

Partícula também é onda

(ER-3)

elétron



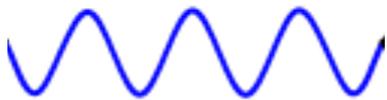
Onda do elétron

Comprimento de
onda de de Broglie :

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Constante de Planck



Função de onda

$$\psi(x, t)$$

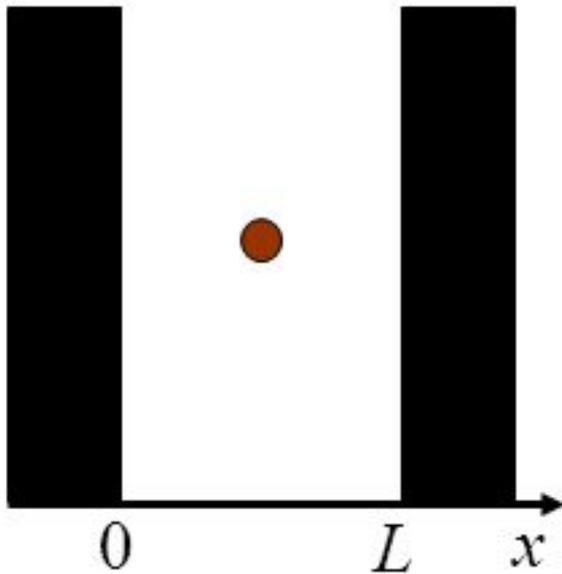
$$\psi^*(x, t) \psi(x, t) = |\psi(x, t)|^2$$



Probabilidade de
encontrar a partícula

Confinamento gera quantização !

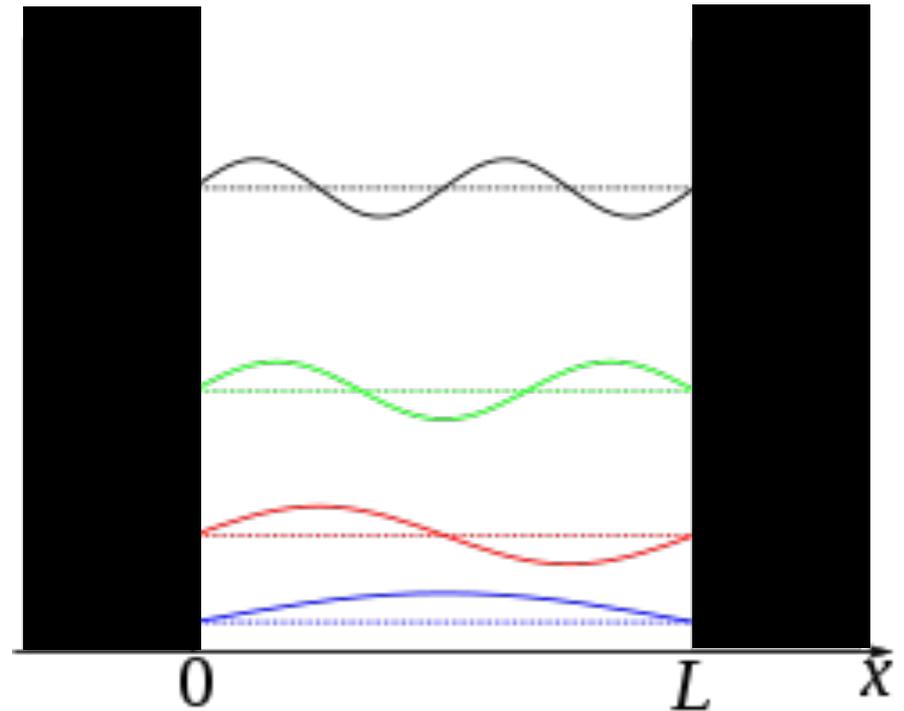
Partícula confinada
numa caixa com
paredes rígidas



$$E = \frac{p^2}{2m}$$

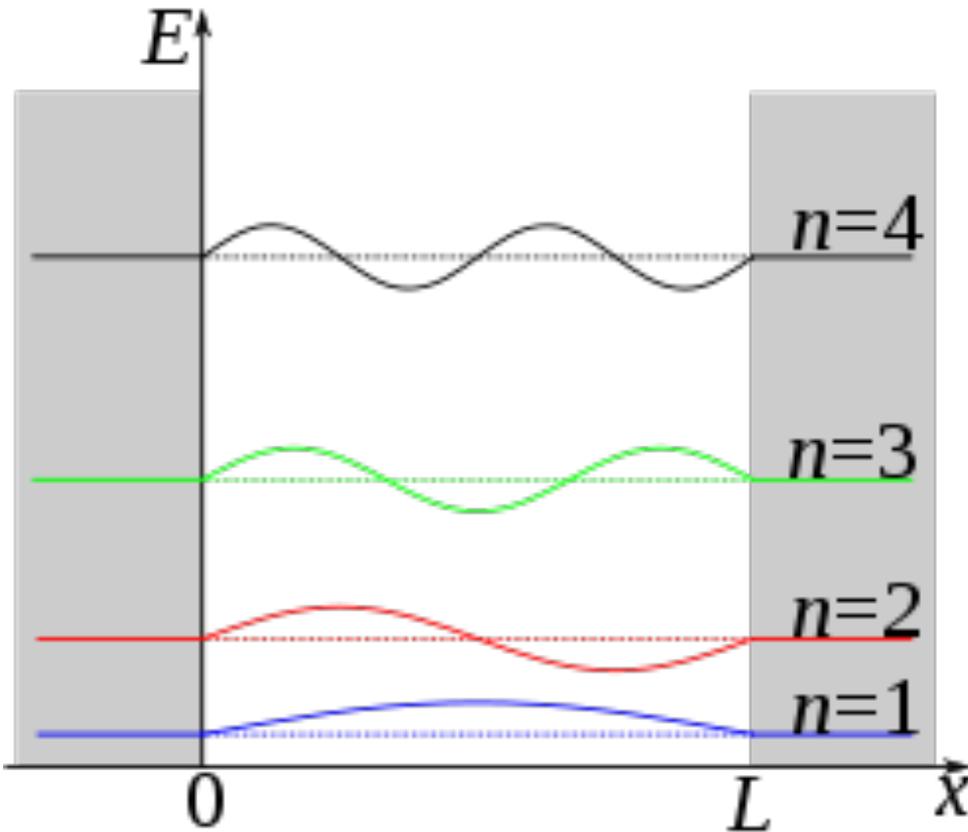
$$\psi(x) = 0$$

$$\psi(x) = 0$$



$$\psi(x) = \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right)$$

Só cabem alguns comprimentos de onda !



$$\lambda = 1/2 L$$

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

$$\lambda = 2/3 L$$

$$\lambda = L$$

$$\lambda = 2 L$$

$$\lambda = \frac{2}{n} L$$

$$E = \frac{p^2}{2m}$$

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h n}{2 L}$$



$$E = \frac{h^2 n^2}{8 m L^2}$$

Valores discretos: energia quantizada !

Aula 2

Spin está nas partículas elementares

Spin é quântico

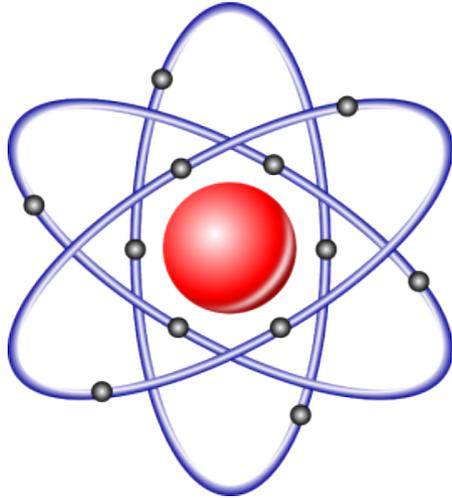
Física quântica: dualidade onda-partícula

"Onpa" descrita por função de onda

Movimento limitado no espaço
(confinado) implica níveis discretos
de energia: **quantização !**

Spin é rotação ?

Átomo de Bohr

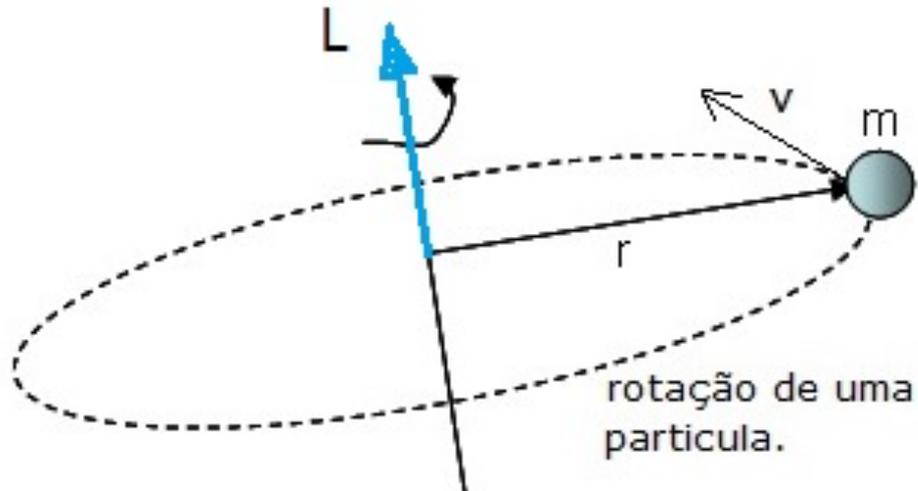


Ainda bem que
chegamos a um
paradoxo. Agora, há
esperança de
conseguirmos algum
progresso.

Niels Bohr



Momento angular de uma partícula



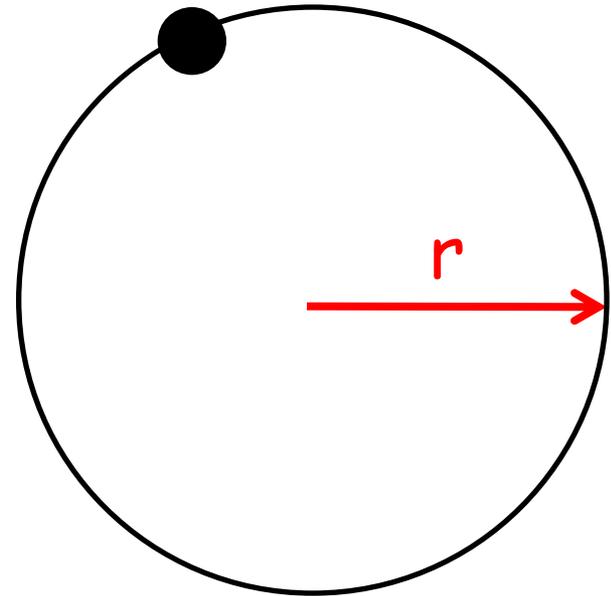
$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = m \vec{r} \times \vec{v}$$



$$\vec{r} \perp \vec{v} \quad \longrightarrow \quad |\vec{r} \times \vec{v}| = r v$$

$$L = r p$$

Confinamento gera quantização: órbita circular



Confinamento gera quantização: órbita circular

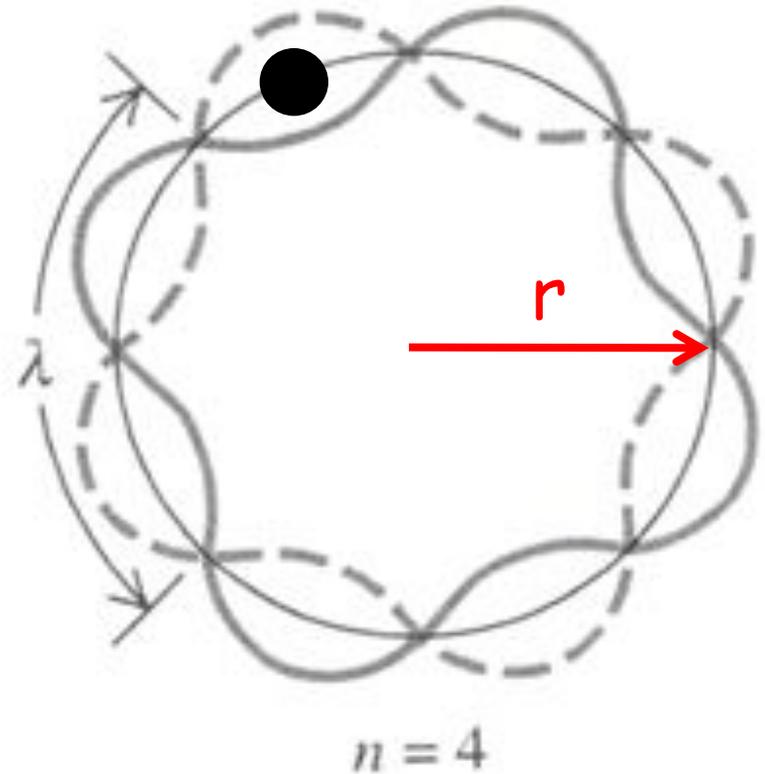
Número inteiro de comprimentos de onda

$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{p}$$

$$rp = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

$$L = n\hbar$$

$$n = 1, 2, 3 \dots$$

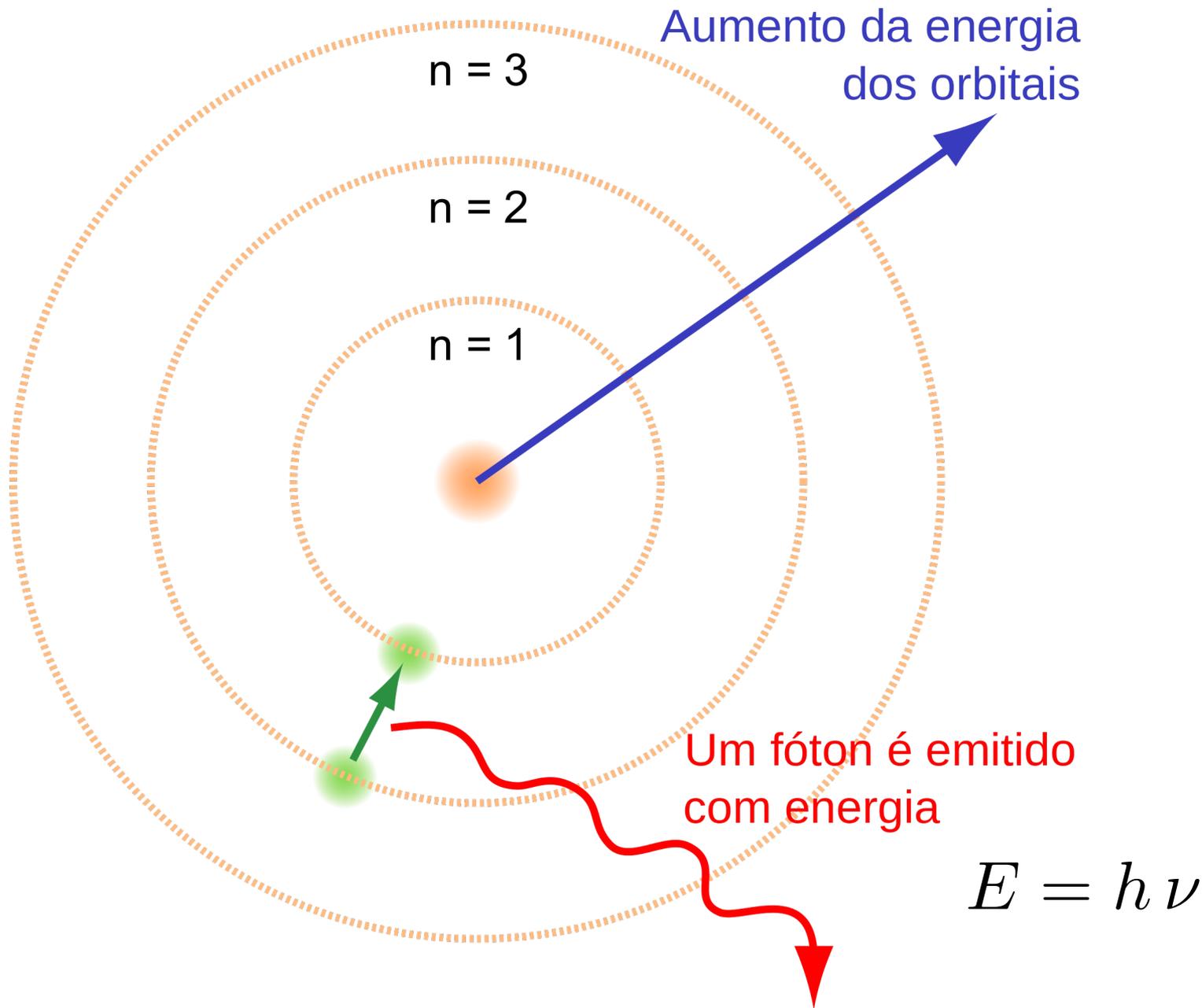


Valores discretos: momento angular quantizado !

Modelo do átomo de Bohr : o hidrogênio

Postulados :

- 1) Elétron executa órbitas circulares
- 2) Só são permitidas as órbitas em que $L = n \hbar$
- 3) Elétron não irradia ! A energia é constante.
- 4) A emissão de energia (fóton) ocorre quando o elétron "salta" de órbita mais energética para uma menos energética



Aumento da energia
dos orbitais

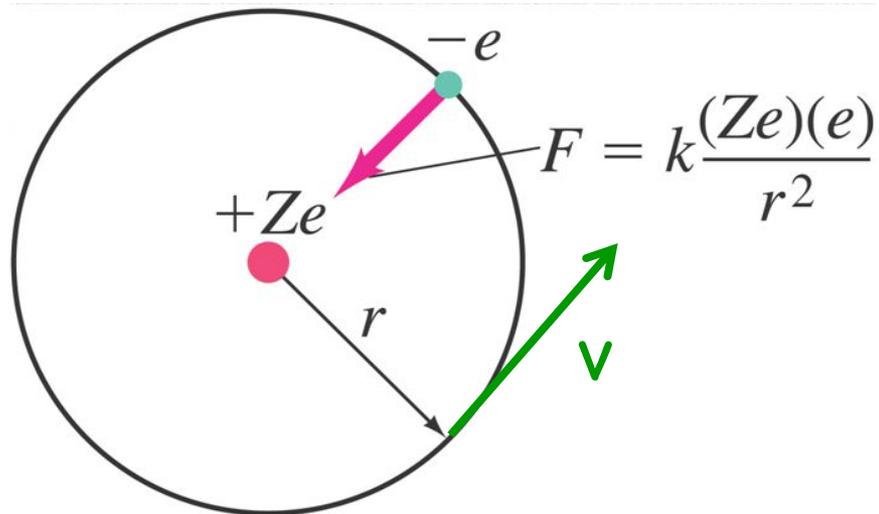
$n = 3$

$n = 2$

$n = 1$

Um fóton é emitido
com energia

$$E = h \nu$$



$$F = m a$$

$$F = \frac{Z e^2}{4 \pi \epsilon_0 r^2} \quad a = \frac{v^2}{r}$$

$$\frac{m v^2}{r} = \frac{Z e^2}{4 \pi \epsilon_0 r^2}$$



$$m v^2 = \frac{Z e^2}{4 \pi \epsilon_0 r}$$

$$L = m v r = n \hbar$$



$$m v^2 = \frac{n^2 \hbar^2}{m r^2}$$

$$r = 4 \pi \epsilon_0 \frac{n^2 \hbar^2}{Z m e^2}$$

$$v = \frac{Z e^2}{4 \pi \epsilon_0} \frac{1}{n \hbar}$$

Energia Potencial

$$U = qV \quad \left\{ \begin{array}{l} V = \frac{Ze}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \\ q = -e \end{array} \right. \longrightarrow U = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

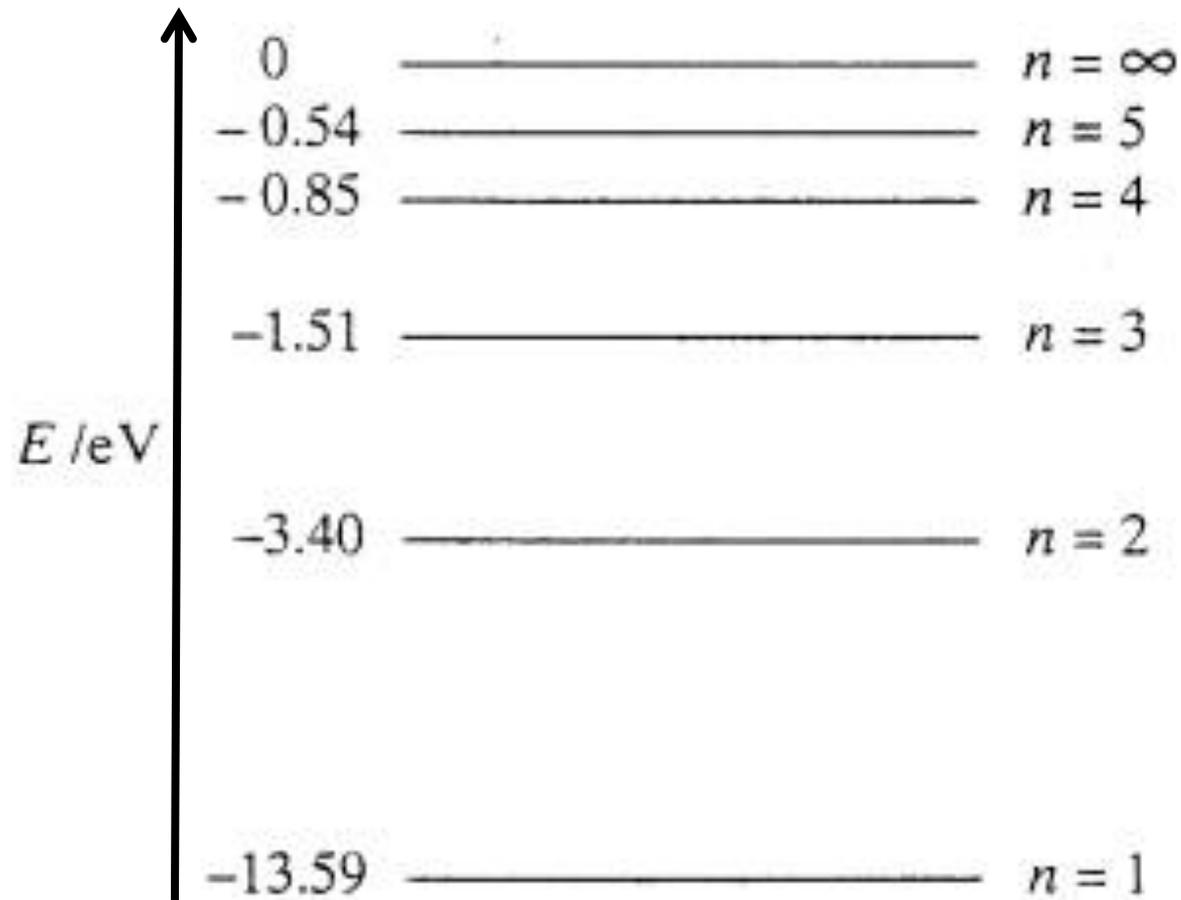
Energia Cinética

$$K = \frac{1}{2} m v^2 \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{mv^2}{r} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \\ \longrightarrow K = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \end{array} \right.$$

Energia Total

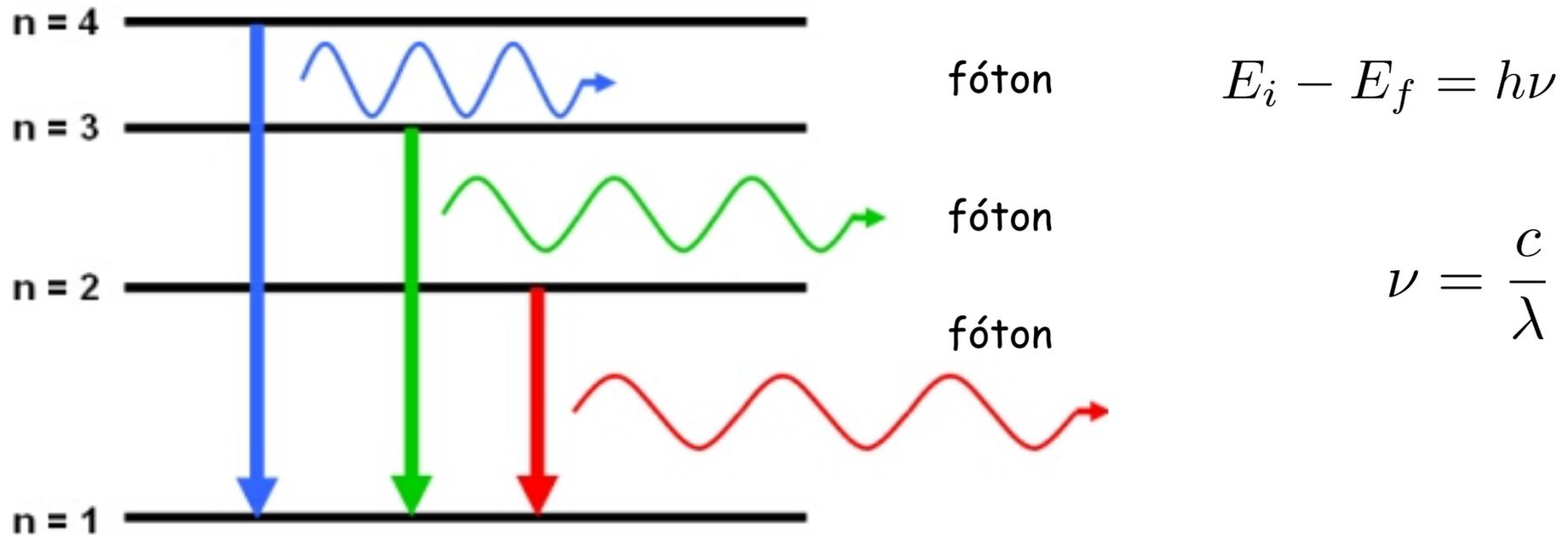
$$E = K + U = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \quad \boxed{E = -\frac{m}{2} \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} \right)^2 \frac{1}{n^2}}$$

Níveis de energia do átomo de hidrogênio



$$1 \text{ e V} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

Transição de níveis de energia e emissão de fótons



$$\frac{1}{\lambda} = \frac{m}{4\pi\hbar c} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar} \right)^2 Z^2 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = R Z^2 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Espectroscopia



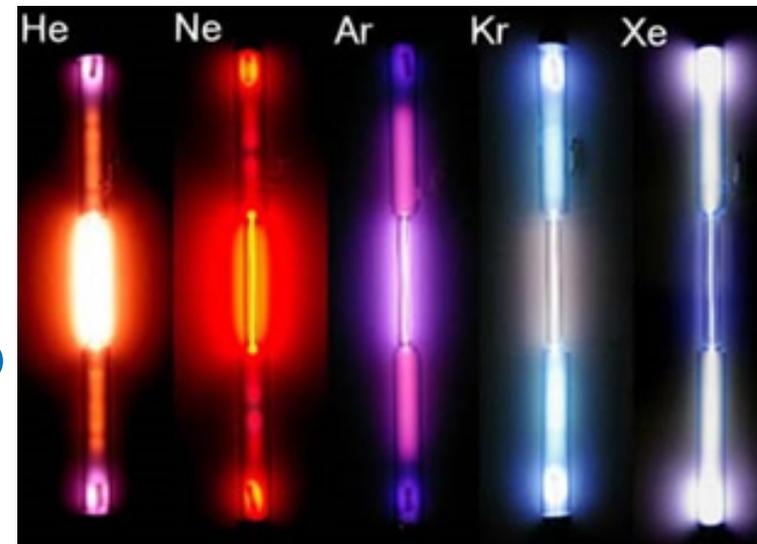
Átomos excitados emitem luz. Luz de várias cores

Cada cor corresponde a uma frequência

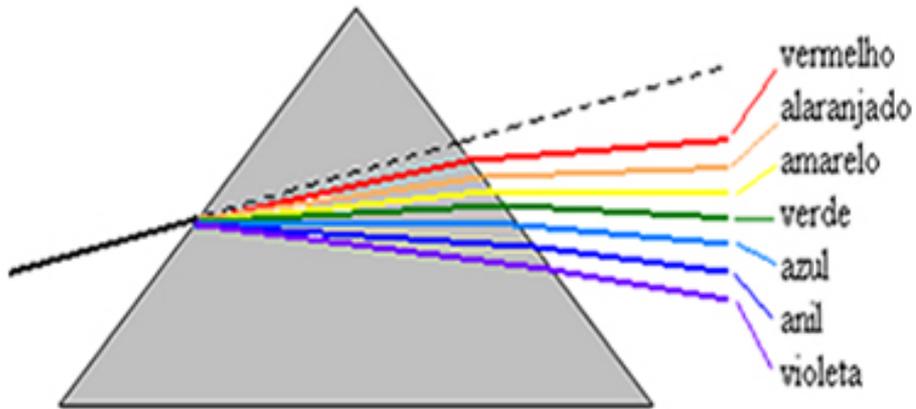
Espectro = conjunto de frequências de luz emitidas por um átomo

Cada átomo tem seu espectro, sua "assinatura", seu "código de barras"...

Medindo a luz (radiação) de um objeto podemos determinar a sua composição



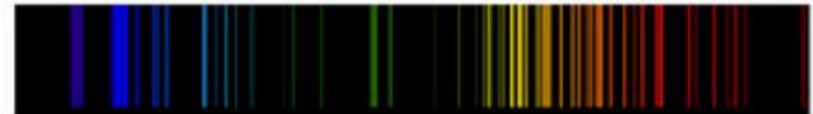
Linhas espectrais



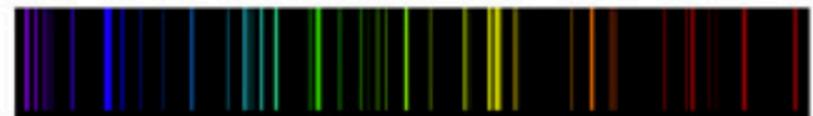
Hidrogênio



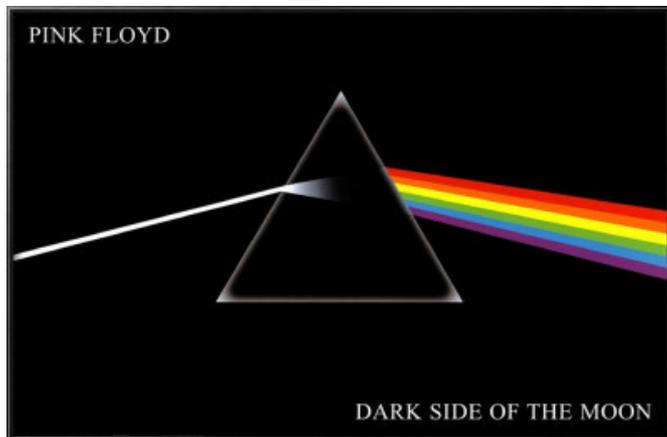
Hélio



Neônio



Mercúrio



Luz revela a identidade !

Princípio da incerteza

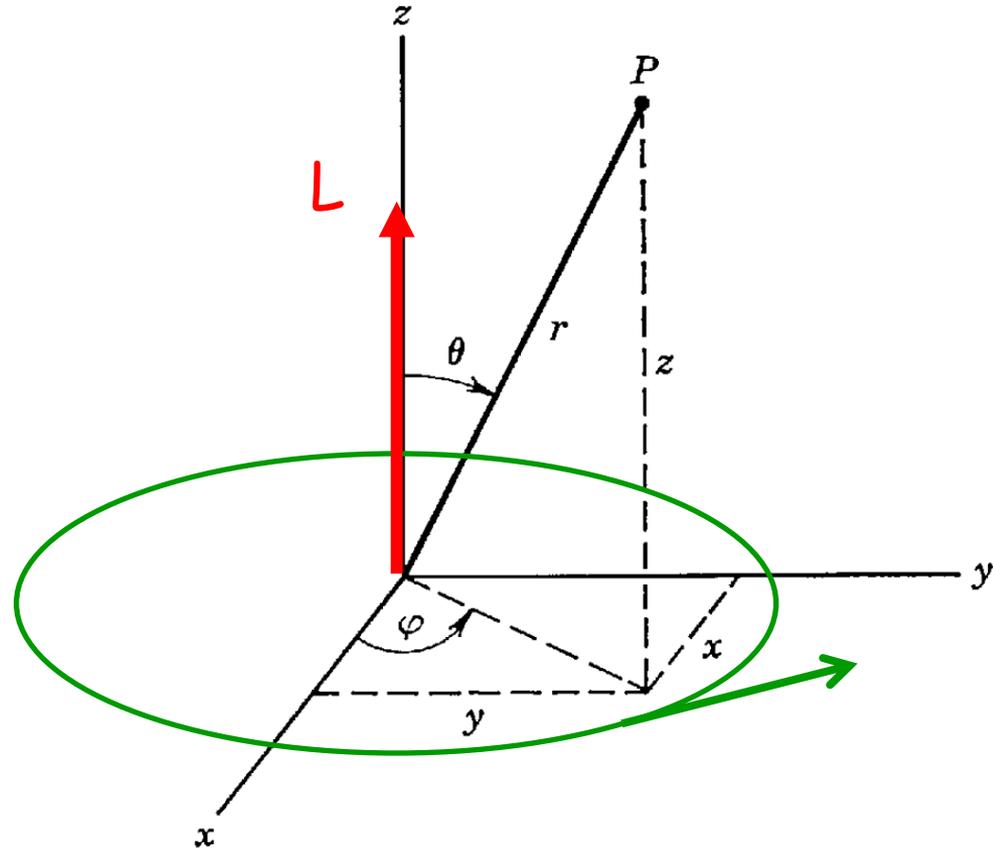
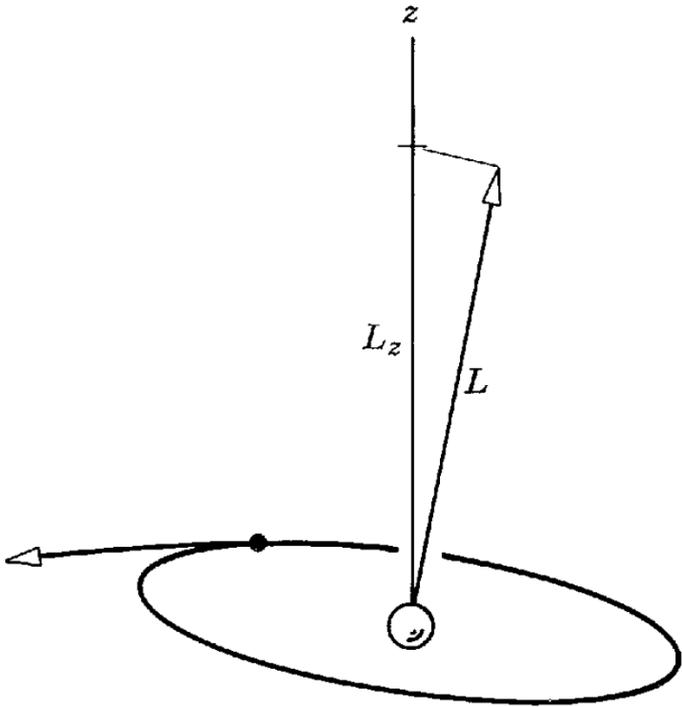
$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{p} = p_x \hat{i} + p_y \hat{j} + p_z \hat{k} \\ \vec{r} = x \hat{i} + y \hat{j} + z \hat{k} \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta x \quad \text{incerteza na coordenada } x \\ \Delta p_x \quad \text{incerteza na componente } x \text{ do momento} \end{array} \right.$$

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Delta y \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Delta z \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2}$$

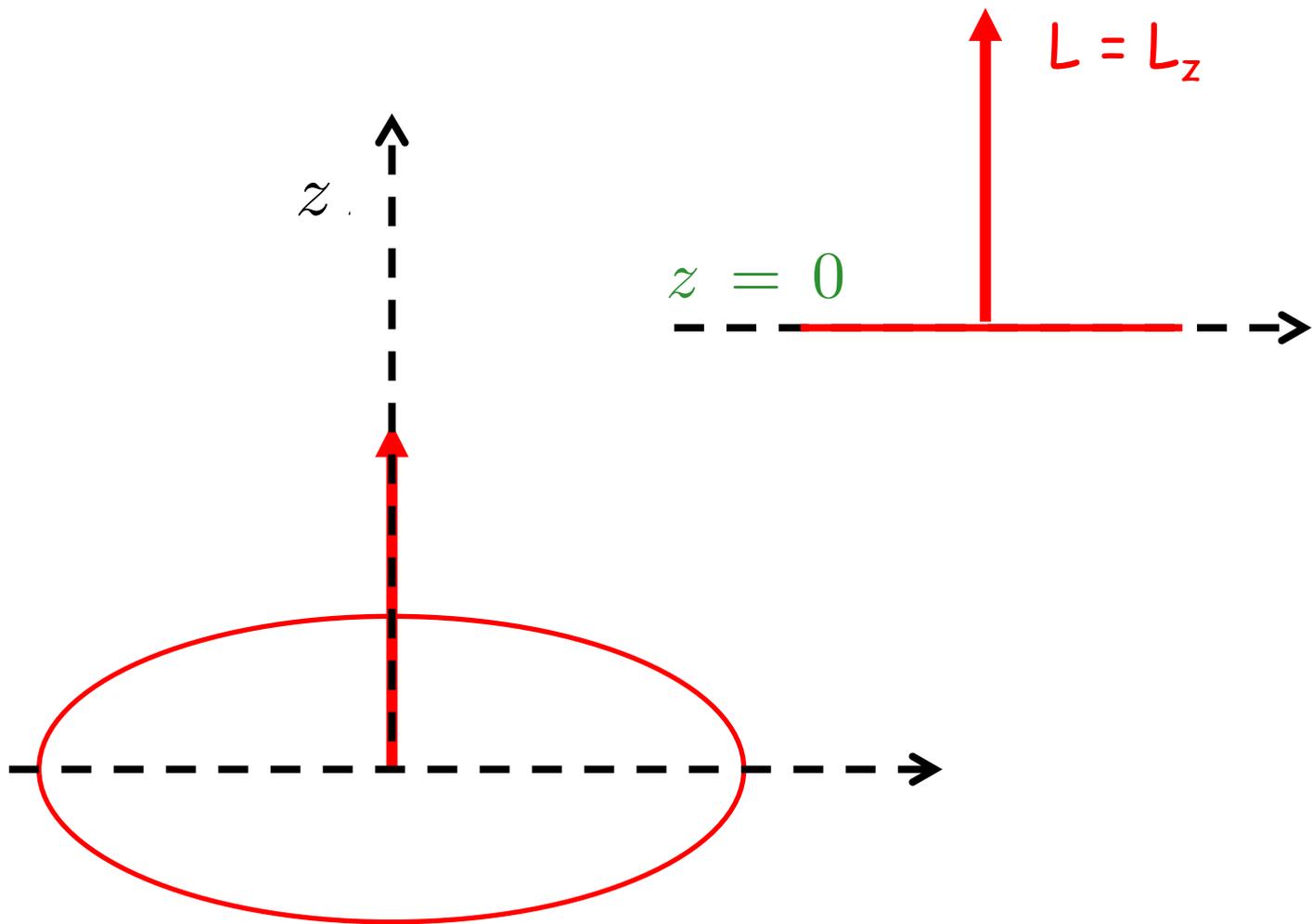
Momento angular de uma partícula

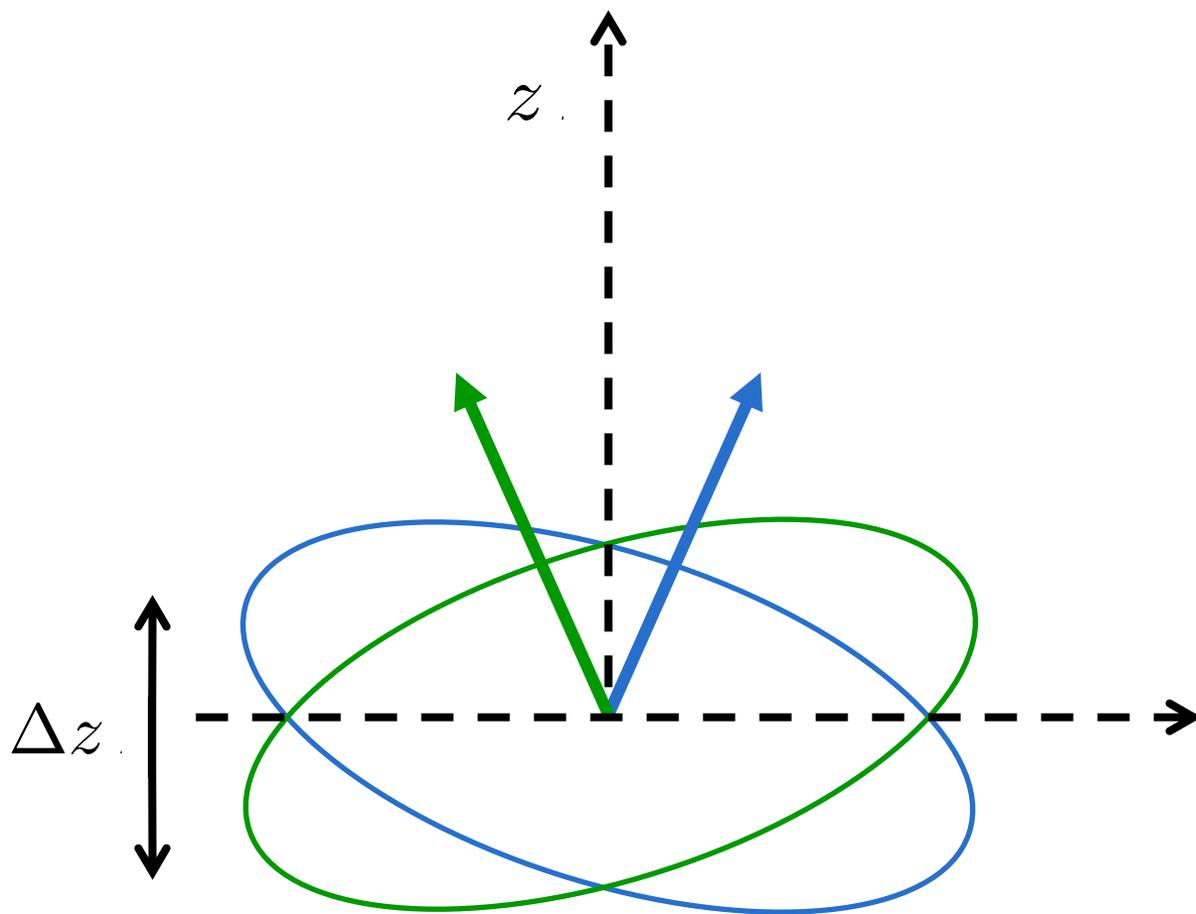


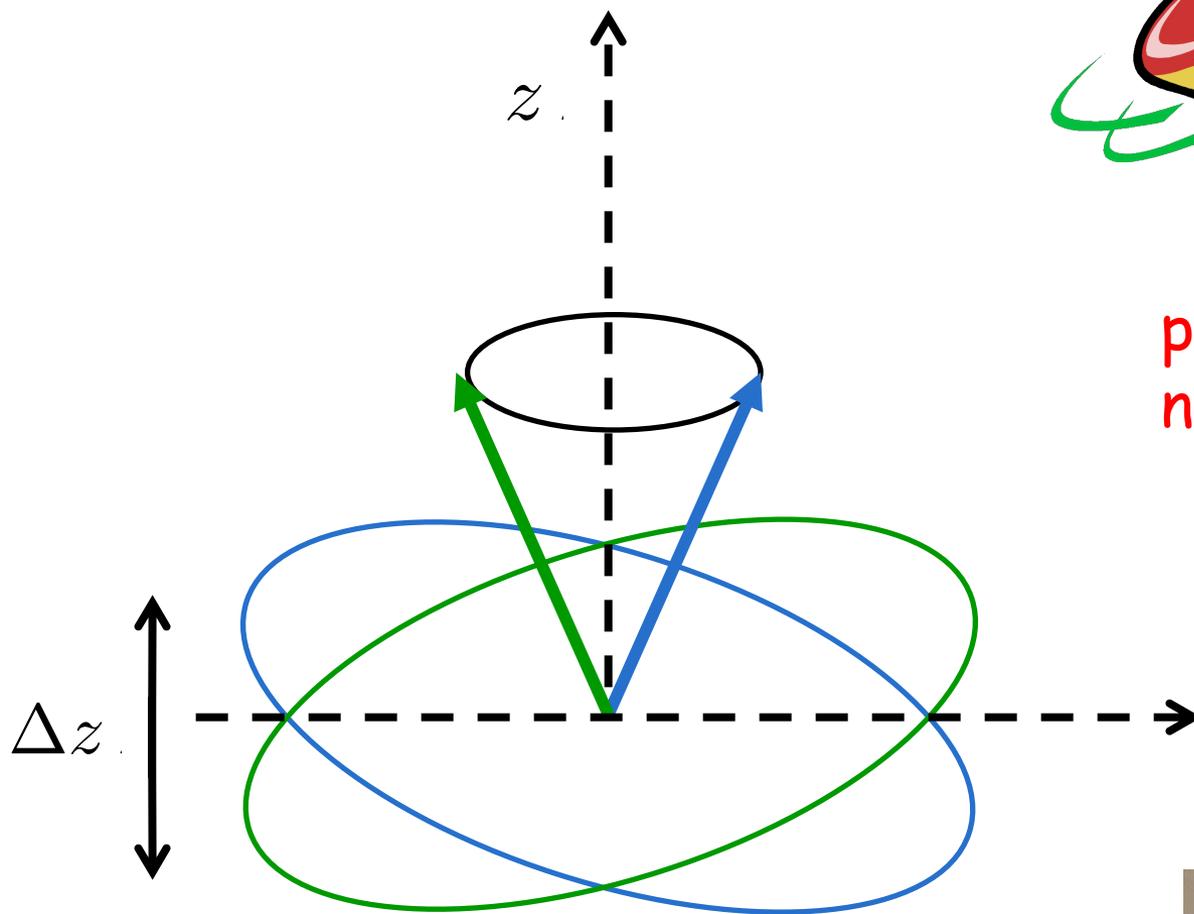
$$z = 0 \quad p_z = 0 \quad \longrightarrow \quad \Delta z \cdot \Delta p_z = 0$$



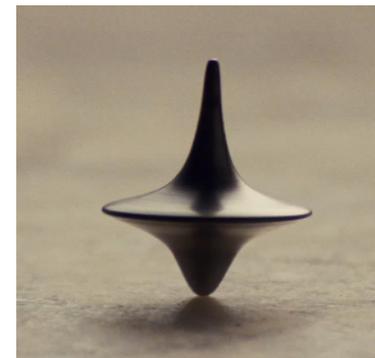
Princípio da incerteza: impossível "alinhar" L e L_z !







parece mas
não é pião !



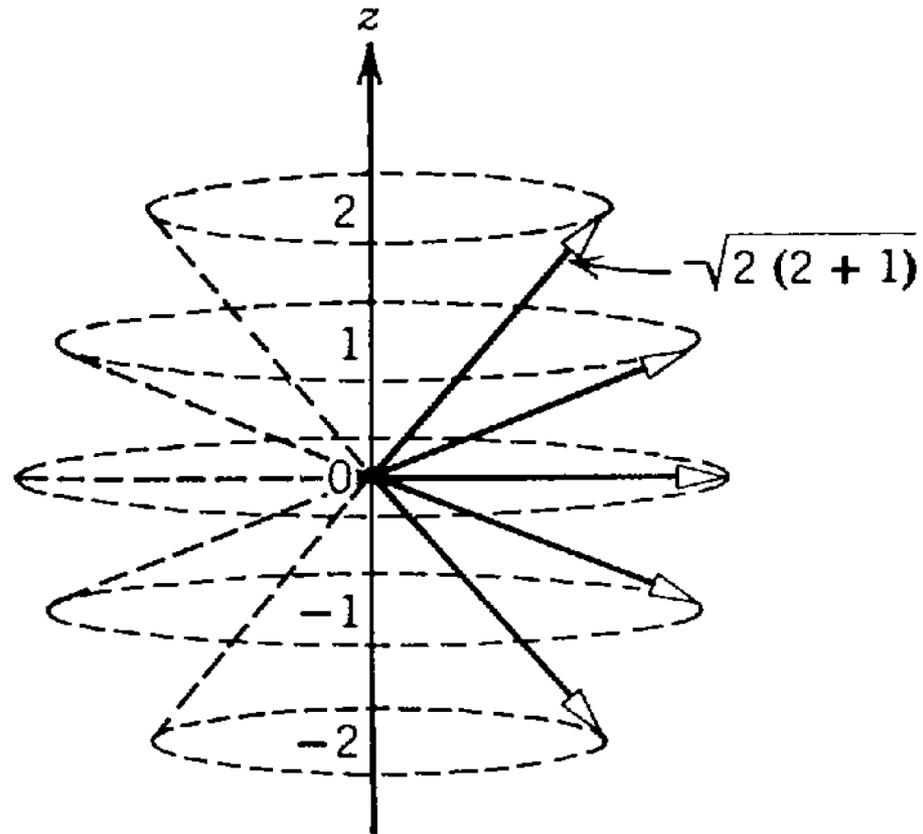
"Nova mecânica quântica"

$$\left\{ \begin{array}{l} L_z = m_l \hbar \\ L^2 = l(l + 1) \hbar^2 \end{array} \right.$$

$l = 0, 1, 2, \dots$ inteiro

$-l \leq m_l \leq l$ inteiro

$$L = \sqrt{l(l + 1)} \hbar$$

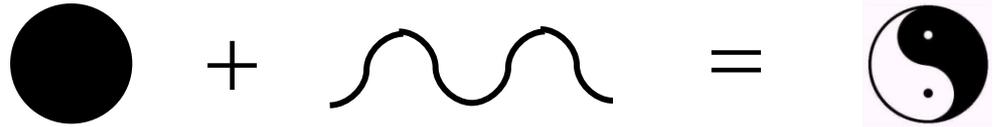




Elétron = Partícula e Onda

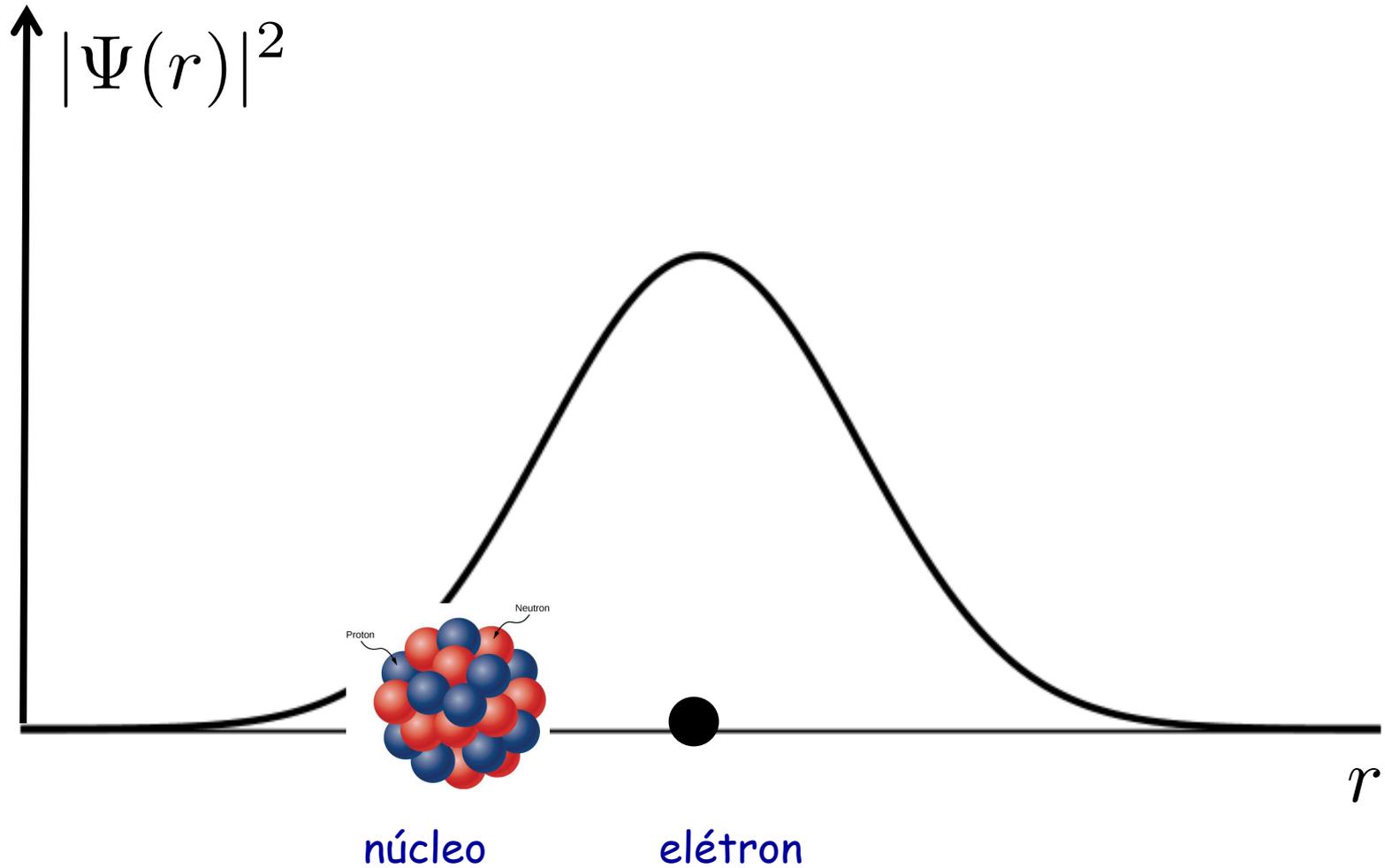
Puntiforme e Extenso

Como imaginar isso ?

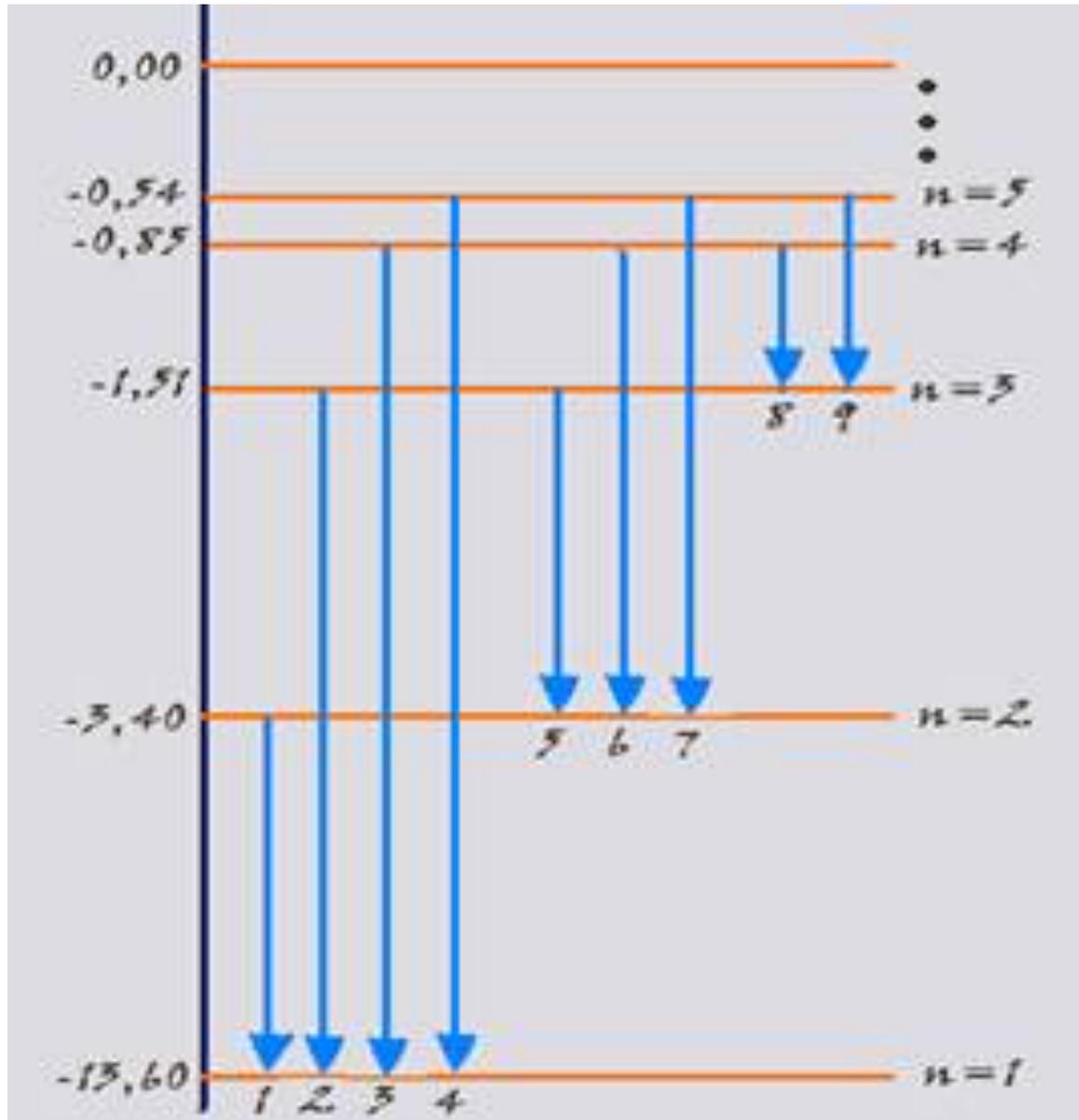


dualidade

Captura do elétron pelo núcleo



Séries do átomo de hidrogênio



Paschen

Balmer

Lyman