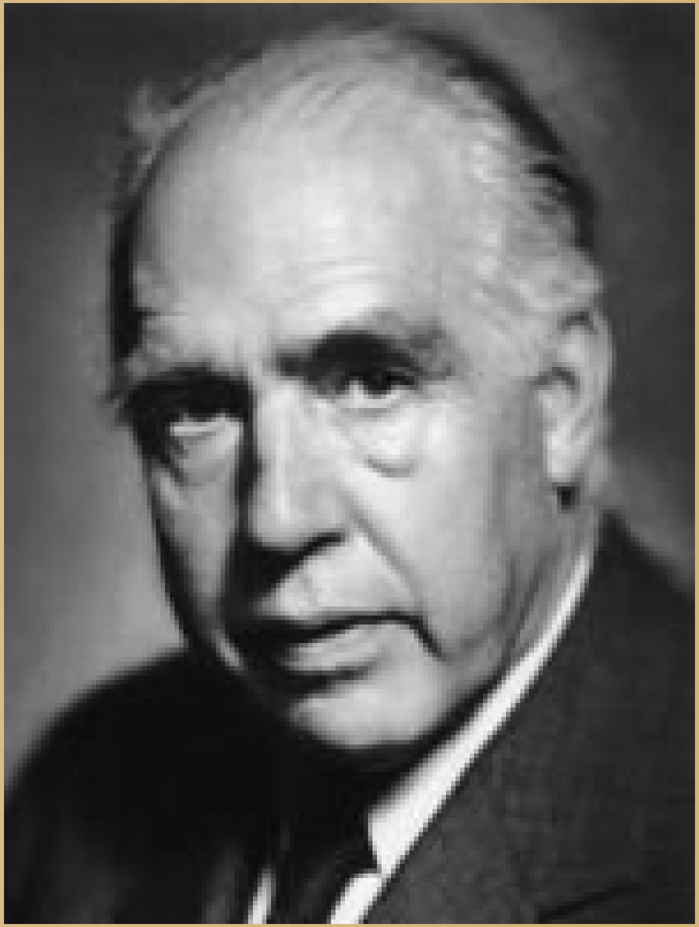
5. Modelo atômico de Bohr

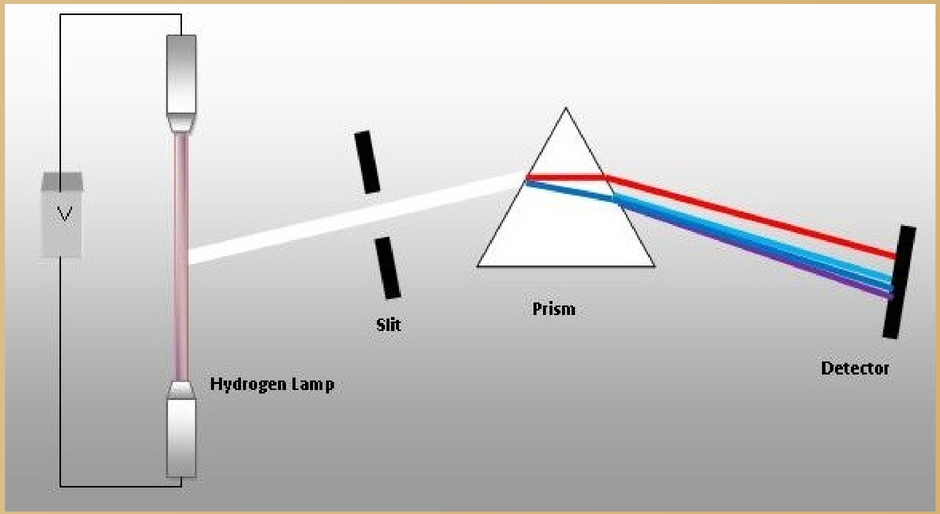


Sumário

- Espectros atômicos
- Modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio
- Níveis de energia e raias espectrais
- Experiência de Franck-Hertz
- O princípio da correspondência
- Correção do movimento nuclear

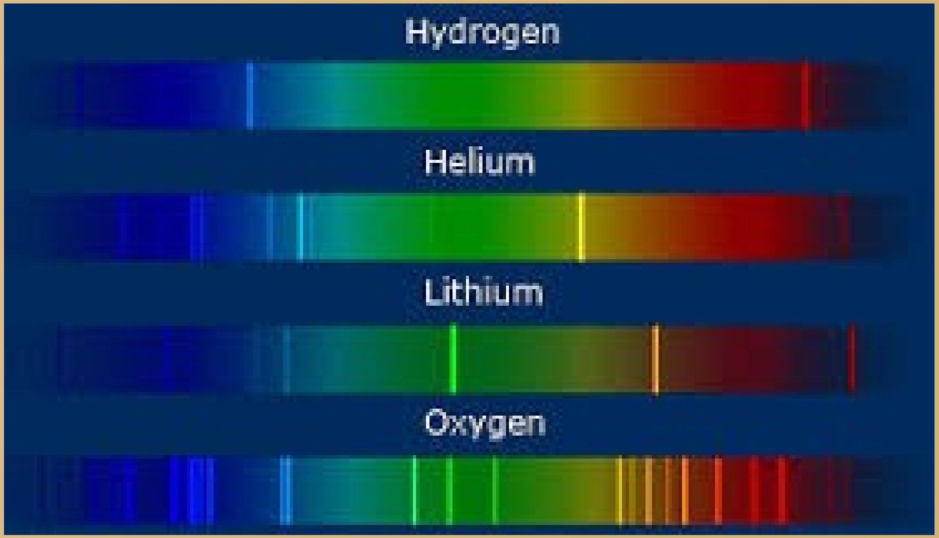
Espectros atômicos

- quando um gás atômico (ou vapor a baixa pressão) é excitado pela passagem de corrente elétrica, a radiação emitida possui um espectro que contém apenas alguns comprimentos de onda discretos



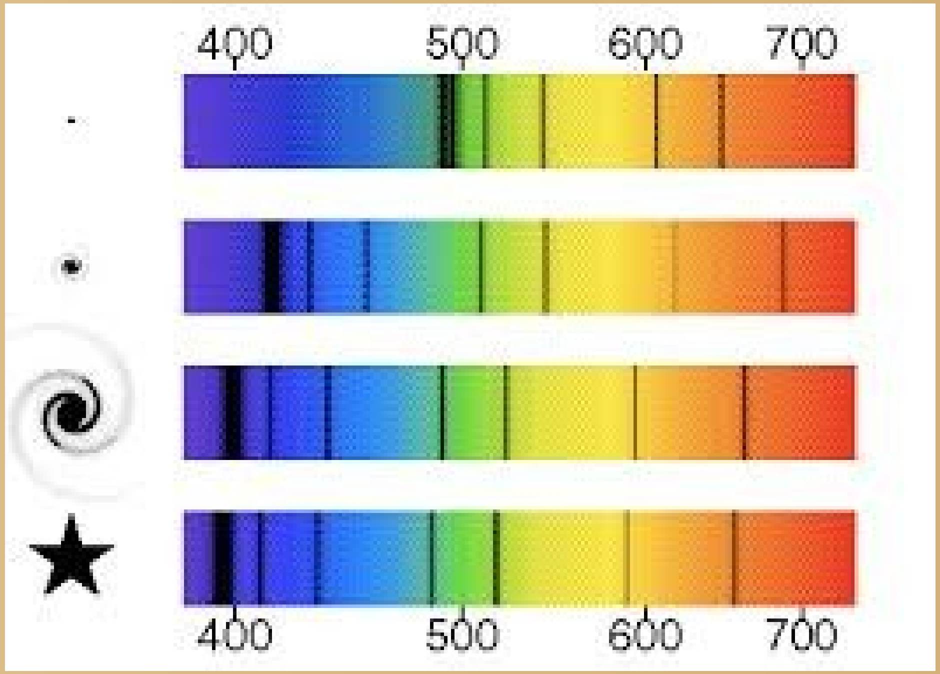
Espectros de emissão de linha

- cada elemento químico exibe um único espectro de linhas quando uma amostra do mesmo (no estado de vapor) é excitada (corrente)
- a espectroscopia é usada na identificação de elementos químicos numa amostra



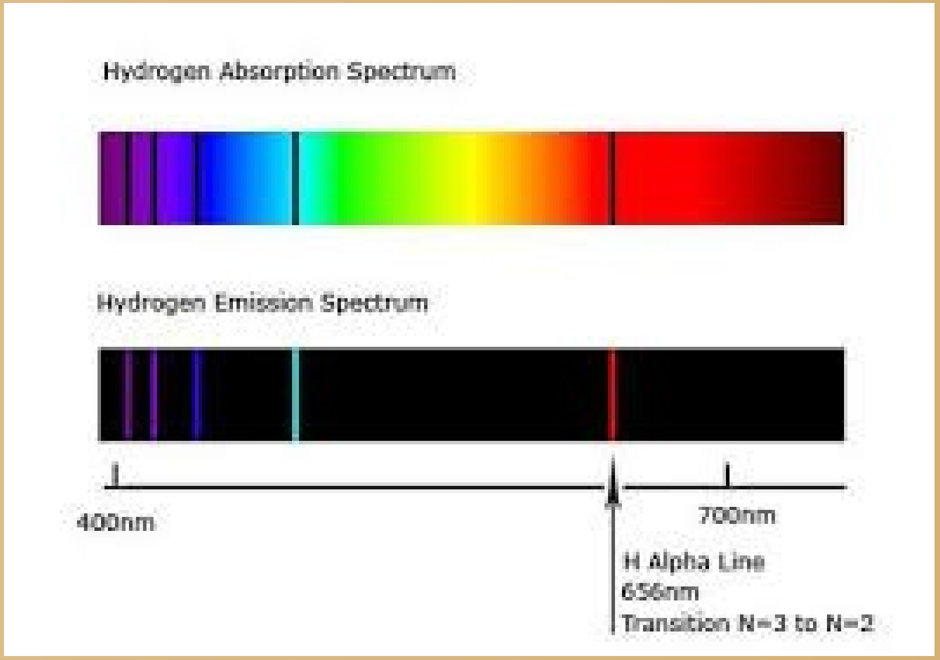
Espectro de absorção de linha

- quando luz branca atravessa um gás, ele absorve luz de certos comprimentos de onda presentes no seu espectro de emissão
- fundo claro atravessado por linhas escuras correspondendo aos comprimentos de onda em falta



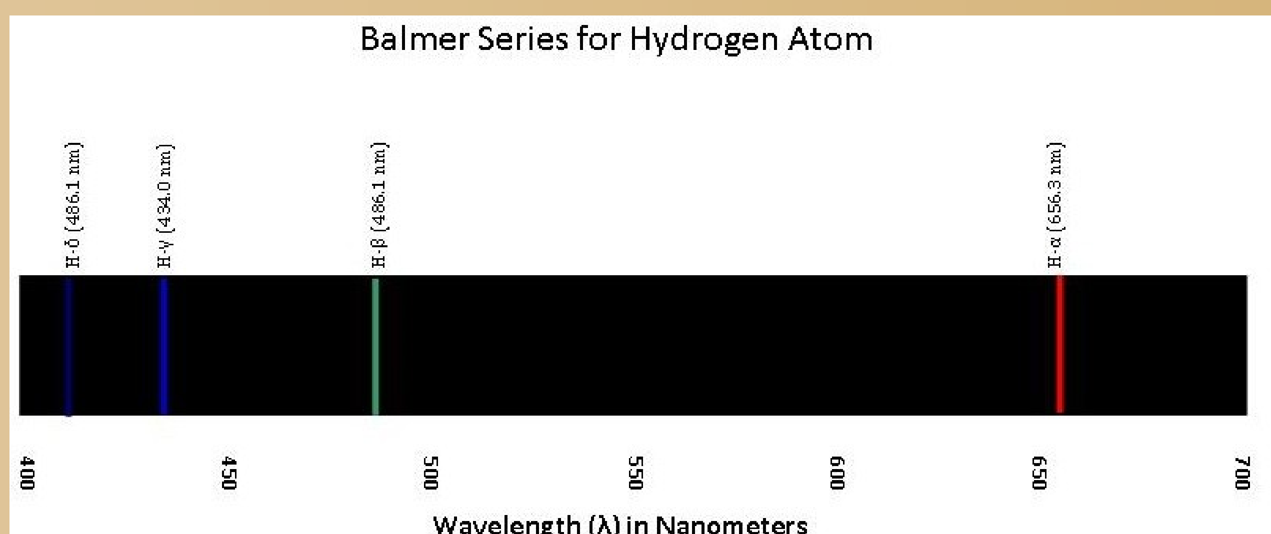
Espectros de emissão e absorção

- espectros de emissão: linhas claras sobre um fundo escuro
- espectros de absorção: linhas escuras sobre um fundo claro
- os dois espectros são complementares



Séries espectrais

- são conjuntos de linhas espectrais correspondentes a certos comprimentos de onda
- Balmer (1885): espectro de emissão do hidrogênio, com linhas
- Hα: λ = 656,3 nm
- Hβ: λ = 486,3 nm, etc
- limite: λ = 364,6 nm

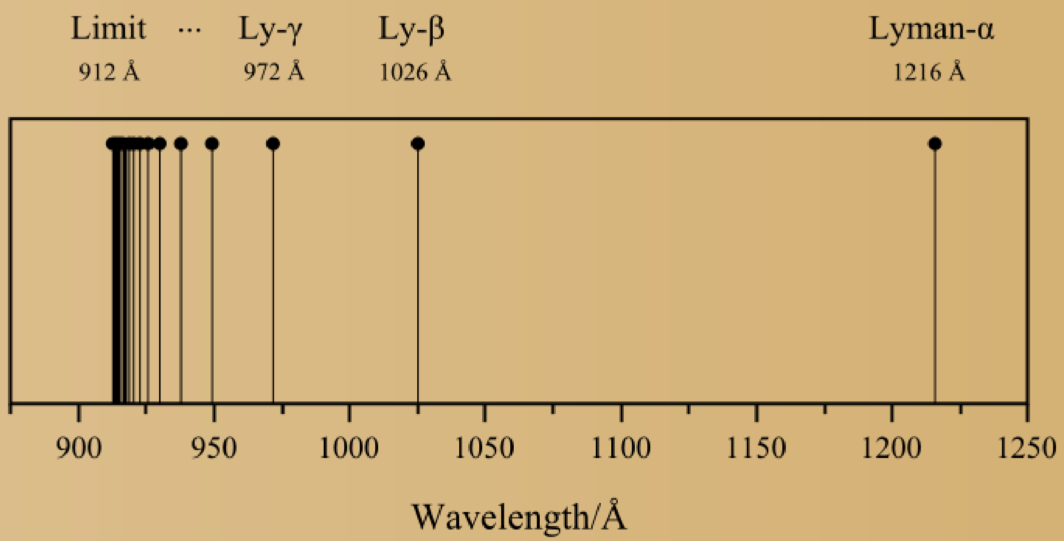


Fórmula de Balmer

- fornece as linhas da série de Balmer (esp. visível)
- $1/\lambda = R\,(1/2^2 - 1/n^2)$
- n = 3, 4, 5, 6, ...
- R: constante de Rydberg = $1{,}097 \times 10^7\ m^{-1}$
- n = 3: linha Hα
- n = 4: linha Hβ
- n = ∞: limite da série

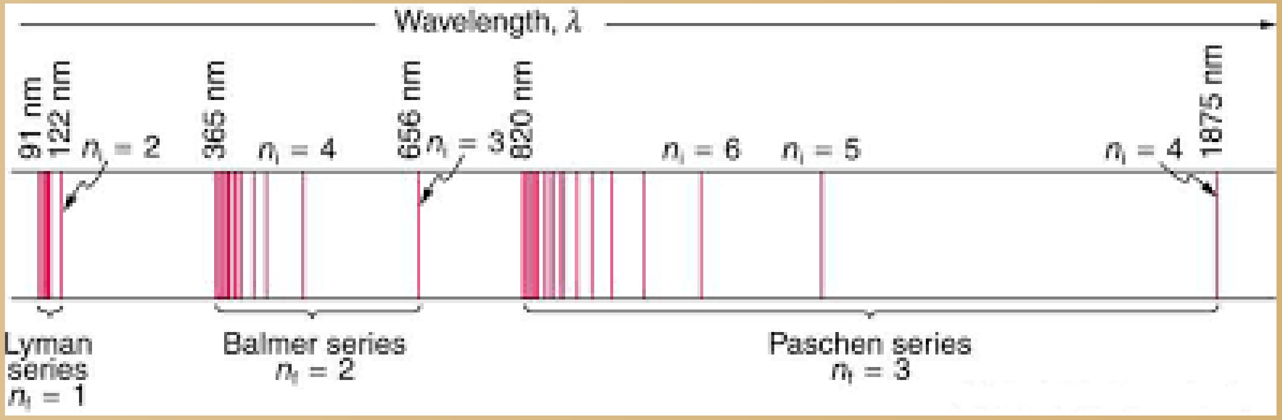
Série de Lyman

- linhas espectrais do hidrogênio na faixa do ultravioleta
- $1/\lambda = R\,(1/1^2 - 1/n^2)$
- n = 2, 3, 4,...
- n = 2: linha α
- n = 3: linha β
- n = ∞: limite da série



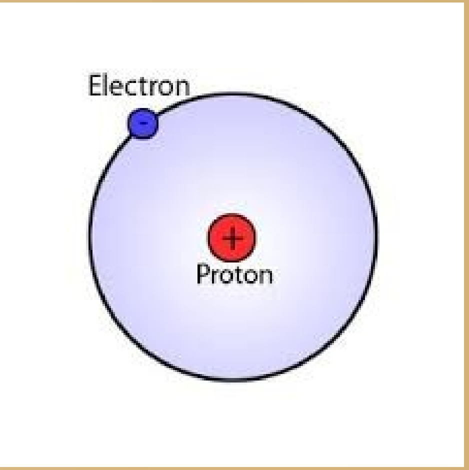
Séries no infravermelho

- Série de Paschen
- $1/\lambda = R\,(1/3^2 - 1/n^2)$
- $n = 4, 5, 6, \ldots$
- Série de Brackett
- $1/\lambda = R\,(1/4^2 - 1/n^2)$
- $n = 5, 6, 7, \ldots$
- Série de Pfund
- $1/\lambda = R\,(1/5^2 - 1/n^2)$
- $n = 6, 7, 8, \ldots$



Modelo de Bohr para o átomo de Hidrogênio (1913)

- parte do modelo de Rutherford: elétron em órbitas circulares com velocidade $v = e/\sqrt{4\pi\varepsilon_0 m r}$



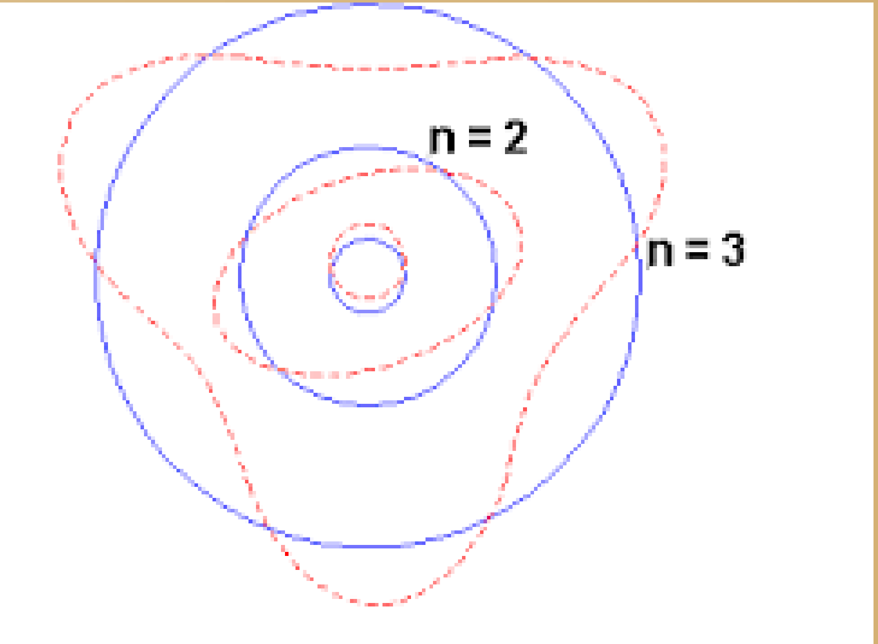
- comprimento de onda de De Broglie para o elétron numa órbita

  $\lambda = h/mv = (h/e)\sqrt{4\pi\varepsilon_0 r/m}$

- usando $r = 5{,}3 \times 10^{-11}$ m obtemos $\lambda = 3{,}3 \times 10^{-10}$ m
- é igual ao valor da circunferência da órbita, $2\pi r$

Ondas de matéria estacionárias

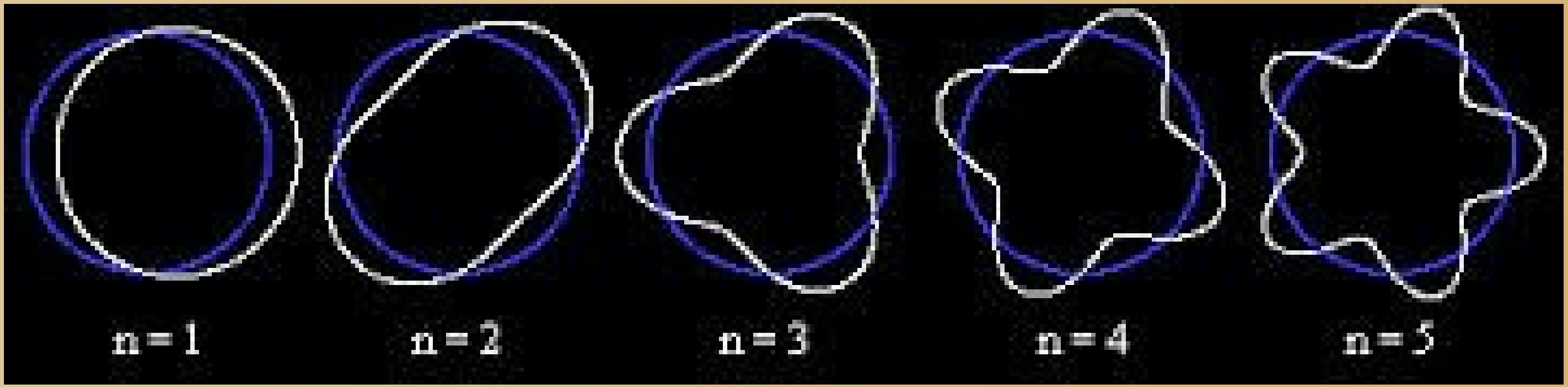
- a órbita do elétron corresponde a uma onda completa do elétron unida consigo mesma
- um elétron pode girar sem irradiar energia desde que sua órbita contenha um número inteiro de comprimentos de onda de De Broglie



The standing de Broglie waves set up in the first three Bohr orbits.

Condição para órbitas estacionárias

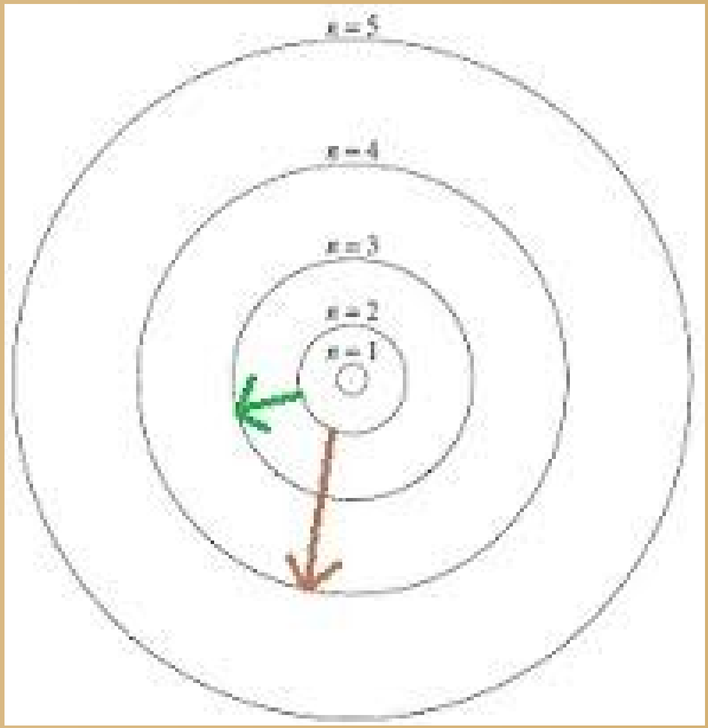
- a circunferência da órbita deve ser igual a um número inteiro de comprimentos de onda (interferência construtiva)
- $n \lambda = 2 \pi r_n$
- n = 1, 2, 3, ...: número quântico orbital
- caso contrário: interferência destrutiva



Raios das órbitas eletrônicas

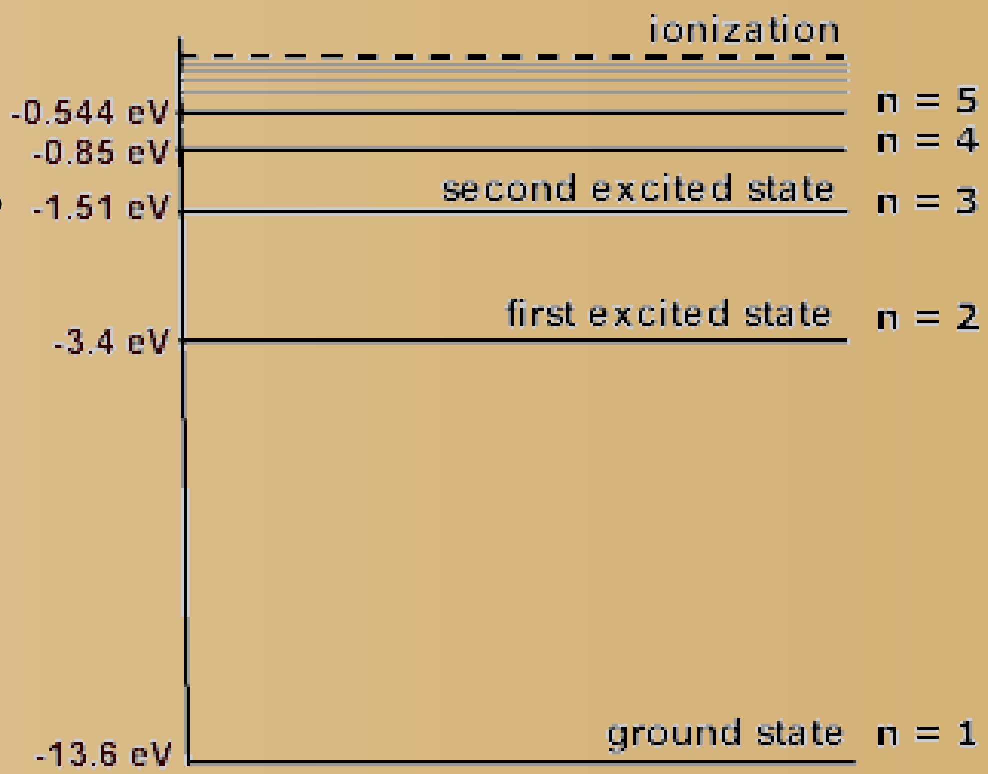
Usando

- $\lambda = (h / e)\sqrt{4 \pi \varepsilon_0 r / m}$
- raios das órbitas estáveis do elétron
- $r_n = n^2 h^2 \varepsilon_0 / \pi m e^2$
- $n = 1, 2, 3, ...$
- órbita mais interna (raio de Bohr)
- $r_1 = 5{,}3 \times 10^{-11}$ m
- $r_n = n^2 r_1$ (outras órbitas)



Níveis de energia

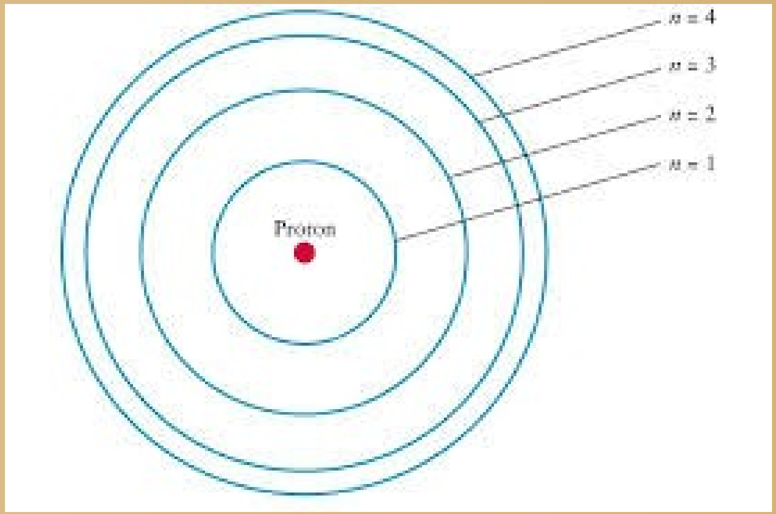
- raios das órbitas
- $r_n = -e^2/8\pi\varepsilon_0 E_n$
- energia das órbitas permitidas
- $E_n = -e^2/8\pi\varepsilon_0 r_n$
- $r_n = n^2 h^2 \varepsilon_0 / \pi m e^2$
- $E_n = -me^4/8\varepsilon_0^2 h^2 n^2$
- n=1: E_1 = - 13,6 eV: estado fundamental do átomo
- $E_n = E_1/n^2$ (n=2,3,4,...)



n=∞: E = 0: elétron deixa de estar ligado ao núcleo: ionização do átomo

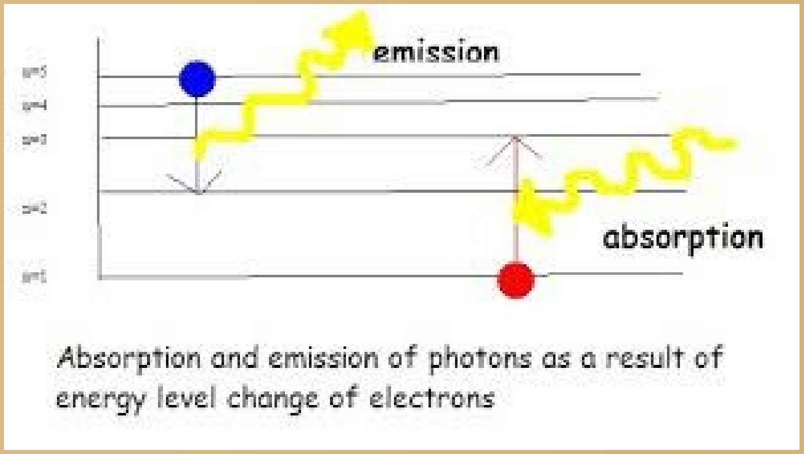
Problema proposto

- Considere os níveis de energia correspondentes aos números quânticos n = 2, 3, 4. Determine os raios das órbitas correspondentes (em Angstrom) e os valores da energia (em elétron-volt).



Transição entre níveis de energia

- se um elétron passa de um nível de energia inicial E_i a um nível final E_f, a energia liberada ou absorvida corresponde a um fóton cuja energia é dada por
- $E_i – E_f = h\nu$
- Considerando
- $E_i = -me^4/8\varepsilon_0^2h^2n_i^2$
- $E_f = -me^4/8\varepsilon_0^2h^2n_f^2$
- $\nu = (me^4/8\varepsilon_0^2h^3)(1/n_f^2 – 1/n_i^2)$



Absorption and emission of photons as a result of energy level change of electrons

Valor da constante de Rydberg R

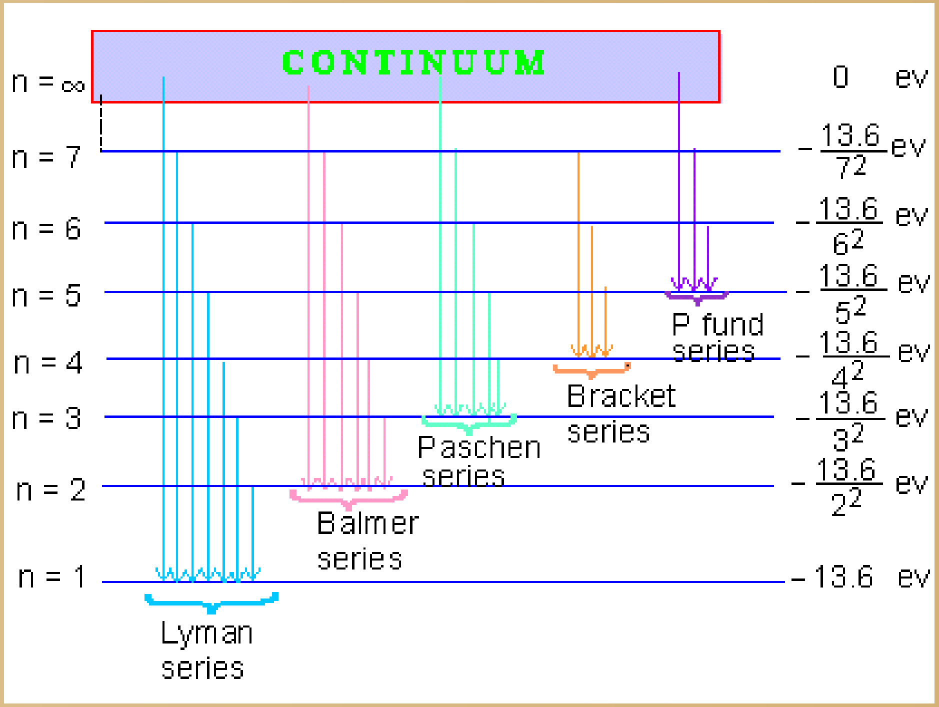
- modelo de Bohr prevê

  $1/\lambda = (me^4/8c\varepsilon_0^2h^3)(1/n_f^2 - 1/n_i^2)$

- espectroscopia prevê
- $1/\lambda = R\ (1/m^2 - 1/n^2)$
- $R = me^4/8c\varepsilon_0^2h^3 =$

  $1{,}097 \times 10^7\ m^{-1}$

- concorda plenamente com o valor experimental!

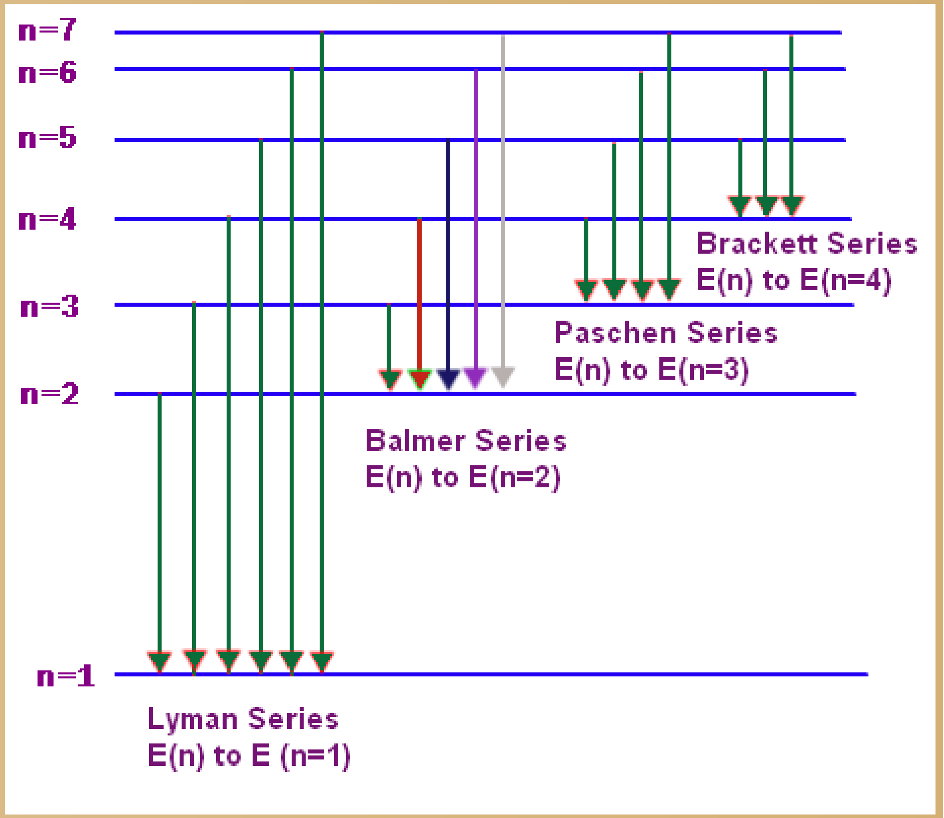


Espectro do hidrogênio

- comprimento de onda do fóton emitido na transição entre dois níveis: $\lambda = c/\nu$

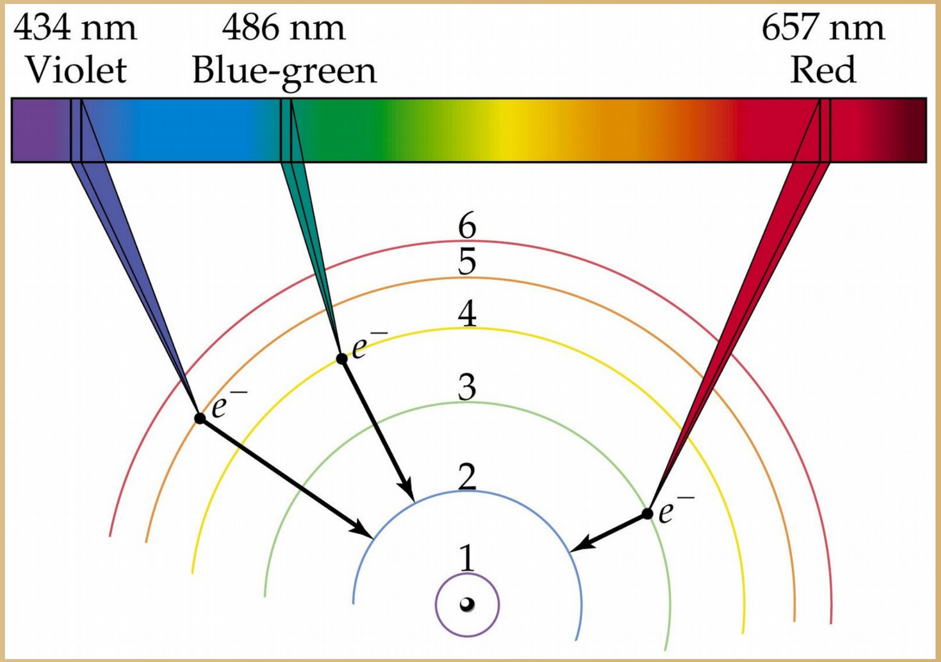
  $1/\lambda = (me^4/8c\varepsilon_0^2h^3)(1/n_f^2 - 1/n_i^2)$

- série de Lyman: $n_f = 1$
- série de Balmer: $n_f = 2$
- série de Paschen: $n_f = 3$
- série de Brackett: $n_f = 4$
- série de Pfund: $n_f = 5$



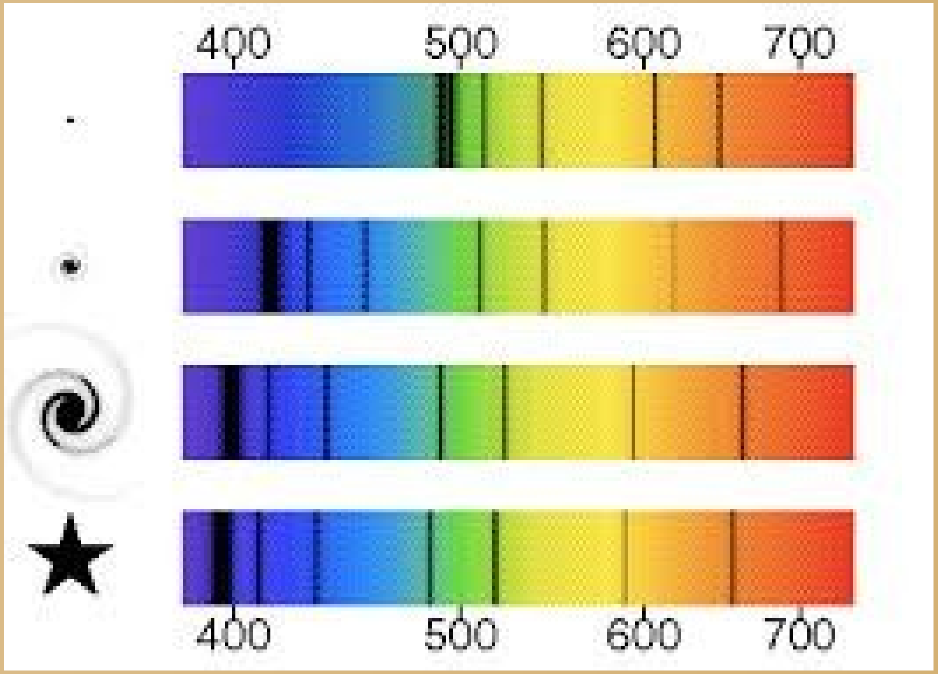
Problema resolvido

- Ache a frequência e o comprimento de onda do fóton que é emitido quando um átomo de hidrogênio sofre uma transição do nível com n = 5 para o nível com n = 2. De que série espectral pertence a luz emitida?



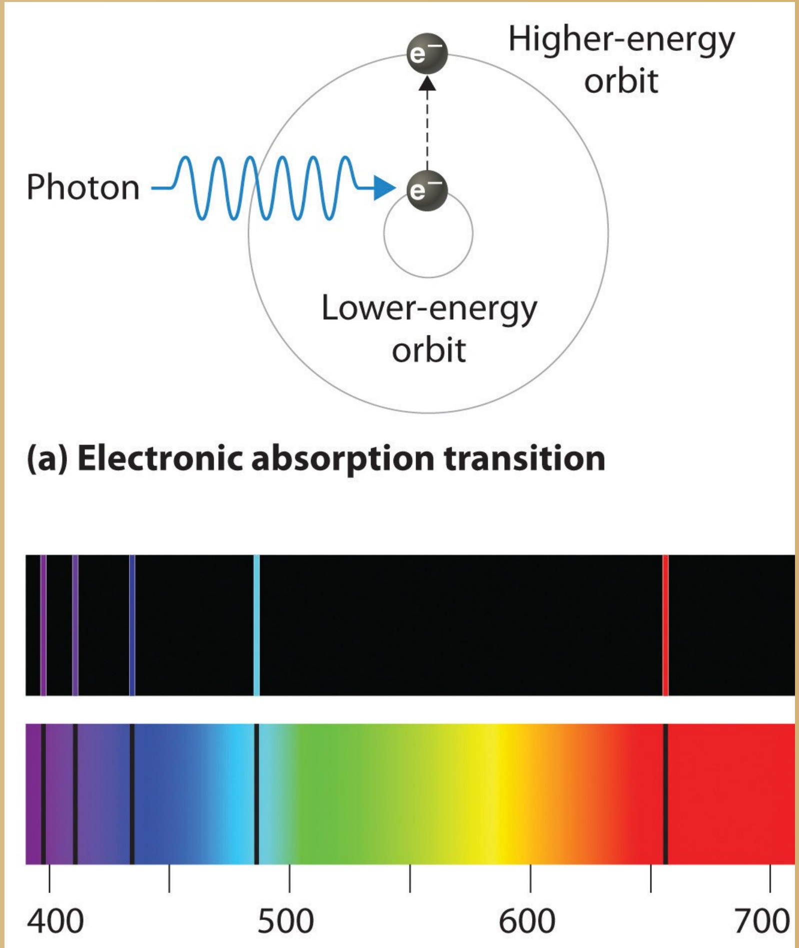
Problemas propostos

- Determine os comprimentos de onda mais longos e mais curtos da série de Lyman do hidrogênio
- Ache todos os comprimentos de onda do hidrogênio emitidos na faixa visível do espectro (380 nm até 770 nm)



Espectros de absorção

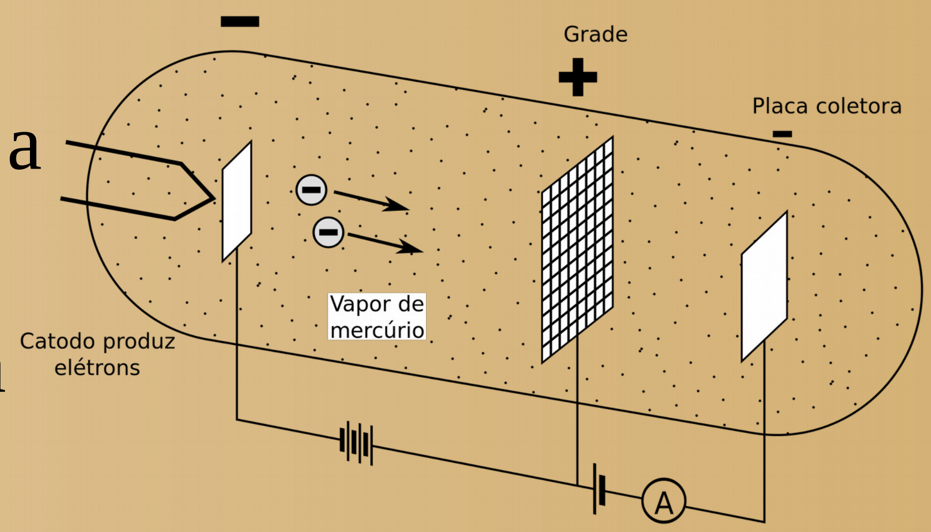
- um átomo absorve um fóton com frequência igual a $\nu = (E_f - E_i)/h$
- o elétron passa de um nível mais baixo para um nível mais alto de energia
- luz branca que incide em hidrogênio gasoso terá subtraídos os comprimentos de onda que levaram a transições eletrônicas



(b) H_2 emission spectrum (top), H_2 absorption spectrum (bottom)

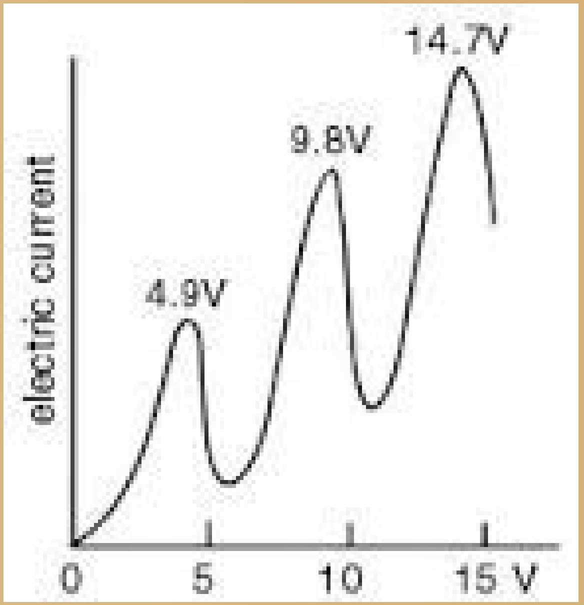
Experiência de Franck-Hertz (1914)

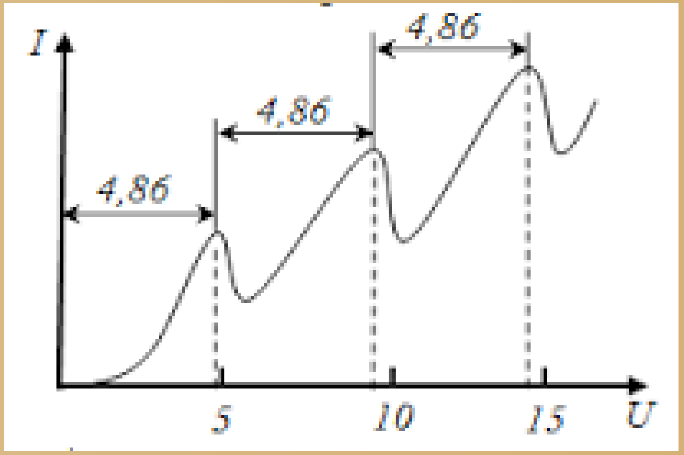
- tubo de descarga elétrica com vapores de vários elementos (ddp V entre os eletrodos)
- é mantida uma ddp V_0 entre a grade e a placa coletora
- apenas elétrons com energia superior a um certo mínimo contribuem para a corrente elétrica que passa por um galvanômetro



Resultados da experiência

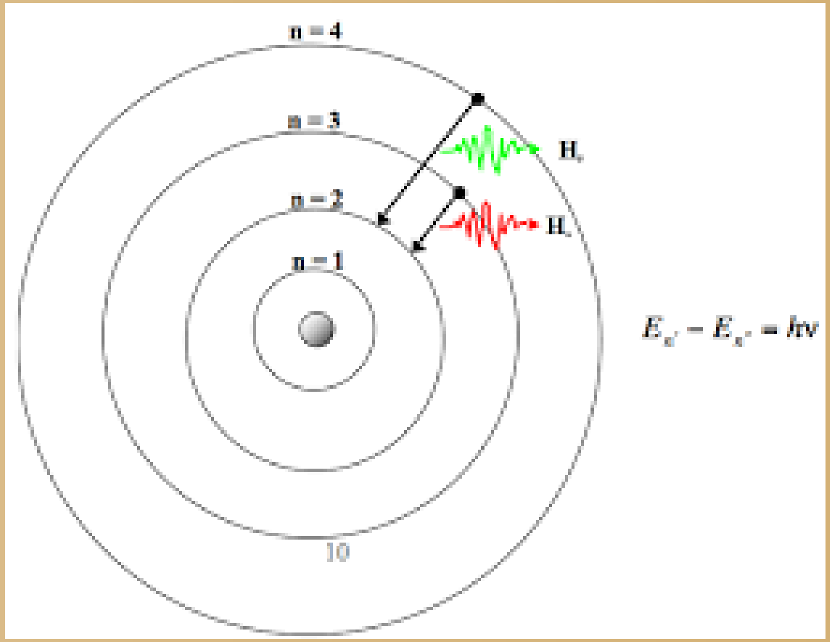
- alcançada uma energia crítica, a corrente na placa cai abruptamente
- os elétrons, ao colidir com os átomos do gás dentro do tubo, cede parte ou toda a sua energia cinética para excitar o átomo a um nível de energia acima do seu estado fundamental
- a energia crítica do elétron corresponde à energia de excitação do átomo
- Mercúrio: energia de 4,9 eV para excitar a linha 253,6 nm do espectro





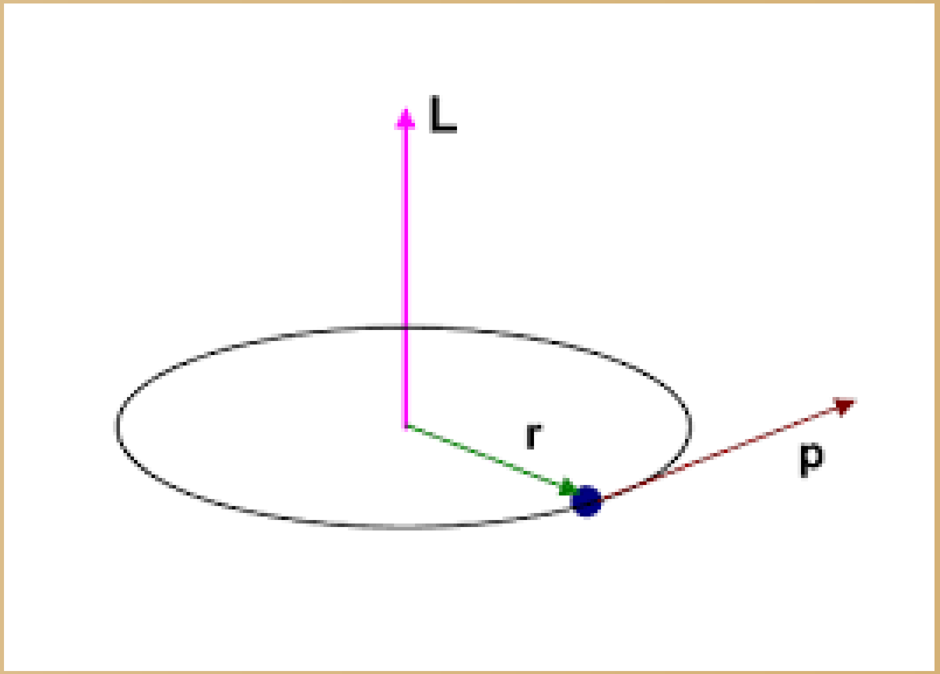
Princípio da correspondência

- Bohr: a física quântica fornece os mesmos resultados que a física clássica no limite de grandes números quânticos
- no átomo de hidrogênio, se n é alto a frequência do fóton emitido ≈ n^{-3}
- igual à frequência de revolução do elétron na órbita circular



Quantização do momento angular

- condição para órbitas estacionárias: $n\lambda = 2\pi r$, com $n = 1, 2, 3, ...$
- De Broglie: $\lambda = h/mv$
- momento angular $L = mvr$
- quantização: $L = nh/2\pi$
- velocidade angular: ω
- $m\omega r^2 = nh/2\pi$



Correção para o movimento nuclear

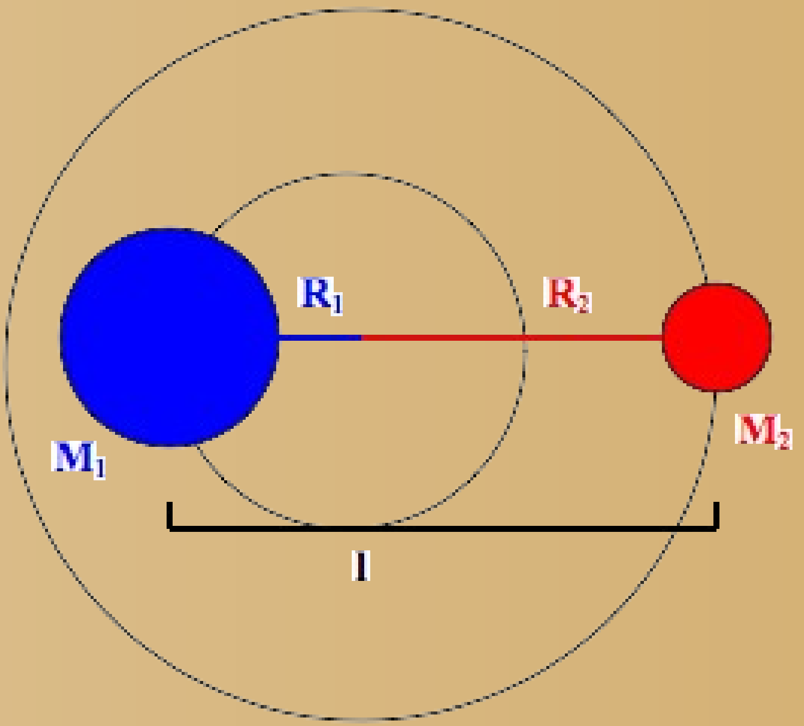
- se o núcleo possuir uma massa M, substituímos a massa do elétron m pela massa reduzida

  $m' = m M / (m+M)$

- níveis de energia corrigidos

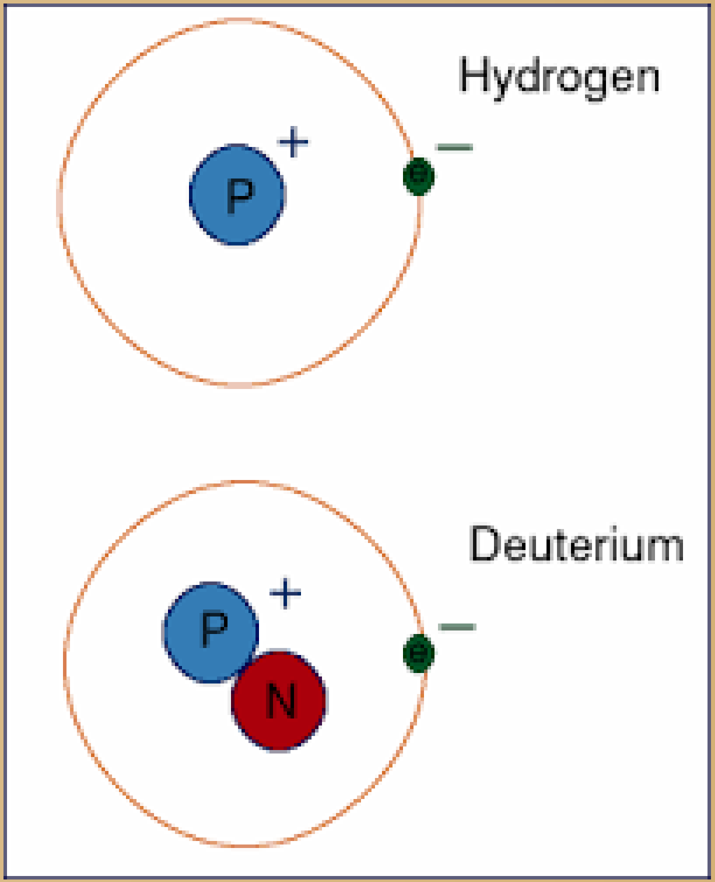
  $E_n = -m'e^4/8\varepsilon_0^2h^2n^2$

- níveis alterados por um fator $m'/m = 0{,}99945$ para o hidrogênio



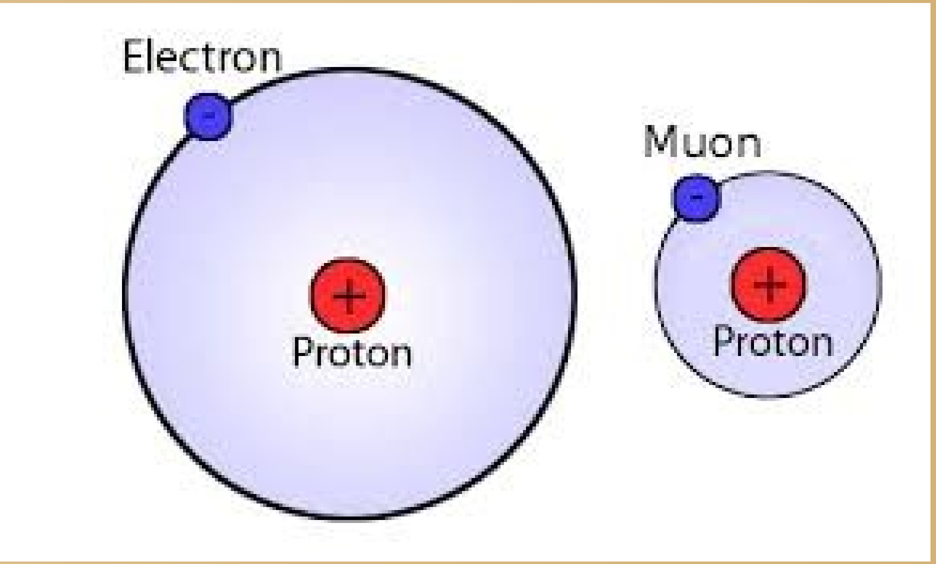
Deutério

- isótopo do hidrogênio, cuja massa atômica é o dobro do hidrogênio
- há um nêutron e um próton em seu núcleo
- a massa reduzida é alterada
- a linha espectral Hα possui comprimento de onda 656,1 nm para o hidrogênio e 656,3 nm para o deutério



Problema proposto

- Um méson μ^-, cuja massa de repouso é 207 maior que a do elétron, e cuja carga é a mesma, pode ser capturado por um próton e formar um átomo mesônico. Determine o raio da primeira órbita de Bohr do referido átomo.

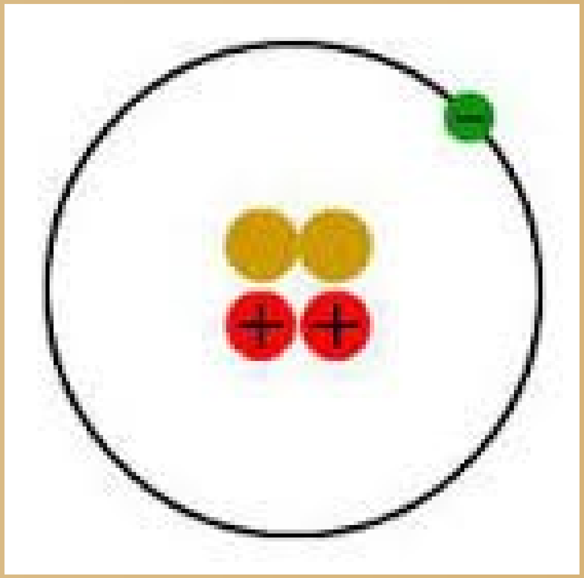


Átomos hidrogenóides

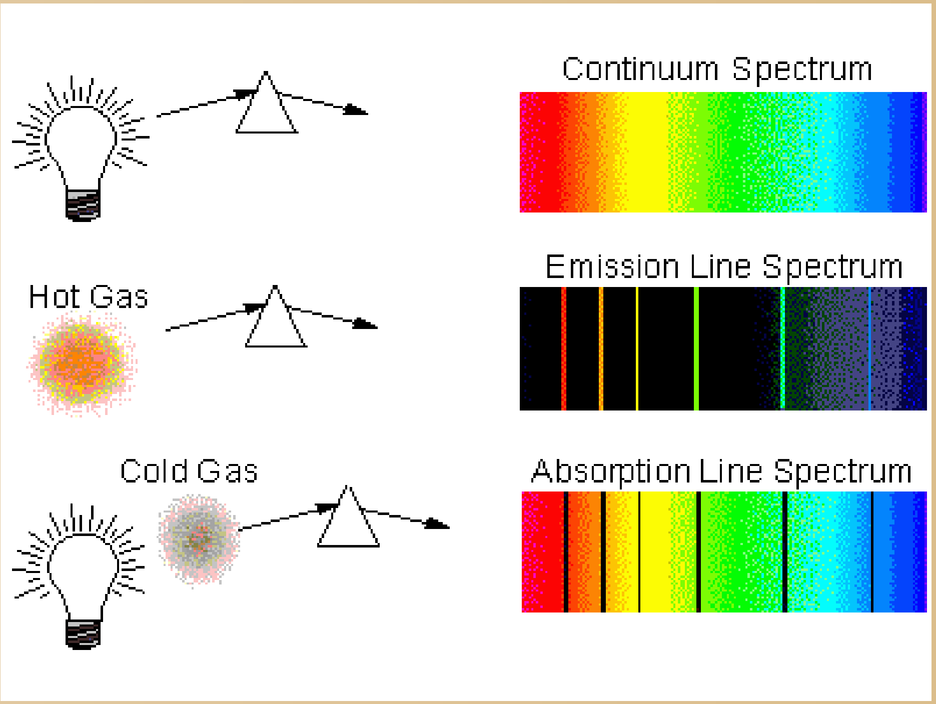
- possuem um elétron mas Z prótons no núcleo (carga = +Ze)
- He^{+} (Z=2), Li^{++} (Z=3), Be^{+++} (Z=4), etc.
- níveis de energia:

$E_i = -m'Z^2e^4/8\varepsilon_0^2h^2n_i^2$

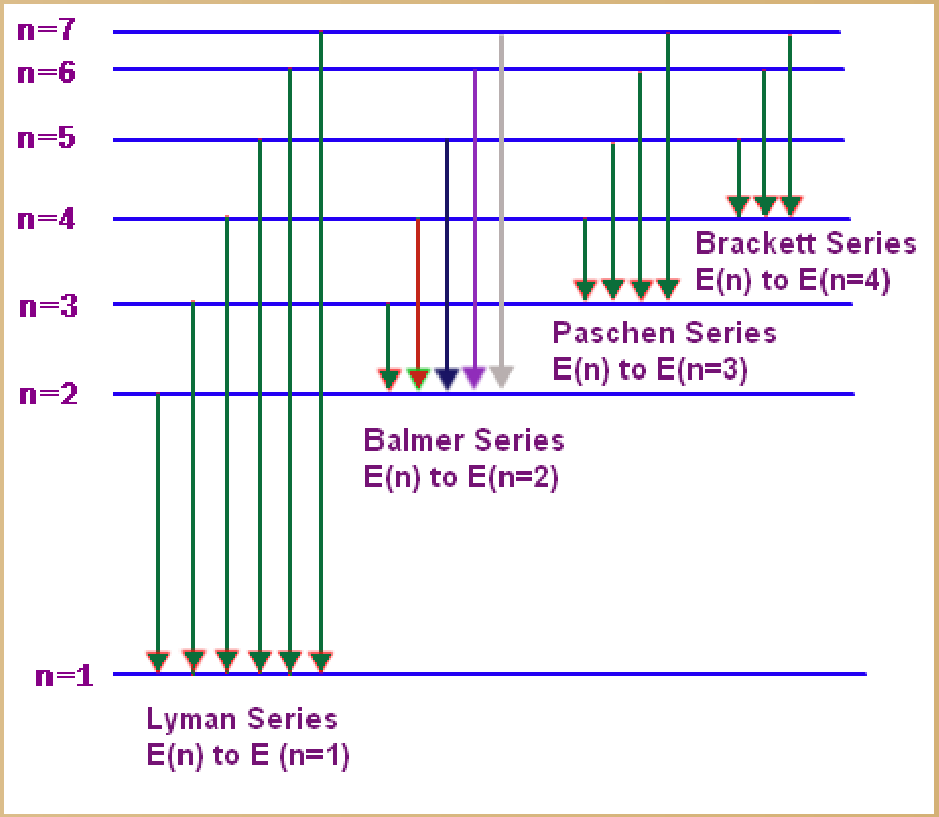
são alterados tanto por Z como por m'



FIM



Continuum Spectrum
Hot Gas
Emission Line Spectrum
Cold Gas
Absorption Line Spectrum



n=7
n=6
n=5
n=4
n=3
n=2
n=1
Brackett Series
E(n) to E(n=4)
Paschen Series
E(n) to E(n=3)
Balmer Series
E(n) to E(n=2)
Lyman Series
E(n) to E (n=1)