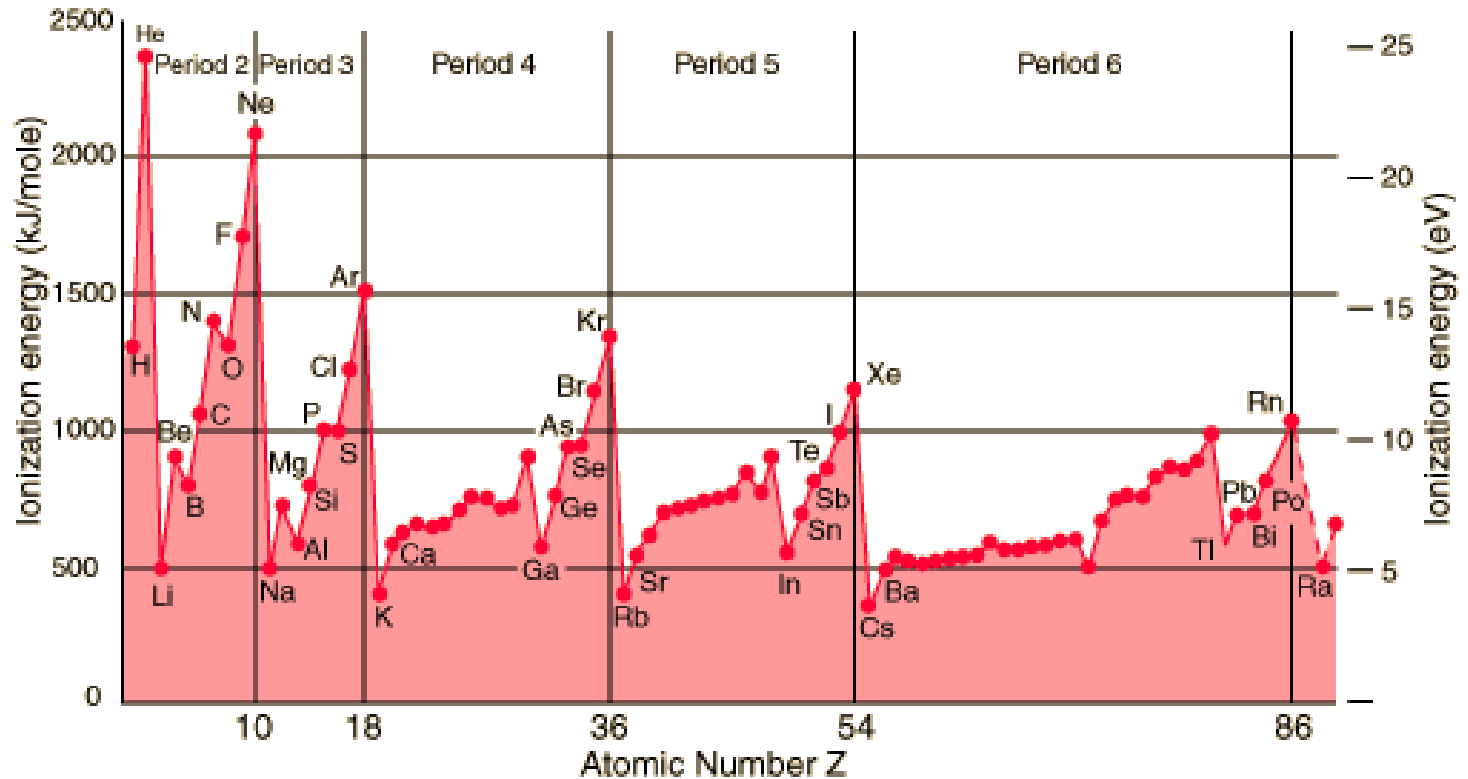
\* Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).

\*\* Numbering system widely used, especially in the U.S., from the mid-20th century.

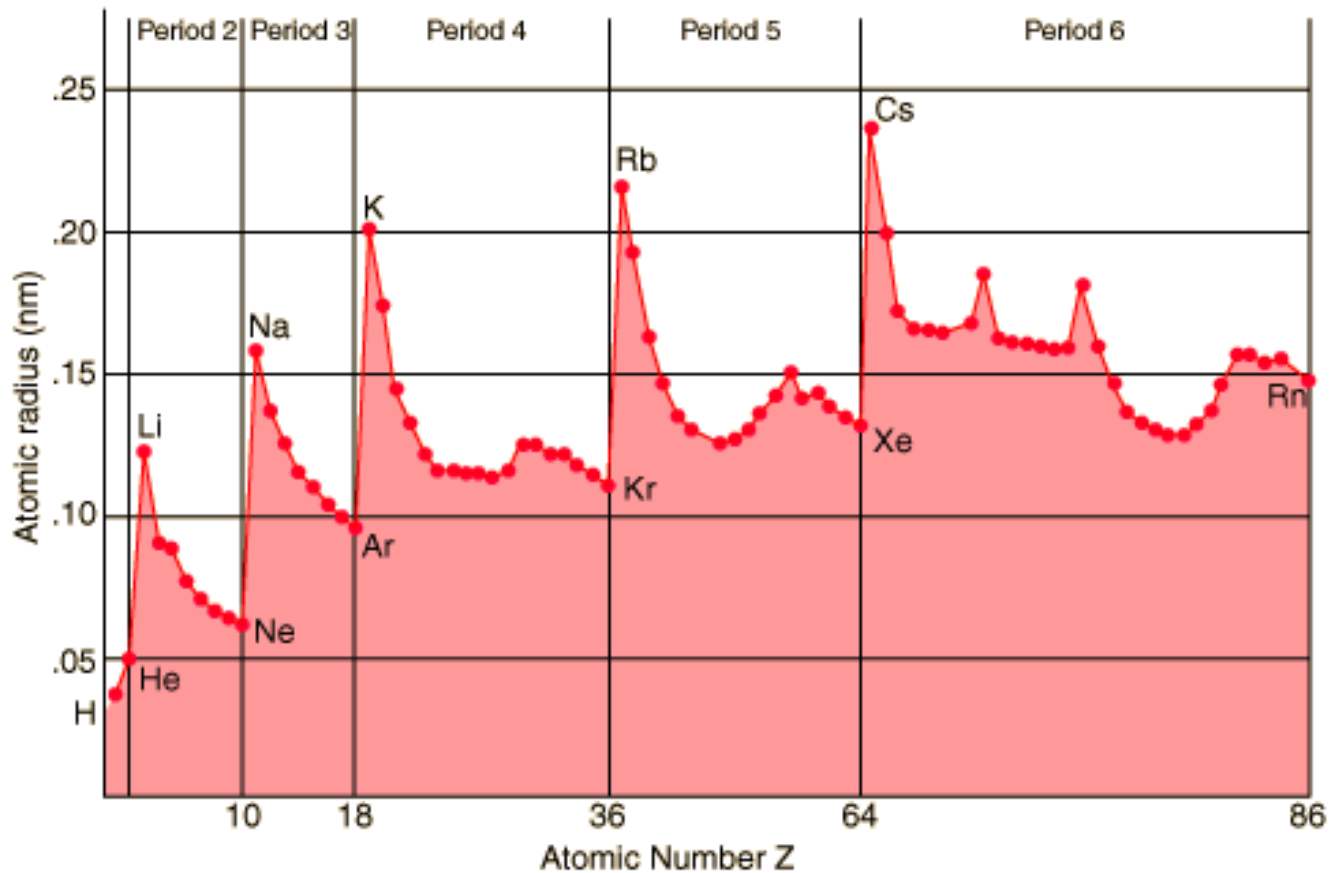
\*\*\* Discoveries of elements 112–116 are claimed but not confirmed. Element names and symbols in parentheses are temporarily assigned by IUPAC.

# Propriedades periódicas

## energia de ionização

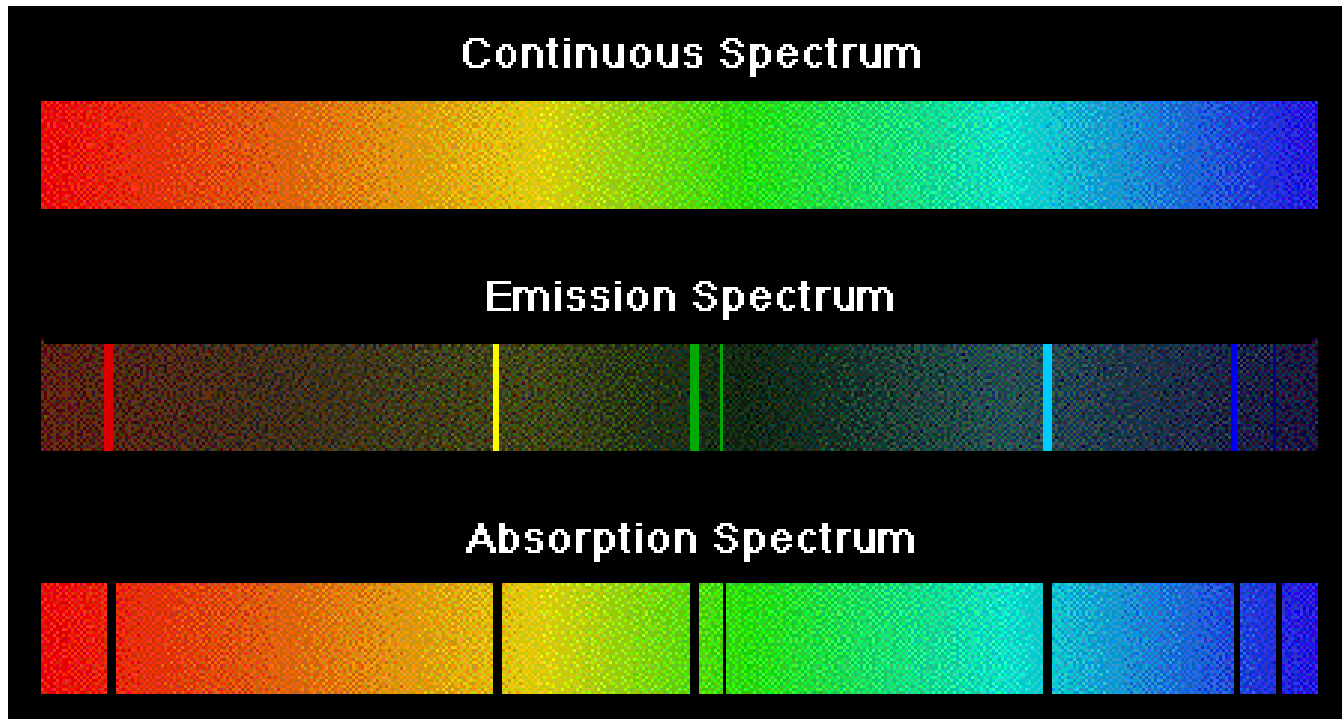


# Propriedades periódicas: raio atômico



Número de elementos em cada período: 2, 8, 8, 18, 18, 32

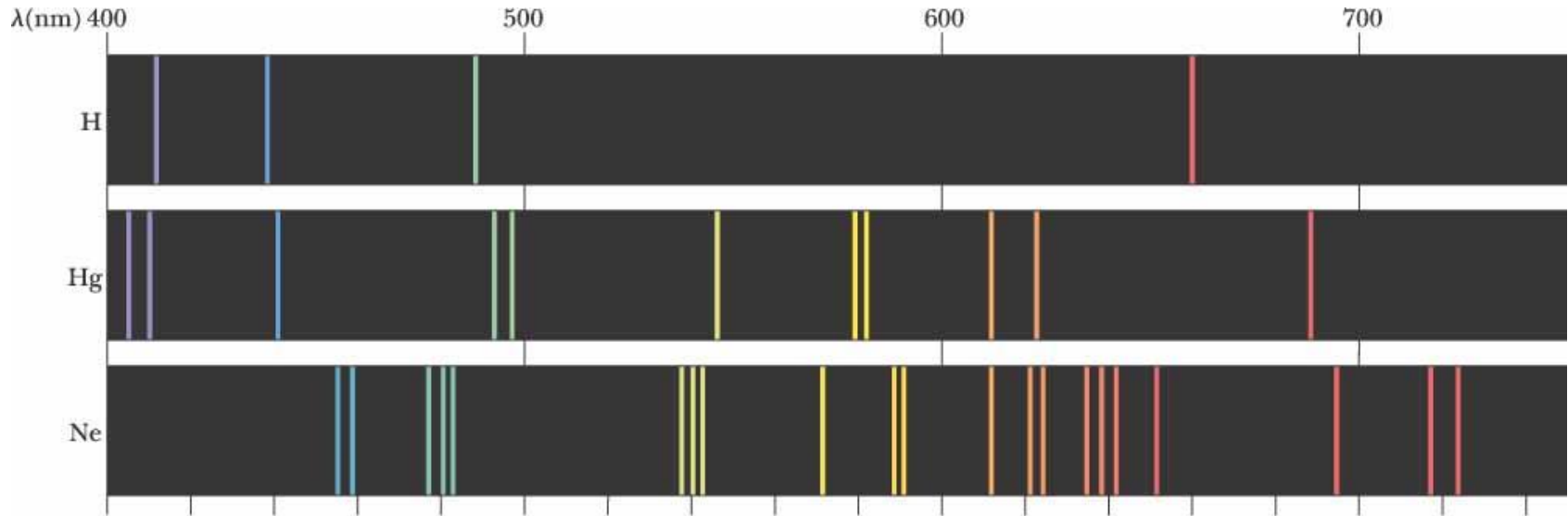
# Absorção e emissão de luz: propriedades atômicas & teste da teoria



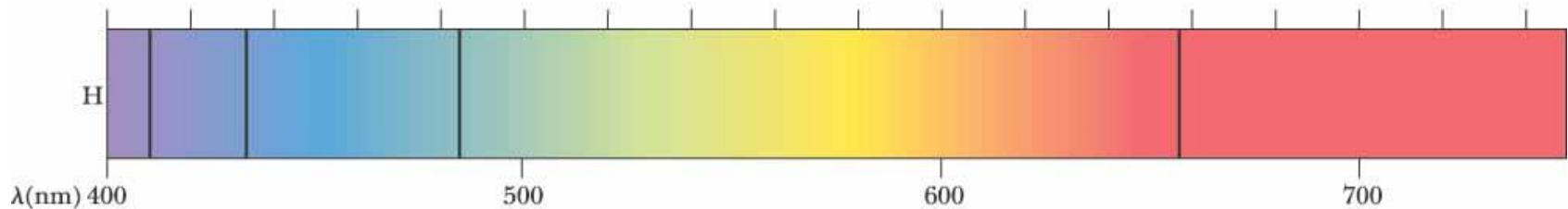
**As linhas espectrais**

# O modelo de Bohr:

bom para o H, mas os outros elementos...



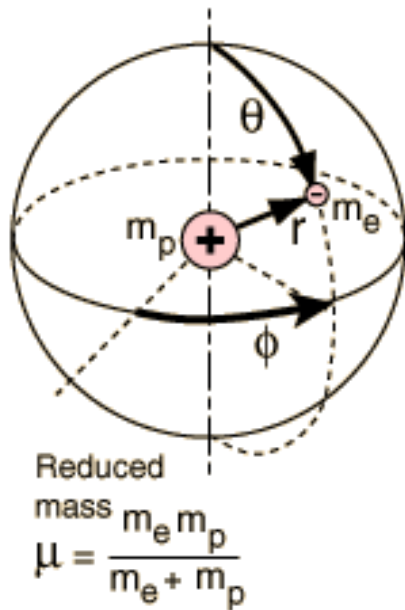
(a)



(b)



# Revisão do problema do átomo de hidrogênio:



$$U(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$\frac{-\hbar^2}{2\mu} \frac{1}{r^2 \sin\theta} \left[ \sin\theta \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin\theta \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \phi^2} \right] + U(r) \Psi(r, \theta, \phi) = E \Psi(r, \theta, \phi)$$

$$\Psi(r, \theta, \phi) = R(r)P(\theta)F(\phi)$$

# Revisão do problema do átomo de hidrogênio:

## números quânticos

Como o potencial só depende de  $r$ , a função de onda pode ser separada (coordenadas esféricas)

Resultando em 3 equações para as coordenadas eletrônicas do átomo de H !

$$\Psi(r, \theta, \phi) = R(r)P(\theta)F(\phi)$$

$n$                        $l$                        $m$

número quântico principal      número quântico orbital      número quântico magnético

símbolo	valores
$n$	1,2,3,
$l$	0,..., $n-1$
$m$	$-l, \dots, l$

# Revisão do problema do átomo de hidrogênio: números quânticos

Número quântico principal já aparece no modelo de Bohr

$$E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

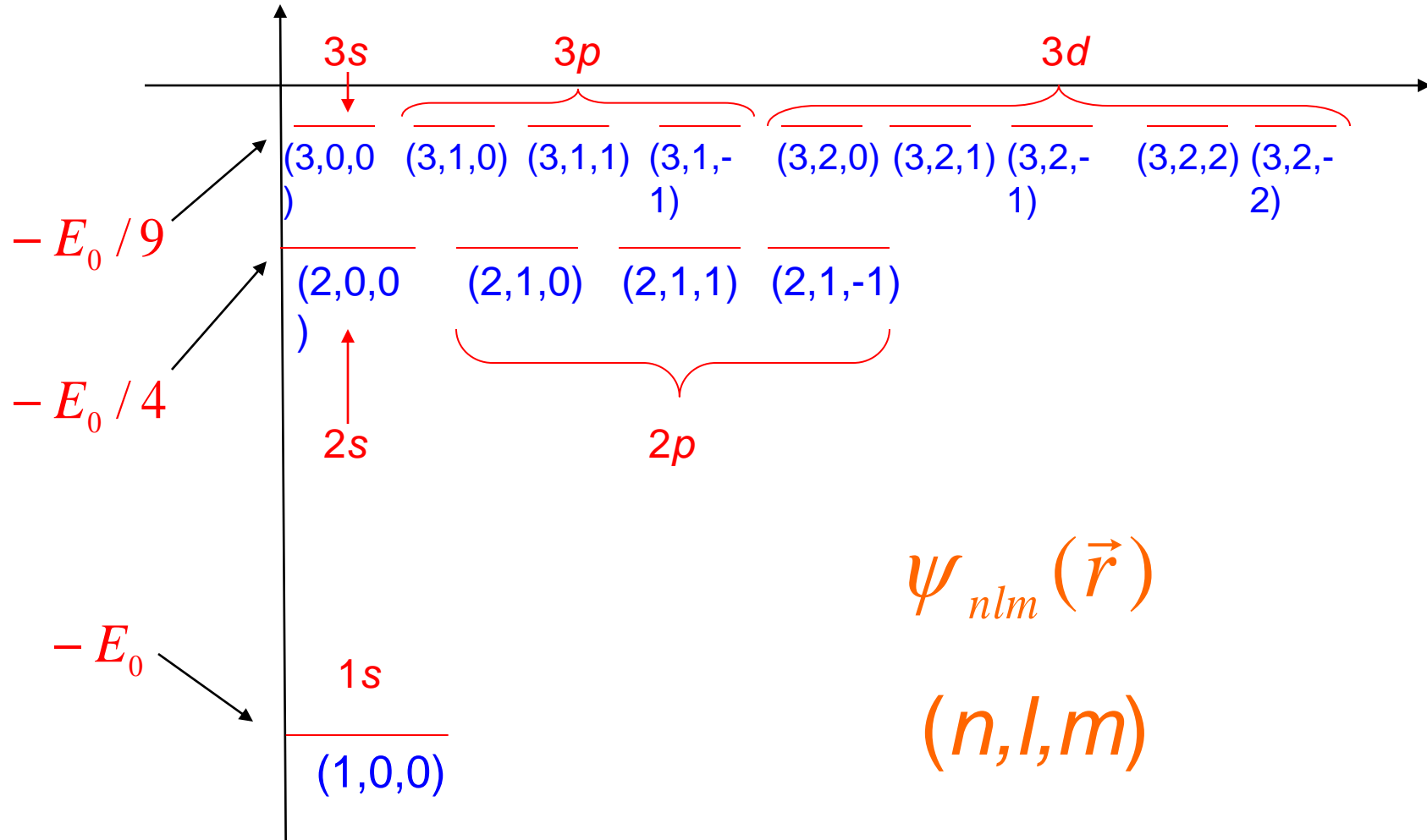
Que efeitos são devidos aos outros números quânticos ?

# Revisão do problema do átomo de hidrogênio:

O número quântico orbital  $l$  corresponde aos estados:

$$l = 0, 1, 2, 3, 4$$

$s, p, d, f, g$



# Princípio de exclusão de Pauli



Wolfgang Pauli (1900-1958)



“Em um sistema fechado, dois elétrons não podem ocupar o mesmo estado quântico”

# Princípio de exclusão de Pauli

- 2 elétrons têm conjuntos diferentes de números quânticos
- elétrons são partículas **idênticas e indistinguíveis**

$$\Psi = \Psi_1(a)\Psi_2(b) \pm \Psi_2(a)\Psi_1(b)$$

Bósons: fótons...

Férmions:  
elétrons, prótons, neutrons..

Amplitude de probabilidade  
para que os estados  $a$  e  $b$  sejam  
ocupados pelos elétrons 1 e 2

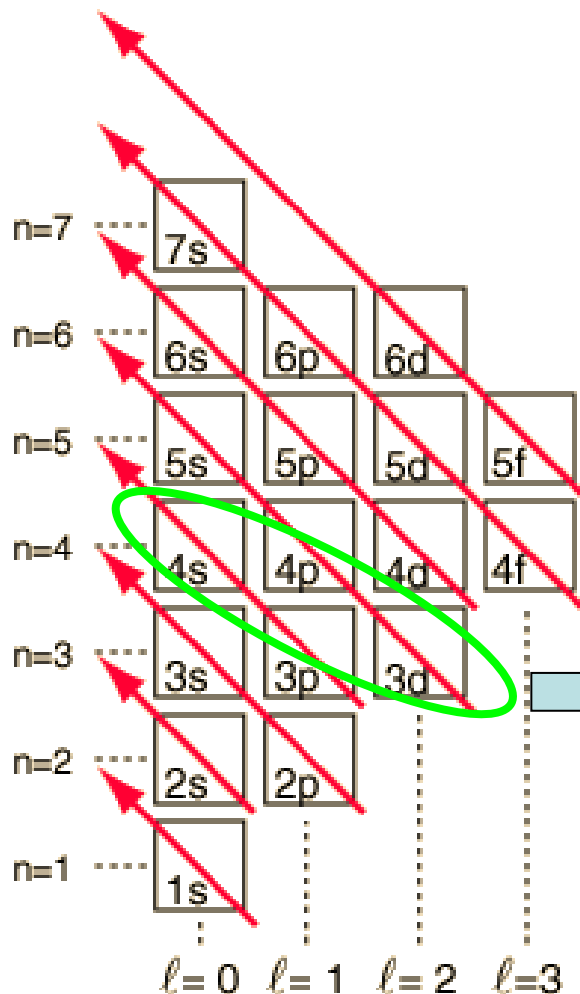
# Aplicação do princípio de exclusão de Pauli:

## tabela periódica dos elementos

estado	número quântico principal	número quântico orbital	número quântico magnético	número quântico de spin	número máximo de elétrons
1s	1	0	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2
2s	2	0	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2
2p	2	1	-1, 0, +1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	6
3s	3	0	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2
3p	3	1	-1, 0, +1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	6
3d	3	2	-2, -1, 0, 1, 2	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	10

} 8  
 } 18

# Construção da tabela periódica: preenchimento



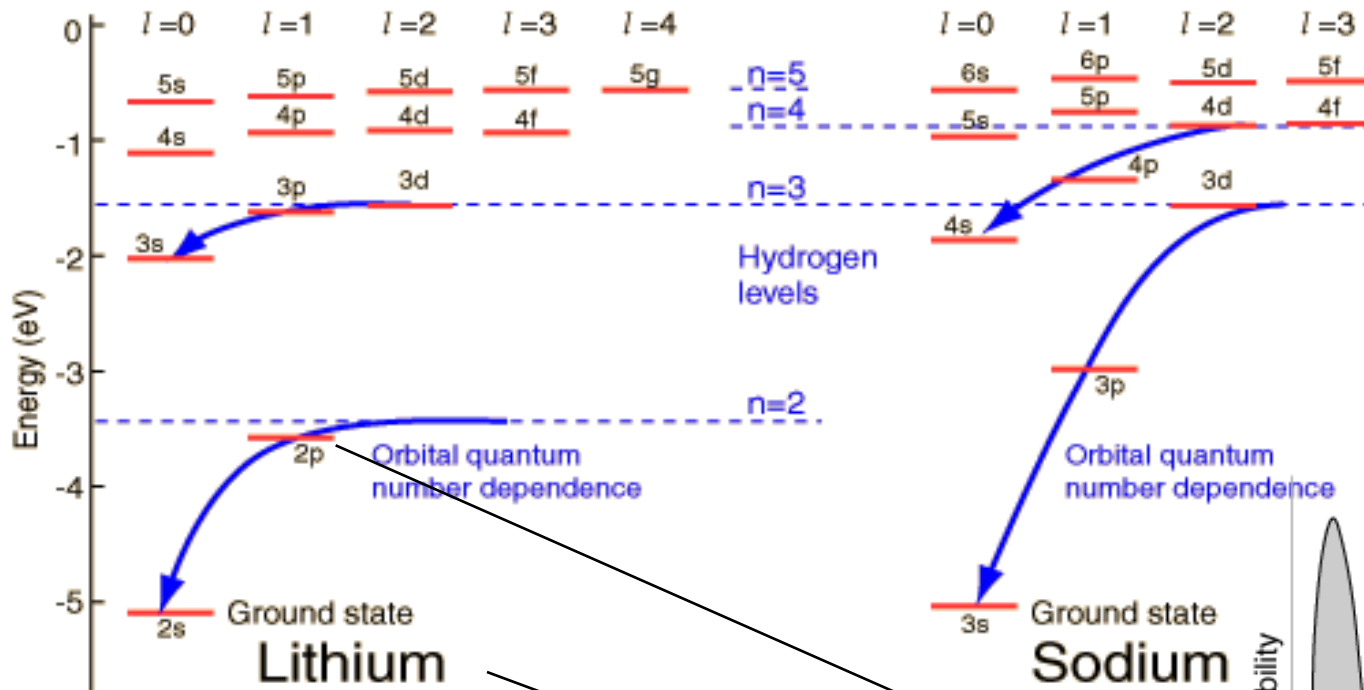
- Para um elétron único, a energia é determinada pelo número quântico principal, que é usado para indicar a camada.
- Para uma dada camada em átomos multi-eletrônicos, elétrons com número quântico orbital mais baixo terão energia menor, devido a maior penetração na blindagem dos elétrons das camadas internas

Elementos de transição

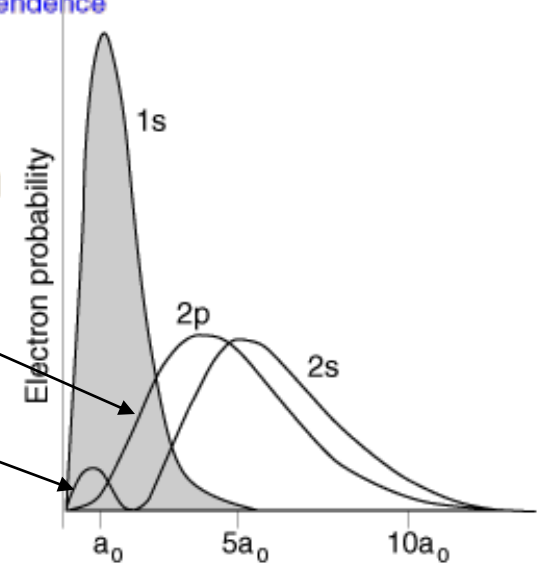
Existem algumas exceções:  
a primeira é o cromo, seguido de cobre  
(alguns 3d são preenchidos antes do segundo 4s),  
molibdênio e prata



# Dependência das energias eletrônicas com o número quântico orbital



Se a blindagem dos elétrons 1s fosse perfeita, os elétrons 2s e 2p teriam a energia de  $n = 2$  (níveis do H)



# A tabela periódica dos elementos

Periodic table of the elements

group 1*																18 0		
Ia**	IIa												IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	2
1 <b>H</b>	2 <b>He</b>												5 <b>B</b>	6 <b>C</b>	7 <b>N</b>	8 <b>O</b>	9 <b>F</b>	10 <b>Ne</b>
3 <b>Li</b>	4 <b>Be</b>											13 <b>Al</b>	14 <b>Si</b>	15 <b>P</b>	16 <b>S</b>	17 <b>Cl</b>	18 <b>Ar</b>	
11 <b>Na</b>	12 <b>Mg</b>	3 IIIb	4 IVb	5 Vb	6 VIb	7 VIIb	8 VIIIb		10 Ib	12 IIb	31 <b>Ga</b>	32 <b>Ge</b>	33 <b>As</b>	34 <b>Se</b>	35 <b>Br</b>	36 <b>Kr</b>		
19 <b>K</b>	20 <b>Ca</b>	21 <b>Sc</b>	22 <b>Ti</b>	23 <b>V</b>	24 <b>Cr</b>	25 <b>Mn</b>	26 <b>Fe</b>	27 <b>Co</b>	28 <b>Ni</b>	29 <b>Cu</b>	30 <b>Zn</b>	49 <b>In</b>	50 <b>Sn</b>	51 <b>Sb</b>	52 <b>Te</b>	53 <b>I</b>	54 <b>Xe</b>	
37 <b>Rb</b>	38 <b>Sr</b>	39 <b>Y</b>	40 <b>Zr</b>	41 <b>Nb</b>	42 <b>Mo</b>	43 <b>Tc</b>	44 <b>Ru</b>	45 <b>Rh</b>	46 <b>Pd</b>	47 <b>Ag</b>	48 <b>Cd</b>	81 <b>Tl</b>	82 <b>Pb</b>	83 <b>Bi</b>	84 <b>Po</b>	85 <b>At</b>	86 <b>Rn</b>	
55 <b>Cs</b>	56 <b>Ba</b>	57 <b>La</b>	72 <b>Hf</b>	73 <b>Ta</b>	74 <b>W</b>	75 <b>Re</b>	76 <b>Os</b>	77 <b>Ir</b>	78 <b>Pt</b>	79 <b>Au</b>	80 <b>Hg</b>	113 *** <b>(Uub)</b>	114 *** <b>(Uut)</b>	115 *** <b>(Uuq)</b>	116 *** <b>(Uup)</b>	117 *** <b>(Uuh)</b>	118 *** <b>(Uuo)</b>	
87 <b>Fr</b>	88 <b>Ra</b>	89 <b>Ac</b>	104 <b>Rf</b>	105 <b>Db</b>	106 <b>Sg</b>	107 <b>Bh</b>	108 <b>Hs</b>	109 <b>Mt</b>	110 <b>Ds</b>	111 <b>Rg</b>	112 *** <b>(Uub)</b>	113 *** <b>(Uut)</b>	114 *** <b>(Uuq)</b>	115 *** <b>(Uup)</b>	116 *** <b>(Uuh)</b>	117 *** <b>(Uuh)</b>	118 *** <b>(Uuo)</b>	
lanthanide series 6		58 <b>Ce</b>	59 <b>Pr</b>	60 <b>Nd</b>	61 <b>Pm</b>	62 <b>Sm</b>	63 <b>Eu</b>	64 <b>Gd</b>	65 <b>Tb</b>	66 <b>Dy</b>	67 <b>Ho</b>	68 <b>Er</b>	69 <b>Tm</b>	70 <b>Yb</b>	71 <b>Lu</b>			
actinide series 7		90 <b>Th</b>	91 <b>Pa</b>	92 <b>U</b>	93 <b>Np</b>	94 <b>Pu</b>	95 <b>Am</b>	96 <b>Cm</b>	97 <b>Bk</b>	98 <b>Cf</b>	99 <b>Es</b>	100 <b>Fm</b>	101 <b>Md</b>	102 <b>No</b>	103 <b>Lr</b>			

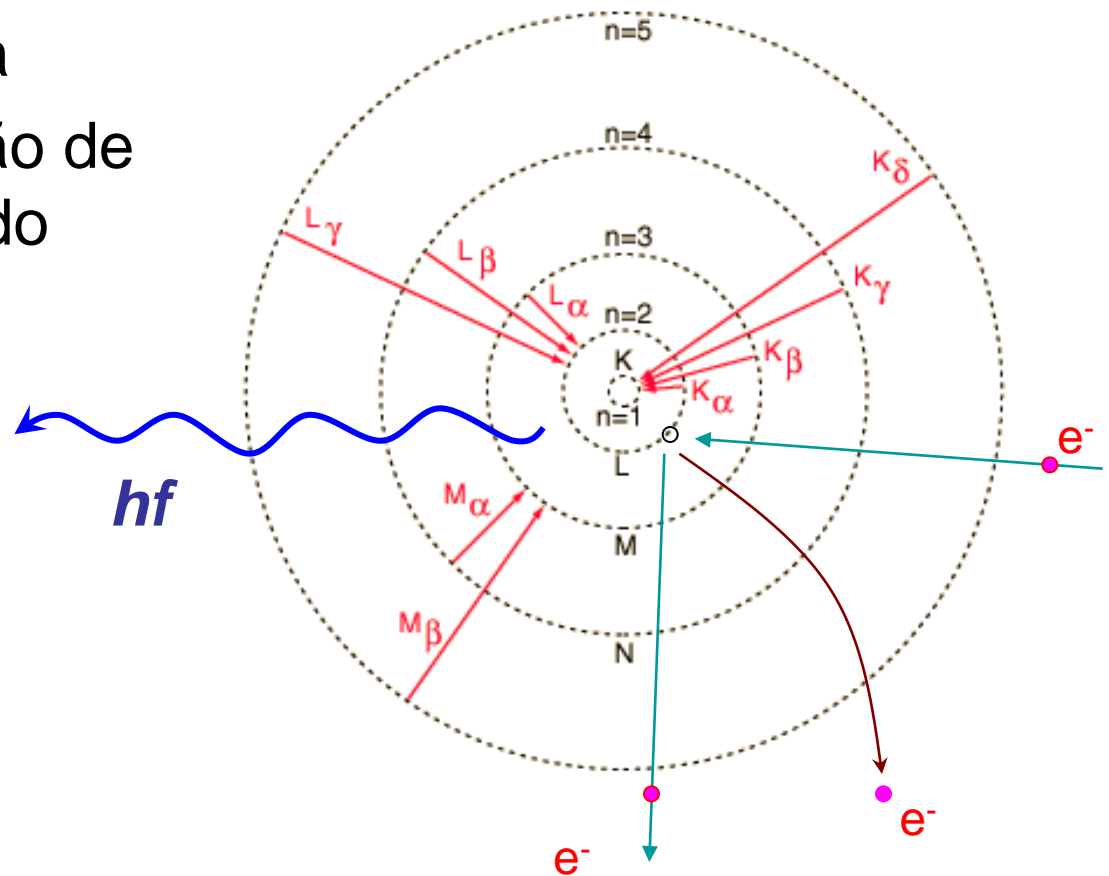
\* Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).

\*\* Numbering system widely used, especially in the U.S., from the mid-20th century.

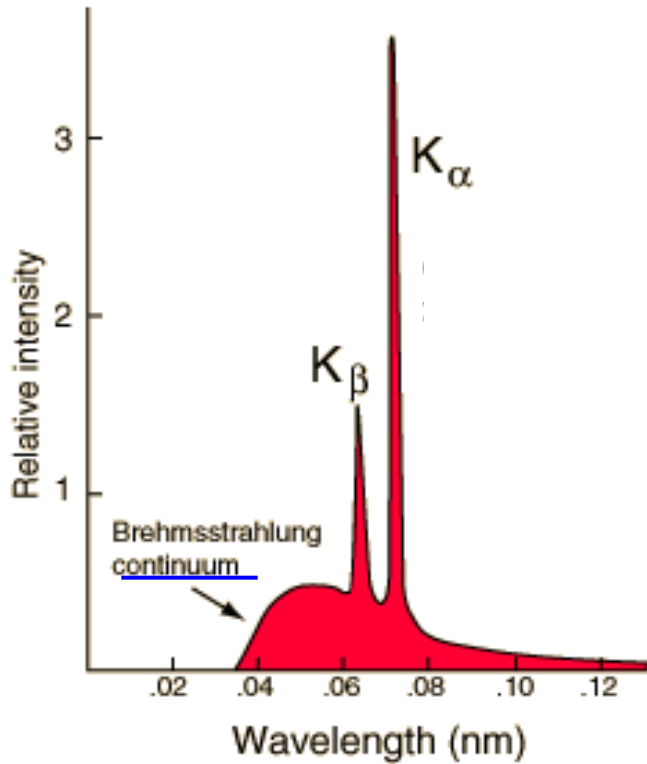
\*\*\* Discoveries of elements 112–116 are claimed but not confirmed. Element names and symbols in parentheses are temporarily assigned by IUPAC.

# Espectro de raios X

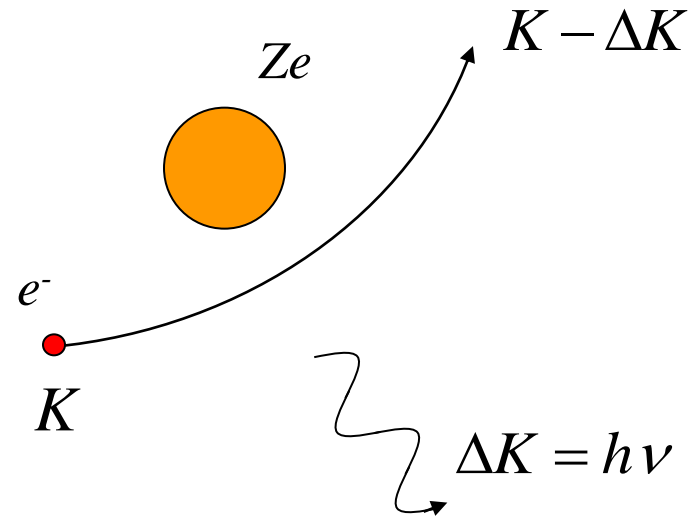
- A tabela periódica passou a ser determinada pelo número atômico e não pela massa atômica
- As linhas de emissão de raios X dependem do elemento químico



# Espectro característico



Linhas K do molibdênio a 35 kV



$$K = h\nu_{\text{máx}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{mín}}}$$

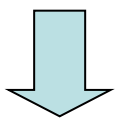
$$\lambda_{\text{mín}} = \frac{hc}{K}$$

# Espectro característico

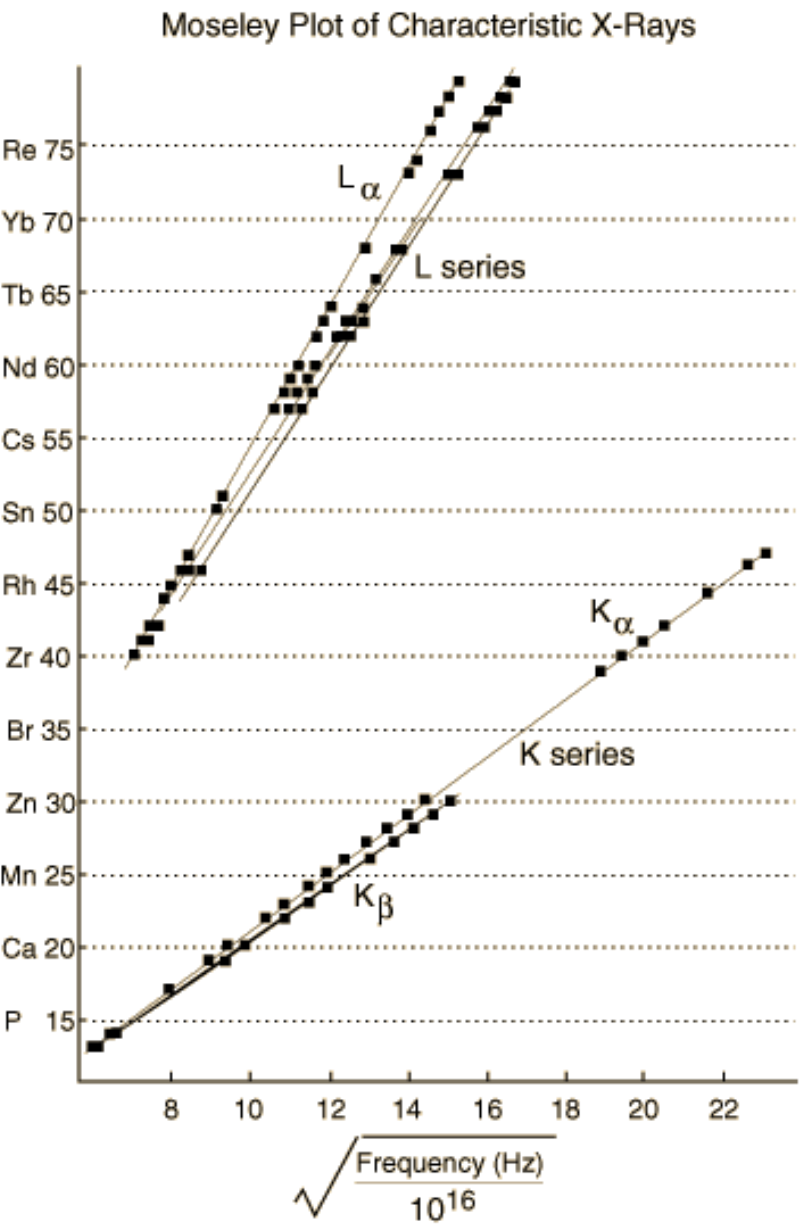
$$\nu_{n \rightarrow n'} = \frac{E_n - E_{n'}}{h} = \frac{Z^2 m e^4}{8 \epsilon_0^2 h^3} \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n' = n_1 = 1 \quad \text{e} \quad n = n_2 = 2$$

$$Z \rightarrow Z - 1 \quad (\text{blindagem})$$



$$\sqrt{\nu} = \sqrt{\frac{3 m e^4}{32 \epsilon_0^2 h^3}} (Z - 1) = a (Z - 1)$$



Adapted from Moseley's original data (H. G. J. Moseley, Philos. Mag. (6) 27:703, 1914)



# Tópicos adicionais

# Lasers

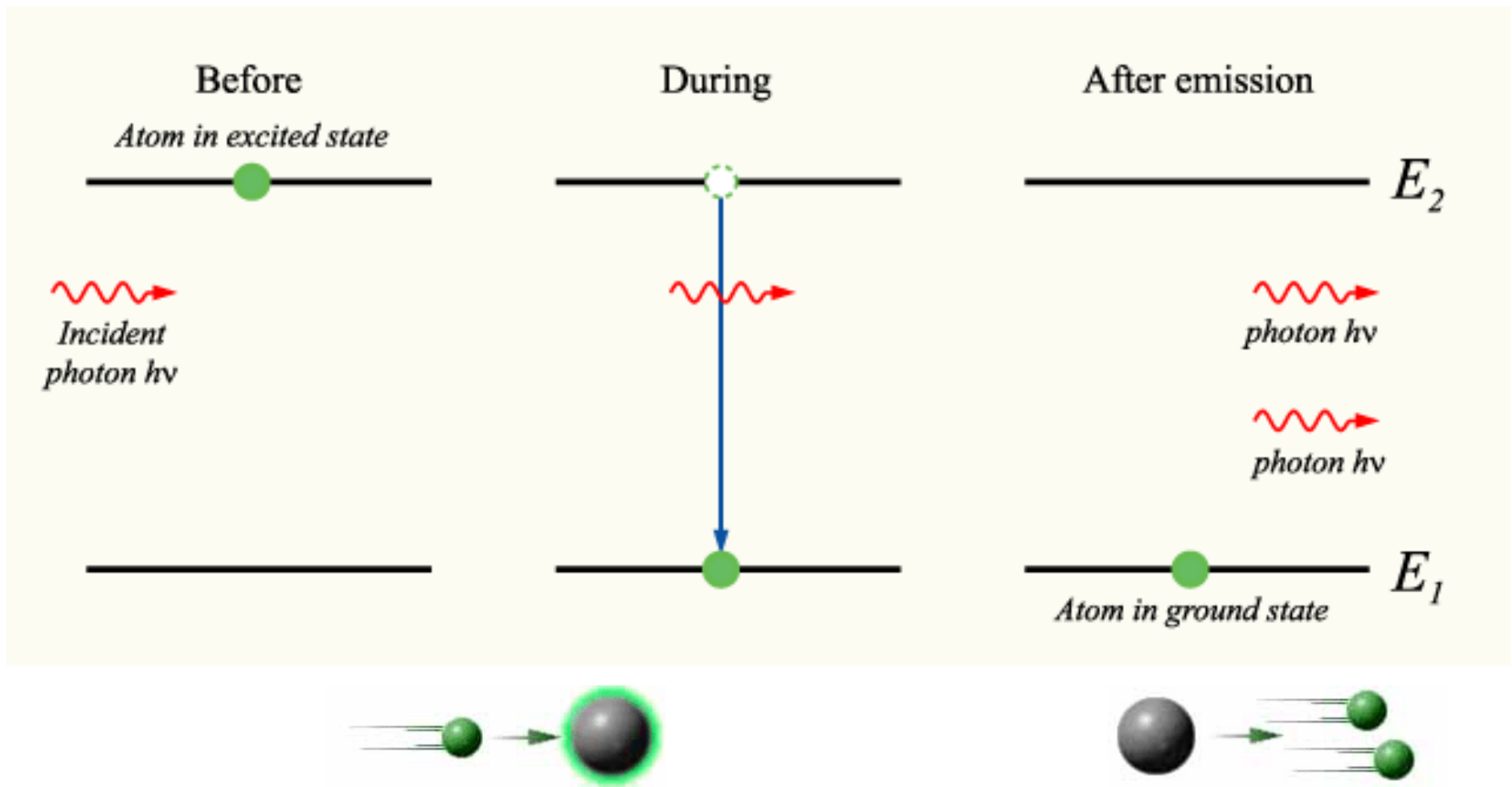
## Propriedades

- Luz altamente monocromática  $\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-15}$  X  $\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-6}$  para descarga num gás
- Luz altamente coerente  $\xi \approx 10^2 \text{ km}$  X  $\xi \approx 1 \text{ m}$  para descarga num gás
- Luz altamente colimada: divergência só depende da difração
- Luz precisamente focalizável

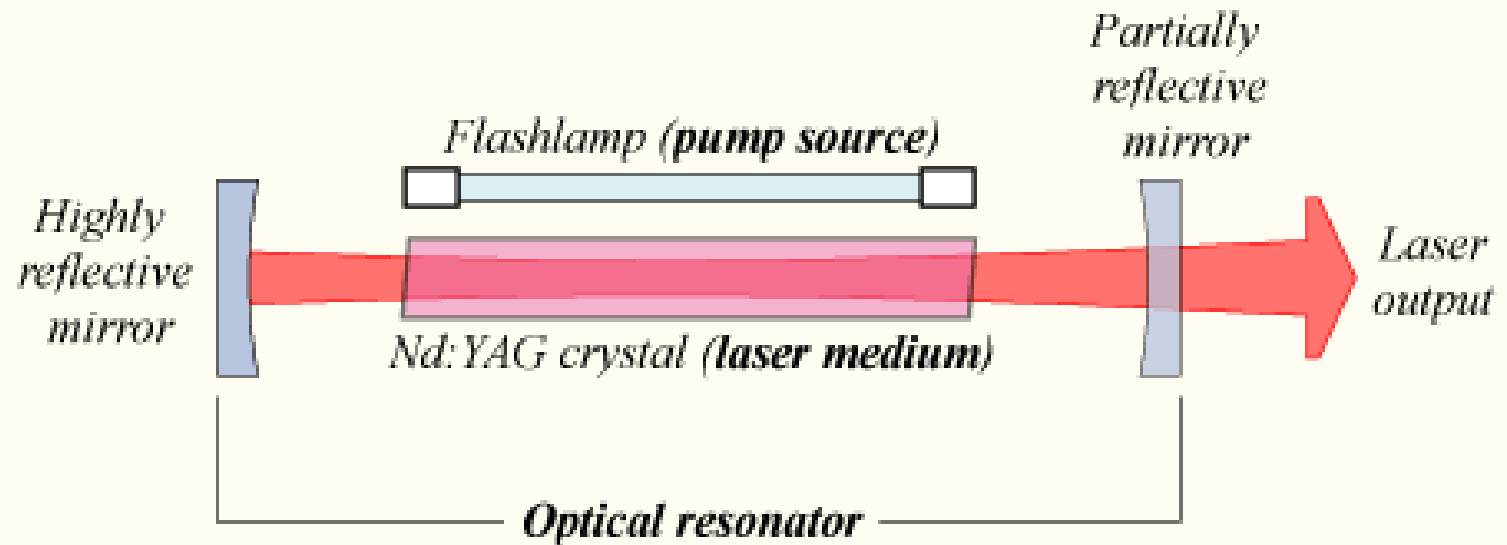


# Lasers

<http://www.colorado.edu/physics/2000/lasers/index.html>



## Nd:YAG solid-state laser



# Lasers

