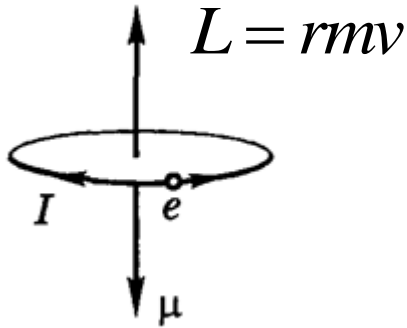


# Орбитальный магнитный момент

Орбитальный момент



Магнитный момент

$$\mu = I\pi r^2 = \frac{e}{2\pi r / v} \pi r^2$$

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m} \vec{L} \quad \frac{\mu}{L} = \frac{e}{2m}$$

$$\mu_l = -\mu_B \sqrt{l(l+1)}$$

$$\mu_{lz} = -\mu_B m_l$$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} - \text{магнетон Бора}$$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9,27 \cdot 10^{-24} \frac{\text{Дж}}{\text{Тл}}$$

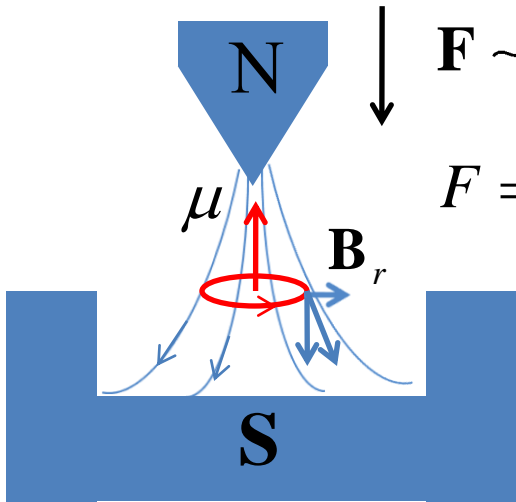
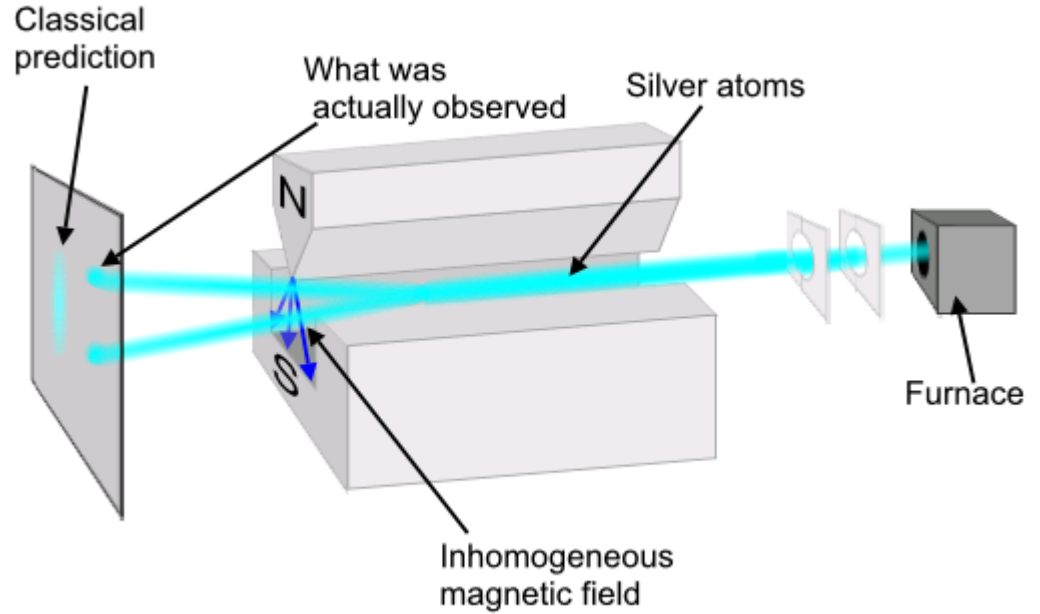
$$\Delta E = -(\vec{\mu} \cdot \vec{B})$$

# Опыт Штерна-Герлаха



Отто Штерн    Вальтер Герлах

(1922)



$$\mathbf{F} \sim q[\mathbf{v}\mathbf{B}_r]$$

$$F = \mu_z \frac{\partial B}{\partial z}$$

$$2s + 1 = 2 \Rightarrow s = \frac{1}{2}$$

$$\mu = \pm \mu_B$$

Удвоенный магнетизм!

Гиромангнитное отношение

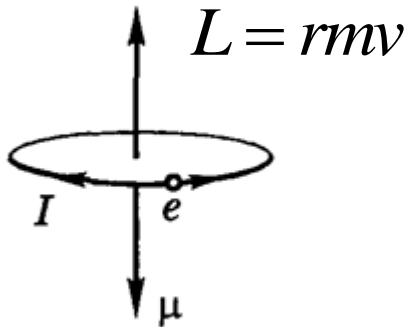
$$\frac{\mu_{sz}}{S_z} = \frac{e}{m}$$

Вместо

$$\frac{\mu_{Lz}}{L_z} = \frac{e}{2m}$$

# Спин электрона

## Орбитальный момент



$$\mu = I \pi r^2 = \frac{e}{2\pi r / v} \pi r^2$$

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m} \vec{L} \quad \frac{\mu}{L} = \frac{e}{2m}$$

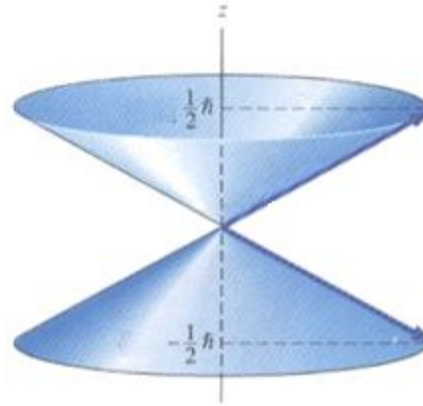
$$\mu_l = -\mu_B \sqrt{l(l+1)}$$

$$\mu_{lz} = -\mu_B m_l$$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} - \text{магнетон Бора}$$

## Собственный момент – спин

(Гаудсмит и Уленбек (1925))



Спиновое квантовое число  $s$

$S$  Электрон:  $s = \frac{1}{2}$

$$S = \hbar \sqrt{s(s+1)} = \hbar \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\frac{\mu_s}{S} = \frac{e}{m}$$

$$S_z = \hbar m_s = \pm \frac{1}{2} \hbar$$

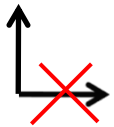
$$\mu_s = -2\mu_B \sqrt{s(s+1)}$$

$$\mu_{sz} = -2\mu_B m_s \quad m_s = s, s-1, \dots, -s$$

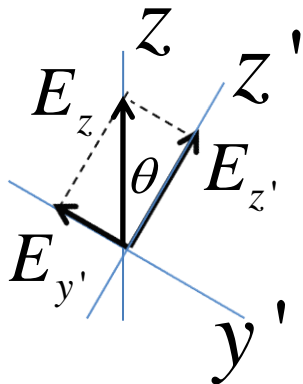
Электрон:  $\mu_{sz} = \pm \mu_B$

# Оптическая аналогия опыта Штерна-Герлаха

Поляризатор пропускает фотоны с проекцией  $E \uparrow$  и задерживает с  $\rightarrow$ .



$P_z$  - вероятность найти фотон в состоянии  $E_z$



$$P_z \sim E_z^2$$

$$P_{z'} \sim E_{z'}^2$$

$$E_{z'} = E_z \cos(\theta)$$

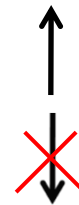
Вероятность пройти прибор Z и Z'

$$P_{zz'} = \frac{P_{z'}}{P_z} = \cos^2(\theta)$$

$\Rightarrow$

$$P_{zz'} = \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Магнит ШГ пропускает атомы с проекцией  $\mu \uparrow$  и задерживает с  $\downarrow$



Магнит ШГ ведет себя как поляризатор, если в формулы оптики подставить  $\theta/2$

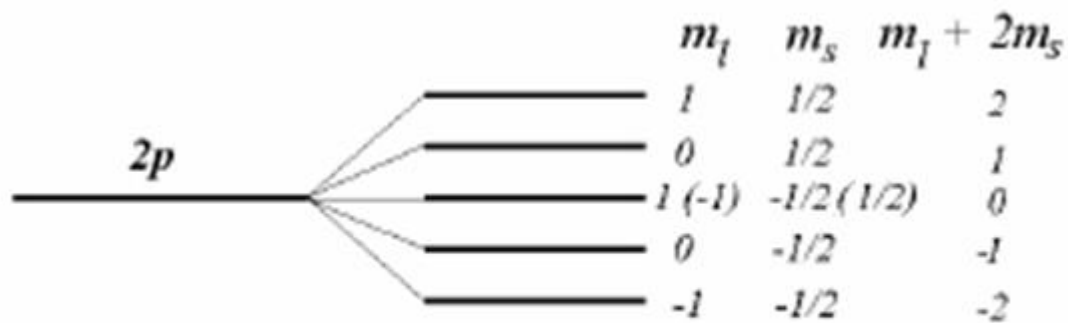
# Атом в магнитном поле

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_{LS} + \hat{H}_M$$

Спин-орбитальное взаимодействие  $\hat{H}_{LS} = A(\hat{L}\hat{S}) \sim \alpha^2 R_y$

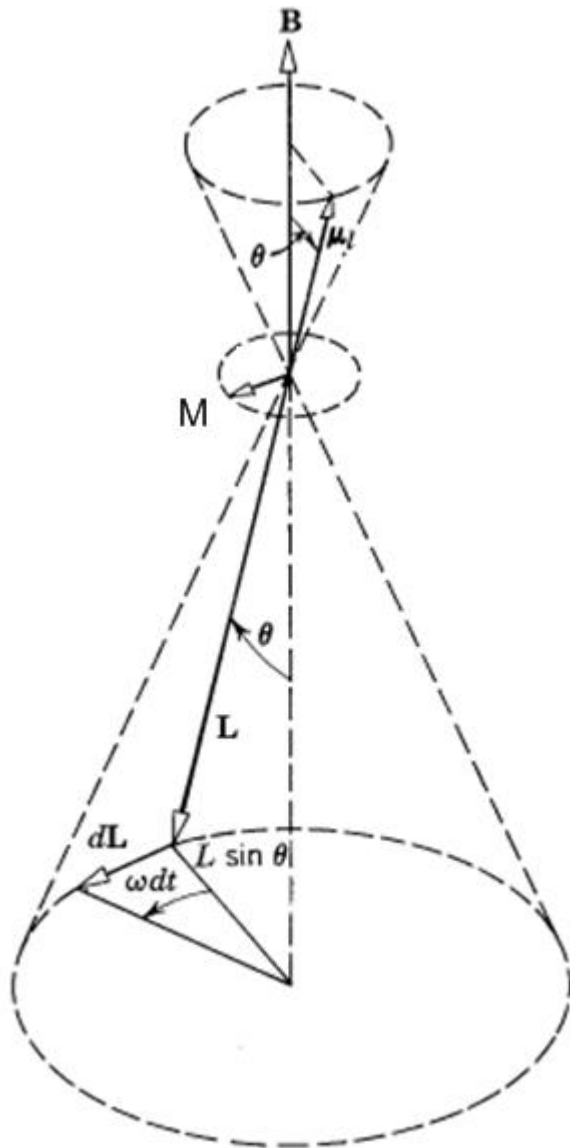
Энергия взаимодействия с внешним полем  $\hat{H}_M \sim \mu_B B$

Сильное поле  $B \gg \frac{\alpha^2 R_y}{\mu_B}$   $\hat{H}_M = \mu_B B(\hat{L}_z + 2\hat{S}_z)$



Расщепление 2p уровня атома водорода в сильном магнитном поле.

# Атом в магнитном поле

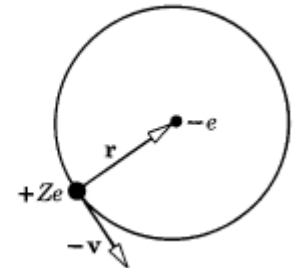
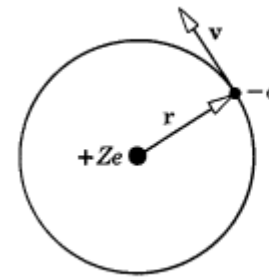


$$\Delta E = -\mu_l \cdot \mathbf{B} \quad \mu_l = -\frac{g_l \mu_b}{\hbar} \mathbf{L}$$

$$\mathbf{M} = \mu_l \times \mathbf{B}$$

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{g_l \mu_b}{\hbar} \mathbf{B}$$

$$\mathbf{j} = -Zev$$



$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{r}}{r^3} = -\frac{Ze\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

$$\Delta E = \frac{g_s \mu_b}{\hbar} \mathbf{S} \cdot \mathbf{B} \quad \mathbf{B} = \frac{1}{emc^2} \frac{1}{r} \frac{dV(r)}{dr} \mathbf{L}$$

$$\Delta E = \frac{1}{2m^2 c^2} \frac{1}{r} \frac{dV(r)}{dr} \mathbf{S} \cdot \mathbf{L}$$

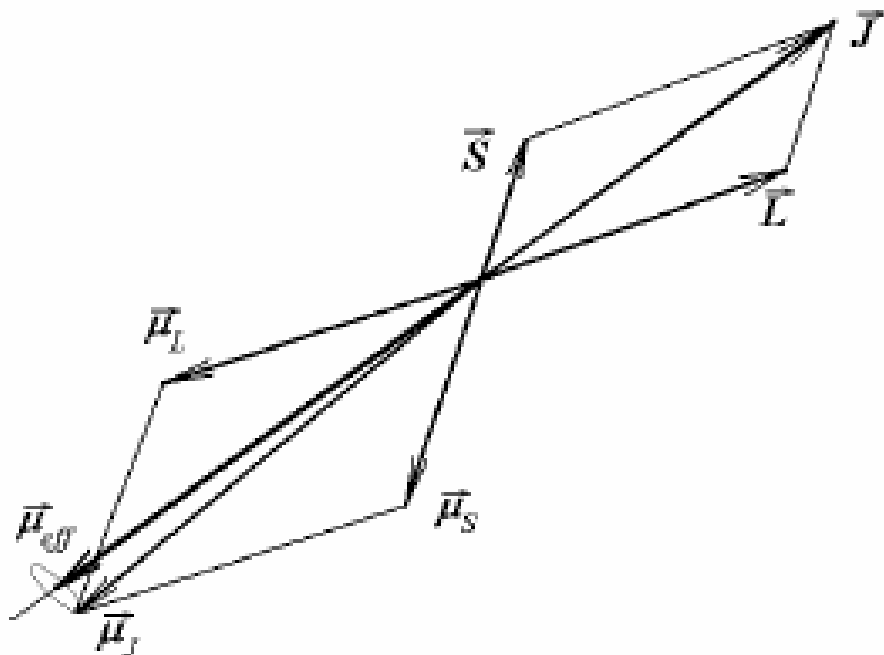
# Атом в магнитном поле

Слабое поле

$$B \ll \frac{\alpha^2 R_y}{\mu_B}$$

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

$$\vec{\mu} = \vec{\mu}_L + \vec{\mu}_S = -\frac{\mu_B}{\hbar} (\vec{L} + 2\vec{S})$$



Ориентация векторов механического и магнитного моментов электронной оболочки атома.

$$g = -\frac{1}{\mu_B} \frac{(\vec{\mu}\vec{J})}{J^2} = 1 + \frac{J^2 + S^2 - L^2}{2J^2}$$

$$\Delta E = g \mu_B B m_J$$

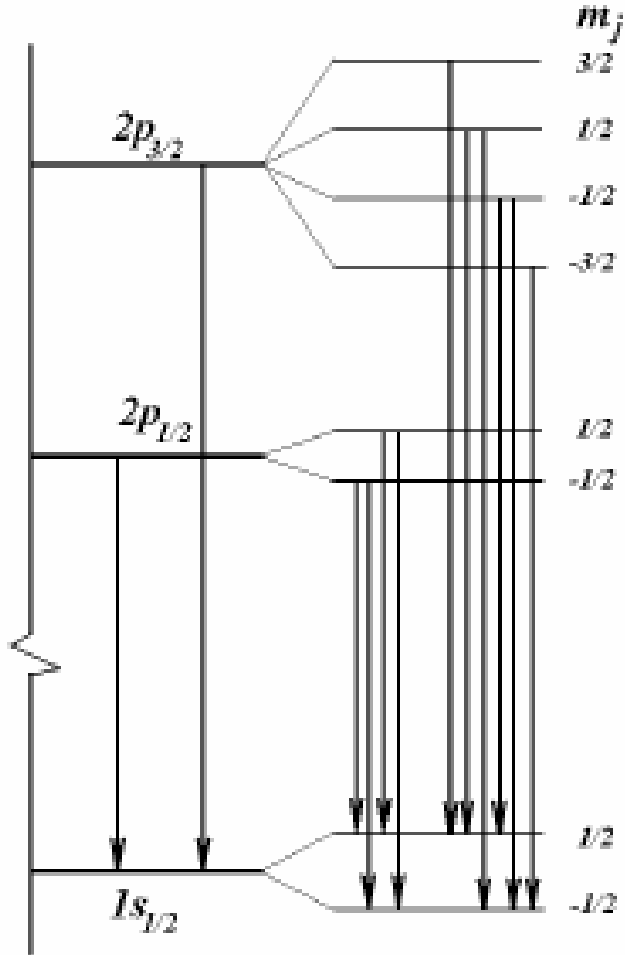
Множитель Ланде (g-фактор)

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$





# Эффект Зеемана (сложный)

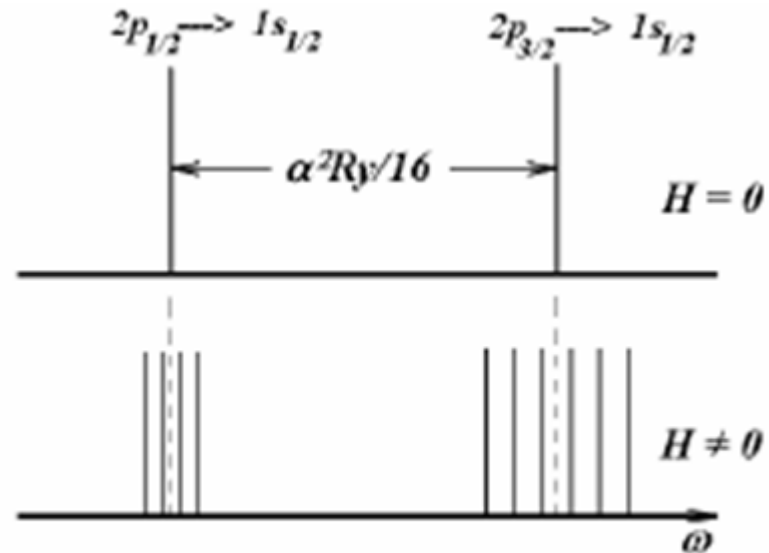


Эффект Зеемана на  $L_{\alpha}$  линии атома водорода.

$$E = E_{01} + g_1 \mu_B B M_{J1}$$

$$E = E_{02} + g_2 \mu_B B M_{J2}$$

$$\omega = \omega_0 + \frac{\mu_B B}{\hbar} (g_1 M_{J1} - g_2 M_{J2})$$



Спектральный состав головной линии серии Лаймана в слабом магнитном поле.

# Эффект Пашена - Бака

Сильное поле

$$\hat{H}_M = \mu_B B (\hat{L}_z + 2\hat{S}_z)$$

