Домашняя работа по квантовой физике

Драчов Ярослав
Факультет общей и прикладной физики МФТИ

8 ноября 2020 г.

Задача 0-6-1

Решение.

$$E_l = \frac{\hbar^2}{2I} l(l+1).$$

$$E_1 - E_0 = \frac{\hbar^2}{I}.$$

$$kT = \frac{\hbar^2}{I} = \frac{\hbar^2}{\mu a^2} = \frac{2\hbar^2}{m_O a^2}.$$

$$T = \frac{2\hbar^2}{m_O k a^2} = \frac{2\left(1{,}0546 \cdot 10^{-27}\right)^2}{16 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-24} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-16} \cdot \left(1{,}2 \cdot 10^{-8}\right)^2} = 4{,}2\ \text{К}.$$

Задача 0-6-2

Решение.

$$E_1 = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{1} = -\,\mathrm{Ry} = -13{,}6\ \text{эВ}.$$

$$E_2 = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{4} = -\,\mathrm{Ry} = -3{,}4\ \text{эВ} \to \Delta E_{12} = 10{,}2\ \text{эВ}.$$

$$E_3 = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{9} = -\,\mathrm{Ry} = -1{,}51\ \text{эВ} \to \Delta E_{13} = 12{,}09\ \text{эВ}.$$

$$E_4 = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{16} = -\,\mathrm{Ry} = -0{,}85\ \text{эВ} \to \Delta E_{14} = 12{,}75\ \text{эВ}.$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 - \Delta E_{13} = 12{,}5 - 12{,}09 = 0{,}41\ \text{эВ}.$$

Задача 4.29

Решение.

$$\mu = \frac{m_p}{2}.$$

$$E_n = -\frac{\mu e^4}{2\hbar^2 n^2} = -\,\mathrm{Ry}\,\frac{m_p}{m_e}\frac{1}{2n^2} \approx -12{,}5\frac{1}{n^2}\ \text{кэВ}.$$

Следовательно, вклад кулоноского взаимодействия в энергию перехода $2p \to 1s$ в атоме протониума составляет

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{кул}} = 12{,}5\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right) \approx 9{,}4\ \text{кэВ}.$$

Расхоождение с экспериментальным значением обусловлено вкладом сильного взаимодействия. Таким образом,

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{сил}} = \Delta\mathcal{E}_{\text{эксп}} - \Delta\mathcal{E}_{\text{кул}} = 10{,}1 - 9{,}4 \approx 0{,}7 \text{ кэВ}.$$

В силу короткодействия ядерных сил их влияние на положение $2p$-состояния незначительно по сравнению с $1s$ состоянием, поскольку в кулоновском потенциале вероятность частице в $2p$-состоянии попасть в окрестность начала координат близка к нулю.

Задача 4.38

Решение. Согласно закону Мозли энергия кванта, излученного при переходе электрона с уровня n_2 на уровень n_1 (заряд ядра Z, а σ — поправка на экранирование заряда ядра электронами K- оболочки)

$$\mathcal{E} = \hbar\omega = \mathrm{Ry}(Z-\sigma)^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right).$$

Для линии K_α $n_1 = 1$, $n_2 = 2$. Поскольку энергия такого кванта в спектре излучения серебра известна и равна $\mathcal{E} = 21{,}6$ кэВ, то из приведённой формулы найдём поправку σ на экранирование заряда ядра электронами на K-оболочке (в обоих случаях $Z < 50$)

$$\sigma = Z_{\mathrm{Ag}} - \sqrt{\frac{4\mathcal{E}}{3\,\mathrm{Ry}}} \approx 1.$$

Энергия, необходимая для освобождения электрона из K-оболочки атома $_{30}\mathrm{Zn}$ (переход с $n = 1$ в $n = \infty$), равна

$$(\hbar\omega)_{\mathrm{Zn}} = \mathrm{Ry}(Z_{Zn} - 1)^2 = 13{,}6 \cdot 29^2 = 11{,}4 \text{ кэВ},$$

а значит, кинетическая энергия T_e вылетевшего оттуда электрона равна

$$T_e = \mathcal{E} - (\hbar\omega)_{\mathrm{Zn}} = 21{,}6 - 11{,}4 = 10{,}2 \text{ кэВ}.$$

Задача 4.42

Решение. Считаем, чт решение задачи об уровнях энергии в кулоновском поле точечного заряда известно: $\hat{H}\varphi = \mathcal{E}\psi$, где $\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} - \frac{Ze^2}{r}$, $\mathcal{E} = -\frac{Z^2me^4}{2\hbar^2}\frac{1}{n^2}$. Рассмотрим $n = 1$, тогда $\psi_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi r_1^3}}e^{-r/r_1}$. Истинный потенциал при $r \geqslant R_я$ совпадает с потенциалом точечного ядра и отличается от него при $r < R_я$. Если считать ядро равномерно заряженной по перхности сферой, то $U(r < R_я = -\frac{Ze^2}{R_я}$; если равномерно заряженным шаром, то $U(r < R_я) = -\frac{3}{2}\frac{Ze^2}{R_я}\left(1 - \frac{r^2}{3R_я^2}\right)$.

Представим истинный гамильтониан в виде

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} - \frac{Ze^2}{r} + \delta U,$$

где для шара

$$\delta U = \begin{cases} 0, & r \geqslant R_я, \\ \frac{Ze^2}{r} - \frac{3}{2}\frac{Ze^2}{R_я}\left(1 - \frac{r^2}{3R_я^2}\right), & r < R_я \end{cases}$$

и для сферы

$$\delta U = \begin{cases} 0, & r \geqslant R_я, \\ \frac{Ze^2}{r} - \frac{Ze^2}{R_я}, & r < R_я. \end{cases}$$

Так как всё отличие происходит при $r < R_я \ll r_1$, то рассматриваем δU как поправку. Среднее значение δU в основном состоянии и есть сдвиг уровня:

$$\left\langle \psi_1 \left| \hat{H} \right| \psi_1 \right\rangle = \left\langle \psi_1 \left| \frac{\hat{p}^2}{2m} - \frac{Ze^2}{r} \right| \psi_1 \right\rangle + \langle \psi_1 \left| \delta U \right| \psi_1 \rangle = -\frac{mZ^2e^4}{2\hbar^2} + \Delta\mathcal{E},$$

$$\Delta\mathcal{E} = \int dV \psi_1^* \delta U \psi_1 = \frac{1}{\pi r_1^3} 4\pi \int\limits_0^{R_я} e^{-2r/r_1} \left\{ \begin{matrix} \dfrac{Ze^2}{r} - \dfrac{Ze^2}{R_я} \\ \dfrac{Ze^2}{r} - \dfrac{3}{2}\dfrac{Ze^2}{R_я}\left(1 - \dfrac{r^2}{3R_я^2}\right) \end{matrix} \right\} r^2 dr,$$

т. к. $\frac{R_я}{r_1} \leqslant \frac{3{,}5 \cdot 10^{-13}}{25{,}6 \cdot 10^{-13}} \sim 0{,}1$, то $e^{-2r/r_1} \approx 1$. Тогда

$$\Delta\mathcal{E} \approx \frac{4}{r_1^3} \int\limits_0^{R_я} \left\{ \begin{matrix} Ze^2\left(r - \dfrac{r^2}{R_я}\right) \\ Ze^2\left[r - \dfrac{3}{2}\dfrac{r^2}{R_я}\left(1 - \dfrac{r^2}{3R_я^2}\right)\right] \end{matrix} \right\} dr = \begin{cases} \dfrac{2}{3}\dfrac{Ze^2}{r_1}\left(\dfrac{R_я}{r_1}\right)^2 \text{ — сфера,} \\ \dfrac{2}{5}\dfrac{Ze^2}{r_1}\left(\dfrac{R_я}{r_1}\right)^2 \text{ — шар.} \end{cases}$$

Видно, что пооправка положительна, следовательно, уровни сдвигаются вверх. Относительная поправка

$$\delta = \left| \frac{\Delta\mathcal{E}}{\mathcal{E}_1} \right| = \frac{\Delta\mathcal{E}}{\frac{Ze^2}{2r_1}} = \begin{cases} \dfrac{4}{3}\left(\dfrac{R_я}{r_1}\right)^2 \text{ — сфера,} \\ \dfrac{4}{5}\left(\dfrac{R_я}{r_1}\right)^2 \text{ — шар,} \end{cases}$$

где $r_1 = \frac{\hbar^2}{Zm_e e^2}$, откуда

$$\frac{\Delta\mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \begin{cases} 5{,}94 \cdot 10^{-7} \text{ — сфера,} \\ 3{,}56 \cdot 10^{-7} \text{ — шар.} \end{cases}$$

Задача 4.45

Решение.

$$r_\mu = \frac{\hbar^2}{m_\mu Z e^2}\frac{m_e}{m_e} = r_Б \frac{m_e}{Z m_\mu} = 1{,}27 \cdot 10^{-11} \text{ см} \ll r_Б.$$

$$\frac{1}{\lambda_{32}} = R_\infty \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right) = \frac{5}{36} R_\infty = \frac{5}{36} = 1{,}52 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}.$$

$$\lambda_{32} = 656 \text{ нм}.$$

$$\mathcal{E}_{32} = \frac{hc}{\lambda_{32}} = 1{,}89 \text{ эВ}.$$

Задача 5.16

Решение.
$$I = \mu d^2 \approx md^2.$$
$$\Delta E_l = \frac{\hbar^2}{I}(l+1) = \frac{\hbar^2}{I}.$$
$$\Delta E = \frac{\hbar^2}{md^2} = \frac{hc}{\lambda} = hc\left(\frac{1}{\lambda}\right).$$
$$d^2 = \frac{\hbar^2}{mhc\left(\frac{1}{\lambda}\right)} = \frac{\hbar^2}{2\pi mc\Delta} = 1{,}97 \cdot 10^{-16}\ \text{см}^2.$$
$$d = 1{,}4 \cdot 10^{-8}\ \text{см}.$$

Задача 5.25

Решение.
$$\overline{E} = \overline{E}_{\text{кин}} + \overline{E}_{\text{пот}}.$$
$$\overline{E}_{\text{к}} = \overline{E}_{\text{п}} = \frac{\mu\omega^2\overline{x^2}}{2}.$$
$$\overline{E} = \frac{\hbar\omega}{2}.$$
$$\overline{x^2} = \overline{A_0^2\cos^2\omega t} = \frac{\overline{A_0^2}}{2} \to \frac{\hbar\omega}{2} = 2\cdot\frac{\mu\omega^2}{2}\frac{A_0^2}{2}.$$
$$A_0 = \sqrt{\frac{\hbar}{\mu\omega}}.$$
$$\mu = \frac{m_O m_C}{m_O + m_C} = \frac{16\cdot 12}{16+12}\cdot 1{,}66\cdot 10^{-24}\ \text{г} = 11{,}45\cdot 10^{-24}\ \text{г}.$$
$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda} \to A_0 = \sqrt{\frac{\hbar}{\mu\omega}} = \sqrt{\frac{\hbar\cdot\lambda}{2\pi c\mu}} \approx 4{,}7\cdot 10^{-10}\ \text{см}.$$
$$kT \geqslant \hbar\omega.$$
$$T \geqslant \frac{2\pi\hbar c}{k\cdot\lambda} \approx 3100\ \text{К}.$$

Задача 5.51

Решение. $\mathrm{H}\,^{35}\mathrm{Cl}:\ \mu_{35} = \frac{1\cdot 35}{1+35} = 0{,}9722 m_p.$
$\mathrm{H}\,^{37}\mathrm{Cl}$: $\mu_{37} = \frac{1\cdot 37}{1+37} = 0{,}9737 m_p$

$$\Delta\mu = 0{,}0015 m_p.$$
$$\lambda = \frac{hc}{\Delta\mathcal{E}_{\text{кол}}} = \frac{hc}{\hbar\sqrt{\frac{k}{\mu}}} = 2\pi c\sqrt{\frac{\mu}{k}} \propto \sqrt{\mu}.$$
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{2}\frac{\Delta\mu}{\mu} = 7{,}7\cdot 10^{-4}.$$

Задача 5.55

Решение. При $n > n_{\max}$ не $\exists$ реальных n.

$$\frac{dE_n}{dn} = \hbar\omega\left[1 - 2\alpha\left(n + \frac{1}{2}\right)\right] = 0.$$

$$n^{\max} = \frac{1-\alpha}{2\alpha} = 80{,}9.$$

$$N_{\max} = 81.$$

Задача 0-7-1

Решение. См. табл. 1.

n	l	j
	0	$\pm 1/2$
3	1	$3/2;\ 1/2$
	2	$5/2;\ 3/2$

Таблица 1

$$l = 0; \ldots; n-1 = 0; 1; 2.$$

$$j = l + s, \text{ т. е. } j = l + \frac{1}{2}, \text{ либо } j = l - \frac{1}{2}.$$

$$j = \pm\frac{1}{2};\ \frac{3}{2};\ \frac{5}{2}.$$

Задача 0-7-2

Решение. $2p$-сост: $n = 2$; $l = 1$

$$j = \frac{1}{2};\ \frac{3}{2}.$$

$$J = m_j\hbar; \quad m_j = \pm j;\ \pm(j-1); \ldots; 0 = \pm\frac{3}{2};\ \pm\frac{1}{2};\ 0.$$

$$J = 0;\ \pm\frac{1}{2}\hbar;\ \pm\frac{3}{2}\hbar.$$

Задача 6.10

Решение.

$$I\omega = 2lN \to \omega = \frac{2lN}{I}.$$

$$\omega = \frac{2N\cdot\hbar}{0{,}5mr^2}; \qquad \nu = \frac{m}{A} = \frac{N}{N_{\text{A}}} \to N = \frac{mN_{\text{A}}}{A}.$$

$$\omega = \frac{4N\hbar}{mr^2} = \frac{4\hbar}{mr^2}\cdot\frac{mN_{\text{A}}}{A}\cdot\frac{\pi\rho L}{\pi\rho L} = \frac{2hN_{\text{A}}\rho L}{A\rho\pi r^2 L} = \frac{2hN_{\text{A}}\rho L}{mA} = 1{,}1\cdot 10^{-3}\ \text{с}^{-1}.$$

Задача 6.15

$$f_z = \mu \frac{\partial B_z}{\partial z} = m_n \cdot a_\perp.$$

$$a_\perp = \frac{v_\perp}{\tau}; \qquad \tau = \frac{L}{v_\parallel}.$$

$$f_z = m_n \cdot \frac{v_\parallel v_\perp}{L} = \mu \frac{\partial B_z}{\partial z}.$$

$$v_\perp = \frac{\mu \frac{\partial B_z}{\partial z}}{m_n} \frac{L}{v_\parallel}.$$

Дифф. уширение: $\alpha_{\text{диф}} \sim \frac{\lambda}{d} = \frac{h}{d\sqrt{2mE}}$

$$\alpha_{\text{маг}} = \frac{v_\perp}{v_\parallel} = \frac{\mu \frac{\partial B_z}{\partial z}}{m} \frac{L}{v_\parallel^2} = \alpha_{\text{диф}} = \frac{h}{d\sqrt{2mE}}.$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} = \frac{2Eh}{L\mu d\sqrt{2mE}} = 150 \frac{\text{Гс}}{\text{см}}.$$

Задача 6.20

Решение.

$$\mathcal{E}_1 = \hbar\omega_1 = \frac{hc}{\lambda_1}.$$

$$\mathcal{E}_2 = \frac{hc}{\lambda_2}.$$

$$\Delta\mathcal{E} = hc\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}.$$

$$\Delta\mathcal{E} = 2\mu B.$$

$$B = \frac{\Delta\mathcal{E}}{2\mathfrak{m}_\text{Б}} = 1{,}8 \cdot 10^5 \text{ Гс}.$$

Задача 6.48

Решение.

$$\mathbf{H} = -\beta\mathbf{M}; \qquad \beta = \frac{4\pi}{3}.$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M} = \left(-\frac{4\pi}{3} + 4\pi\right)\mathbf{M} = \frac{8\pi}{3} \frac{g_s \mathfrak{m}_\text{Б} \cdot \mathbf{S}_e}{\frac{4}{3}\pi r_\text{Б}^3}.$$

Энергия взаимодействия:

$$U_{ep} = -\left(\boldsymbol{\mu}_p, \mathbf{B}\right) = -g_p \mathfrak{m}_\text{яд} \mathbf{S}_p \mathbf{B} = -g_p \mathfrak{m}_\text{яд} \mathbf{S}_p \cdot 2g_s \frac{\mathfrak{m}_\text{Б}}{r_\text{Б}^3} \mathbf{S}_e =$$
$$= -2 g_s g_p \frac{\mathfrak{m}_\text{яд} \mathfrak{m}_\text{Б}}{r_\text{Б}^3} (\mathbf{S}_p, \mathbf{S}_e).$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_e + \mathbf{S}_e, \quad S = 1, 0.$$

$$\Delta E = |U_{ep}(S=1) - U_{ep}(S=0)|\,.$$

$$\overline{S^2} = \overline{(\mathbf{S}_e + \mathbf{S}_p)^2} = \overline{S_e^2} + \overline{S_p^2} + 2\overline{\mathbf{S}_e\mathbf{S}_p}.$$

$$2\mathbf{S}_e\mathbf{S}_p = \left(\overline{S^2} - \overline{S_e^2} - \overline{S_p^2}\right).$$

$$\overline{S^2} = S(S+1) \xlongequal{S=1} 1\cdot 2 = 2.$$

$$\overline{S_e^2} = S(S+1) = \frac{1}{2}\cdot\frac{3}{2} = \frac{3}{4}.$$

При $S=1$: $2\overline{\mathbf{S}_e\mathbf{S}_p} = \left(1\cdot 2 - \frac{3}{4} - \frac{3}{4}\right) = \frac{1}{2}$.
При $S=0$: $2\overline{\mathbf{S}_e\mathbf{S}_p} = \left(0 - \frac{3}{4} - \frac{3}{4}\right) = -\frac{3}{2}$

$$\Delta E = g_s g_p \frac{\mathfrak{m}_{\text{яд}}\mathfrak{m}_{\text{Б}}}{r_{\text{Б}}^3}\left(\frac{1}{2} + \frac{3}{2}\right) = 2 g_s g_p \frac{\mathfrak{m}_{\text{Б}}^2}{r_{\text{Б}}^3}\frac{m_e}{m_p}.$$

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{hc r_{\text{Б}}^3 m_p}{2 g_s g_p \mathfrak{m}_{\text{Б}}^2 m_e} = 28{,}2 \text{ см}.$$

Задача 6.78

Решение. Энерг. спин-орб. вз-я: $\mathcal{E}_{SL} = A\overline{(\mathbf{L},\mathbf{S}}$.

$$\mathbf{J} = \mathbf{S} + \mathbf{L} \implies \overline{J^2} = \overline{S^2} + \overline{L^2} + 2\overline{(\mathbf{S},\mathbf{S})} \implies \overline{(\mathbf{L},\mathbf{S})} =$$
$$= \frac{1}{2}\left(\overline{J^2} - \overline{S^2} - \overline{L^2}\right) = \frac{1}{2}\left(J(J+1) - S(S+1) - L(L+1)\right).$$

$$^1D_2: \quad \mathcal{E}_{SL}(^1D_2) = \frac{A}{2}(2\cdot 3 - 0 - 2\cdot 3) = 0.$$

$$^3P_2: \quad \mathcal{E}_{SL}(^3P_2) = \frac{A}{2}(2\cdot 3 - 1\cdot 2 - 1\cdot 2) = A.$$

$$^3P_1: \quad \mathcal{E}_{SL}(^3P_2) = \frac{A}{2}(1\cdot 3 - 1\cdot 2 - 1\cdot 2) = -A.$$

$$^3P_0: \quad \mathcal{E}_{SL}(^3P_2) = \frac{A}{2}(0\cdot 3 - 1\cdot 2 - 1\cdot 2) = -2A.$$

$$\begin{cases} \dfrac{hc}{\lambda_1} = \mathcal{E}(^1D_2) - \mathcal{E}(^3P_2) = \mathcal{E}(^1D_2) - \left(\mathcal{E}(^3P) + \mathcal{E}_{SL}(^3P_2)\right) \\ \dfrac{hc}{\lambda_2} = \mathcal{E}(^1D_2) - \mathcal{E}(^3P_1) = \mathcal{E}(^1D_2) - \left(\mathcal{E}(^3P) + \mathcal{E}_{SL}(^3P_1)\right) \end{cases}.$$

$$\frac{hc}{\lambda_1} - \frac{hc}{\lambda_2} = \mathcal{E}_{SL}(^3P_1) - \mathcal{E}_{SL}(^3P_2) = -2A.$$

$$\mathcal{E}(^3P_0) - \mathcal{E}(^3P_1) = \mathcal{E}(^3P) + \mathcal{E}_{SL}(^3P_0) - \mathcal{E}(^3P) - \mathcal{E}_{SL}(^3P_1) = \mathcal{E}_{SL}(^3P_0) - \mathcal{E}_{SL}(^3P_1) = -A.$$

$$-A = \frac{hc}{\lambda} = \left(\frac{hc}{\lambda_1} - \frac{hc}{\lambda_2}\right)\cdot 2 \implies \lambda = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = 16634 \text{ Å}.$$

Задача 6.78

Решение. $S = 1$ — ортогелий, $S = 0$ — парагелий.

$$E_{\text{пара}} = -W_{\text{пара}} = E + E_{\text{кул}} + V_{\text{пара}}.$$

$$E_{\text{орто}} = -W_{\text{орто}} = E + E_{\text{кул}} + V_{\text{орто}}.$$

$$\overline{\mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2} = \overline{S_1^2} + \overline{S_2^2} + 2\overline{\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2}.$$

$$2\overline{\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2} = \overline{(S_1 + S_2)^2} - \overline{S_1^2} - \overline{S_2^2} = S(S+1) - \frac{3}{4} - \frac{3}{4}.$$

$$V = -\frac{A}{2}\left[1 + 4\overline{\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2}\right] = -\frac{A}{2}\left[1 + 2\left(S(S+1) - \frac{6}{4}\right)\right] =$$
$$= -A\left[\frac{1}{2} + S(S+1) - \frac{3}{2}\right] = -A\left[S(S+1) - 1\right].$$

$$V_{\text{пара}} = +A; \qquad V_{\text{орто}} = -A.$$

$$E_{\text{пара}} = -W_{\text{пара}} = E + E_{\text{кул}} + A.$$

$$E_{\text{орто}} = -W_{\text{орто}} = E + E_{\text{кул}} - A.$$

В поле $Z = 2$ при $1s^1 2s^1$

$$E = -13{,}6 \cdot Z^2 - 13{,}6\frac{Z^2}{n^2} = -13{,}6\left(4 + \frac{4}{4}\right) = -68 \text{ эВ}.$$

$$A = (E_{\text{пара}} - E_{\text{орто}})\,\frac{1}{2} = 0{,}4 \text{ эВ}.$$

$$E_{\text{кул}} = \frac{E_{\text{пара}} + E_{\text{орто}}}{2} - E = -9{,}2 \text{ эВ}.$$

Задача T2

Решение. Термом называют макс. возможные M_L при конкретных M_S или M_S при одном M_L. См. рис. 1.

$$\begin{pmatrix} \underline{{}^3P} \\ {}^3S \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} \underline{{}^1D} \\ {}^1P \\ {}^1S \end{pmatrix} \qquad \left(\underline{{}^1S}\right).$$

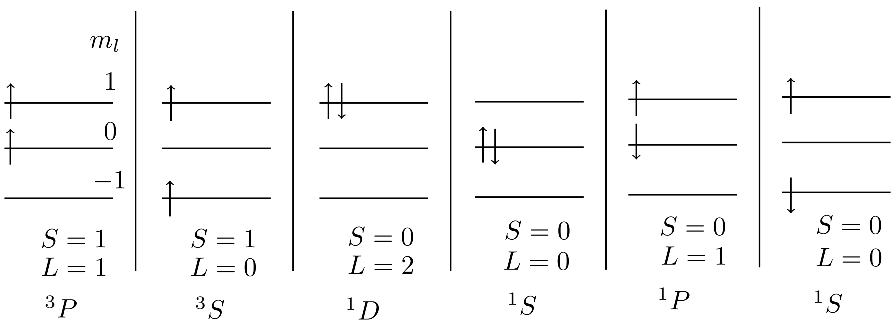

Рис. 1