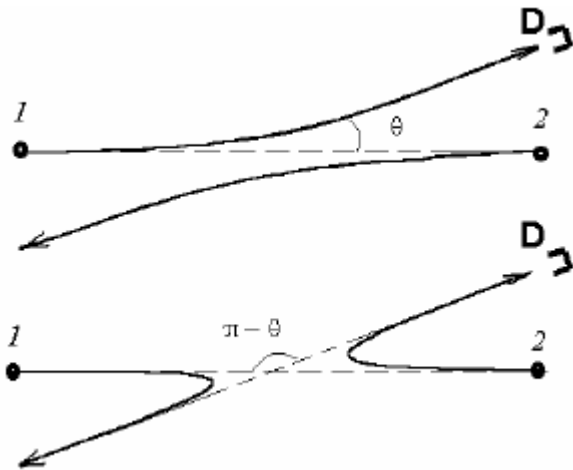
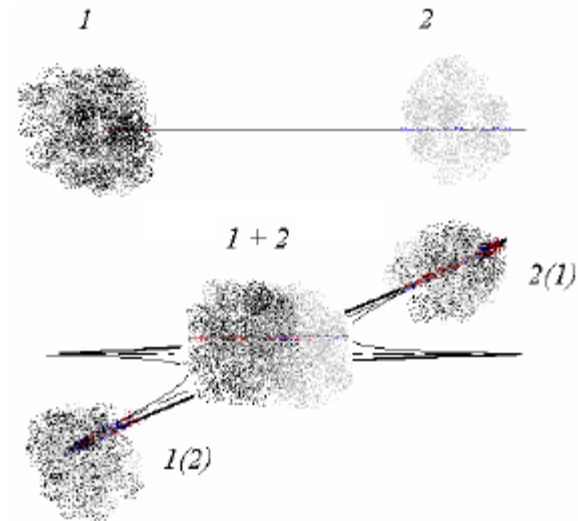


Тождественность квантовых частиц



Рассеяние классических частиц



Рассеяние квантовых частиц

Для квантовых систем тождественных частиц допустимы лишь симметричные или антисимметричные волновые функции

$$\hat{P}\psi(x_1, x_2) = P\psi(x_2, x_1) \quad P - \text{оператор перестановки}$$

$$\hat{P}^2\psi(x_1, x_2) = \psi(x_1, x_2) \quad \Rightarrow \quad \psi_S(x_1, x_2) = \psi_S(x_2, x_1)$$

$$\psi_A(x_1, x_2) = -\psi_A(x_2, x_1)$$

$$P = \pm 1$$

Квантовое описание системы многих частиц

$$\hat{H}\psi(x_1, x_2) = E\psi(x_1, x_2)$$

$$\hat{H} = \hat{H}_1 + \hat{H}_2 + U(x_1, x_2)$$

$$\hat{H}_1 = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + U(x_1)$$

$$\hat{H}_2 = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + U(x_2)$$

$$U(x_1, x_2)$$

энергия
взаимодействия

Невзаимодействующие частицы

$$U(x_1, x_2) = 0$$

$$\psi(x_1, x_2) = \psi_a(x_1)\psi_b(x_2)$$

$$\psi(x_2, x_1) = \psi_a(x_2)\psi_b(x_1) \neq \psi(x_1, x_2)$$

$$\psi_S(x_1, x_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \psi_a(x_1)\psi_b(x_2) + \psi_a(x_2)\psi_b(x_1) \}$$

Бозоны $S=0, 1, 2, \dots$ фотон, пионы, ${}^4\text{He}$...

$$\psi_A(x_1, x_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \psi_a(x_1)\psi_b(x_2) - \psi_a(x_2)\psi_b(x_1) \}$$

Фермионы $S=1/2, 3/2, \dots$ e, p, n, ${}^3\text{He}$...

Следствия неразличимости квантовых частиц. Обменное взаимодействие.

На графике показаны плотности вероятности для симметричной и антисимметричной волновой функции **двух невзаимодействующих** частиц в бесконечной яме, которые с равной вероятностью могут находиться в основном и первом возбужденном состоянии.

Бозоны (симметричная волновая функция) – тенденция к объединению.

Плотность вероятности максимальна, когда частицы находятся рядом ($x_1=x_2$ - биссектриса угла между осями x_1 и x_2).

Фермионы (антисимметричная волновая функция) - тенденция к разъединению.

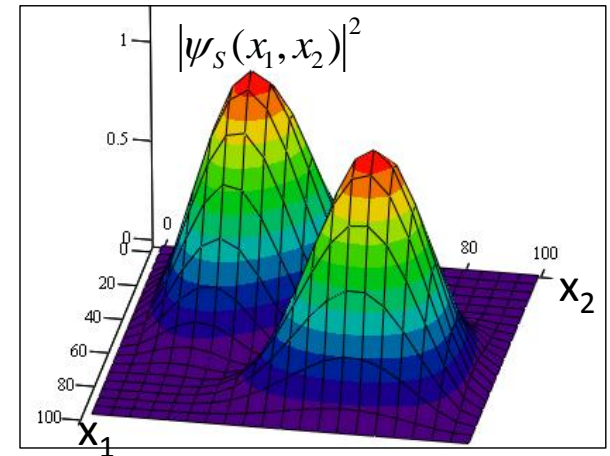
Плотность вероятности максимальна, когда частицы удалены друг от друга. Вероятность найти частицы в одной и той же области ($x_1=x_2$) равна нулю – принцип запрета Паули.

$$n1 := 1 \quad n2 := 2 \quad a := 100 \quad x1 := 1..100 \quad x2 := 1..100$$

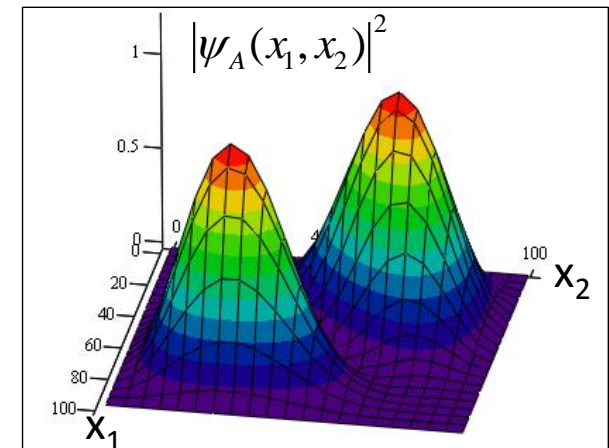
$$\psi_S(x1, x2) := \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sin\left(n1 \cdot \pi \cdot \frac{x1}{a}\right) \cdot \sin\left(n2 \cdot \pi \cdot \frac{x2}{a}\right) + \sin\left(n2 \cdot \pi \cdot \frac{x1}{a}\right) \cdot \sin\left(n1 \cdot \pi \cdot \frac{x2}{a}\right) \right)$$

$$\psi_A(x1, x2) := \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sin\left(n1 \cdot \pi \cdot \frac{x1}{a}\right) \cdot \sin\left(n2 \cdot \pi \cdot \frac{x2}{a}\right) - \sin\left(n2 \cdot \pi \cdot \frac{x1}{a}\right) \cdot \sin\left(n1 \cdot \pi \cdot \frac{x2}{a}\right) \right)$$

$$\psi_S^2(x1, x2) := (\psi_S(x1, x2))^2 \quad \psi_A^2(x1, x2) := (\psi_A(x1, x2))^2$$



ψ_S^2



ψ_A^2

Обменное взаимодействие

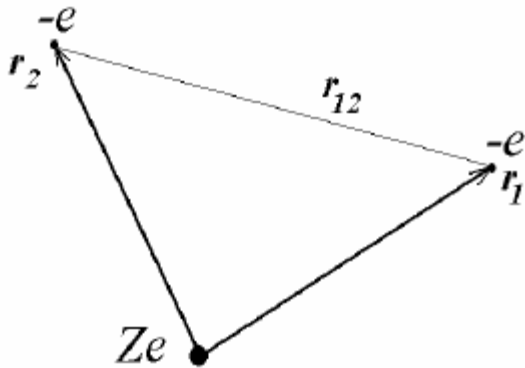


Энергия взаимодействия электронов

$$\psi_{S,A}(r_1, r_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \psi_\alpha(r_1)\psi_\beta(r_2) \pm \psi_\alpha(r_2)\psi_\beta(r_1) \}$$

$$U = \frac{e^2}{r_{12}}$$

$$\langle U \rangle = \int \psi^* U \psi dV_1 dV_2$$



$$\rho_\alpha(r_1) = -e |\psi_\alpha(r_1)|^2$$

$$\rho_\beta(r_2) = -e |\psi_\beta(r_2)|^2$$

Плотности заряда электронов

$$\rho_{\alpha\beta}(r_1) = -e \psi_\alpha^*(r_1) \psi_\beta(r_1)$$

$$\rho_{\alpha\beta}(r_2) = -e \psi_\alpha(r_2) \psi_\beta^*(r_2)$$

Обменные плотности заряда электронов

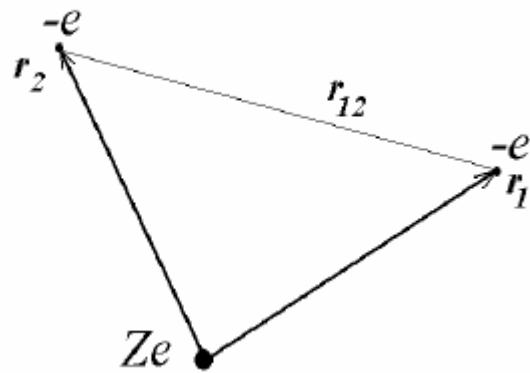
$$\langle U \rangle = \int \frac{\rho_\alpha(r_1)\rho_\beta(r_2)}{r_{12}} dV_1 dV_2 \pm \int \frac{\rho_{\alpha\beta}(r_1)\rho_{\alpha\beta}^*(r_2)}{r_{12}} dV_1 dV_2 =$$

$= K \pm A$ K - кулоновская, A – обменная энергия

Атом гелия

$$\hat{H} = \hat{H}_1 + \hat{H}_2 + \hat{V}_{12}, \quad \hat{H}\psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = E\psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$$

$$\hat{H}_1 = \hat{T}_1 + \hat{V}_1 = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla_1^2 - \frac{Ze^2}{r_1}, \quad \hat{H}_2 = \hat{T}_2 + \hat{V}_2 = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla_2^2 - \frac{Ze^2}{r_2} \quad \hat{V}_{12} = e^2/r_{12}$$



$$[\hat{H}_1(\vec{r}_1) + \hat{H}_2(\vec{r}_2)]\psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = E^{(0)}\psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$$

$$\psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \psi_1(\vec{r}_1)\psi_2(\vec{r}_2)$$

$$E^{(0)} = E_1 + E_2 = -Z^2 Ry \left(\frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$$\psi_{S(A)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_1(\vec{r}_1)\psi_2(\vec{r}_2) \pm \psi_1(\vec{r}_2)\psi_2(\vec{r}_1))$$

$$\chi_S(\sigma_1, \sigma_2) = |\uparrow\uparrow\rangle, \quad S = 1, \quad M_S = 1,$$

$$\chi_S(\sigma_1, \sigma_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle), \quad S = 1, \quad M_S = 0, \quad \left. \begin{array}{l} \chi_S(\sigma_1, \sigma_2) = |\downarrow\downarrow\rangle, \quad S = 1, \quad M_S = -1, \\ \chi_A(\sigma_1, \sigma_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle), \quad S = 0, \quad M_S = 0, \end{array} \right\} \Psi(\xi_1, \xi_2) = \psi_A(\vec{r}_1, \vec{r}_2)\chi_S(\sigma_1, \sigma_2)$$

$$\Psi(\xi_1, \xi_2) = \psi_S(\vec{r}_1, \vec{r}_2)\chi_A(\sigma_1, \sigma_2)$$

Атом гелия

Расчет поправки к энергии
методом теории возмущений:

$$\Delta E = \int \Psi^*(\vec{r}_1, \vec{r}_2) V_{12}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) d^3 r_1 d^3 r_2$$

Для основного состояния $1s^2$

$$\Delta E = \int |\Psi_{1s}(\vec{r}_1)|^2 |\Psi_{1s}(\vec{r}_2)|^2 \frac{e^2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} d^3 r_1 d^3 r_2$$

$$\Delta E = \int \frac{\rho(\vec{r}_1)\rho(\vec{r}_2)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} d^3 r_1 d^3 r_2$$

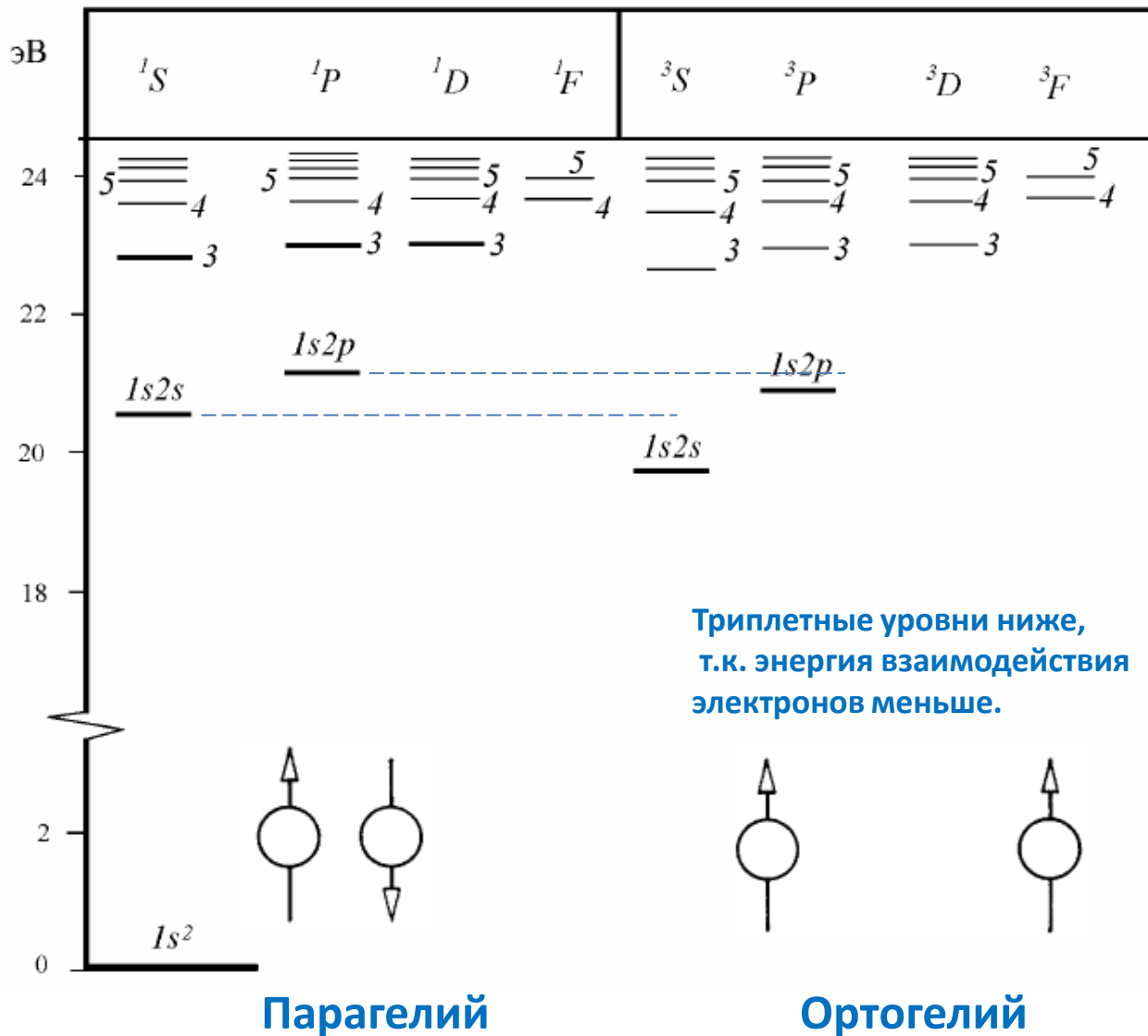
$$\Psi_{1s}(\vec{r}) = \sqrt{\frac{Z^3}{\pi a_0^3}} \exp(-Zr/a_0)$$

$$\Delta E = \frac{5}{4} ZRy$$

$$E = -(2Z^2 - \frac{5}{4}Z)Ry$$

$$E = -5.5Ry \approx -74.8 \text{ эВ.}$$

Эксперимент: -79 эВ.



Атом гелия

Для конфигурации $1snl$

$$\Delta E_{S(A)} = \int |\Psi_{S(A)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2)|^2 \frac{e^2}{r_{12}} d^3 r_1 d^3 r_2 =$$

$$\frac{1}{2} \int |(\Psi_{1s}(\vec{r}_1)\Psi_{nl}(\vec{r}_2) \pm \Psi_{1s}(\vec{r}_2)\Psi_{nl}(\vec{r}_1))|^2 \frac{e^2}{r_{12}} d^3 r_1 d^3 r_2 = C \pm A$$

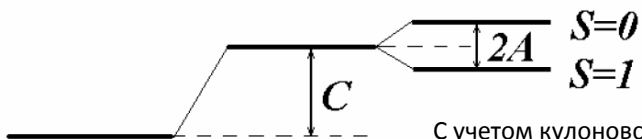
$$C = \int |\Psi_{1s}(\vec{r}_1)|^2 |\Psi_{nl}(\vec{r}_2)|^2 \frac{e^2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} d^3 r_1 d^3 r_2$$

- кулоновская энергия

$$A = \int \Psi_{1s}(\vec{r}_1)\Psi_{nl}(\vec{r}_2)\Psi_{1s}^*(\vec{r}_2)\Psi_{nl}^*(\vec{r}_1) \frac{e^2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} d^3 r_1 d^3 r_2$$

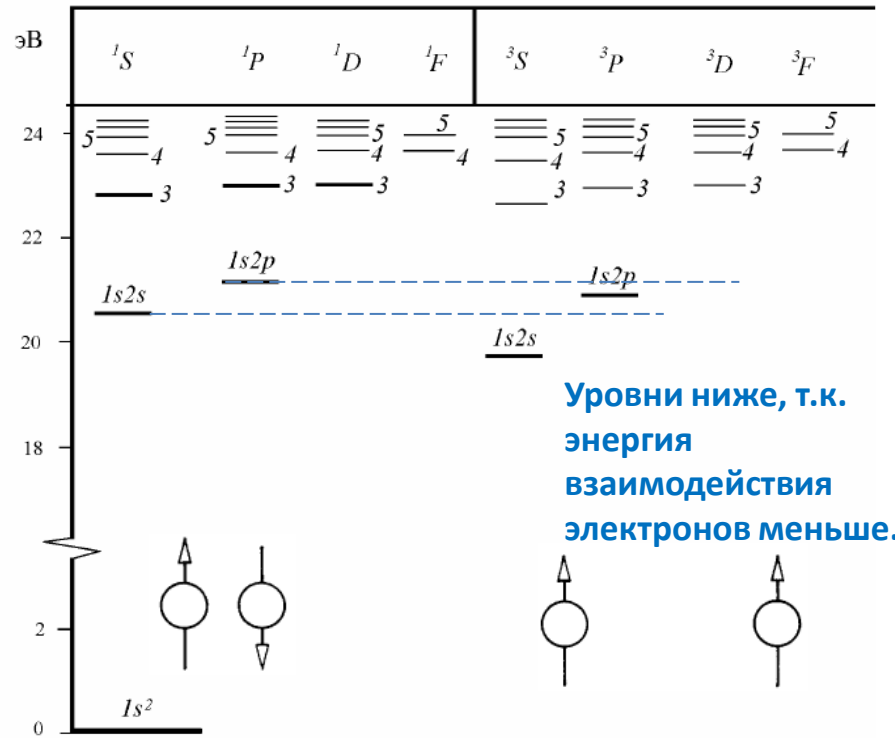
- обменная энергия

Расщепление уровня энергии на термы с учетом кулоновского взаимодействия двух электронов.



С учетом кулоновского и обменного взаимодействия.

С учетом кулоновского, но без учета обменного взаимодействия электронов.



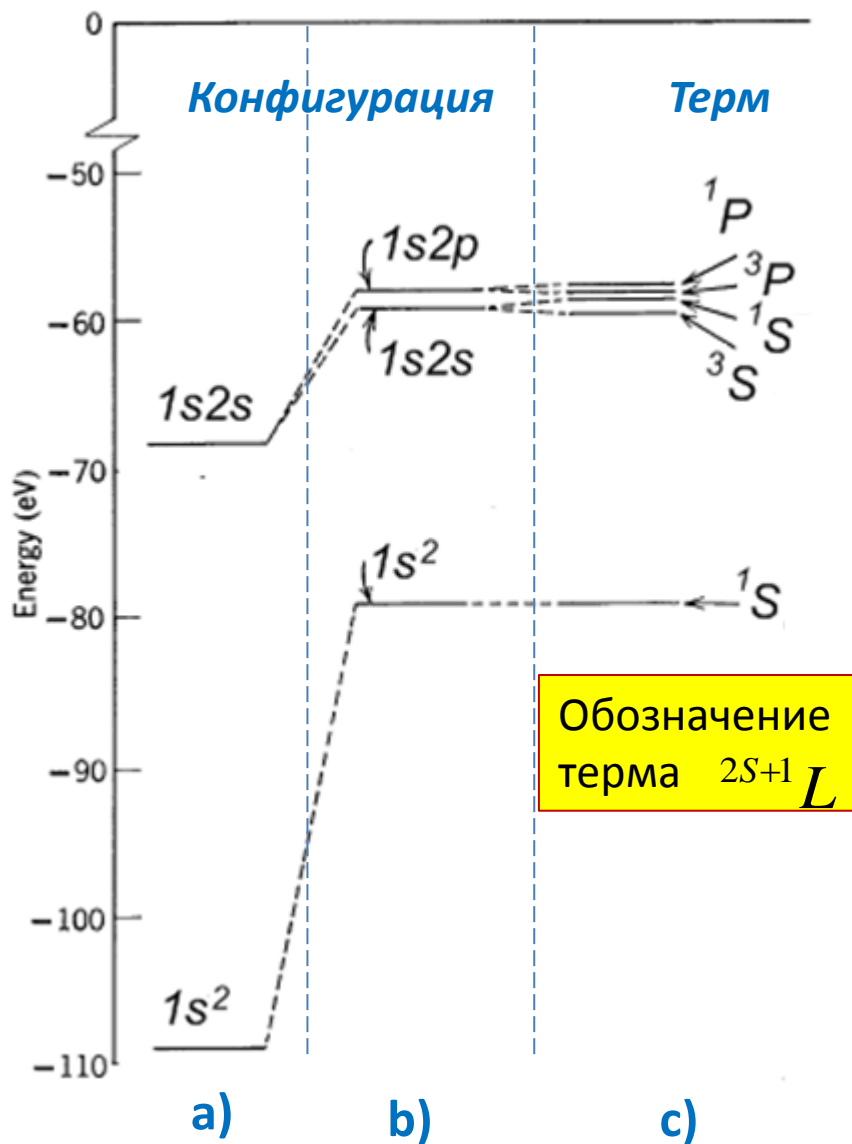
Уровни ниже, т.к. энергия взаимодействия электронов меньше.

Парагелий

Ортогелий

Без учета взаимодействия электронов, (электроны взаимодействуют только с ядром).

Атом гелия



Низшие уровни энергии атома гелия:

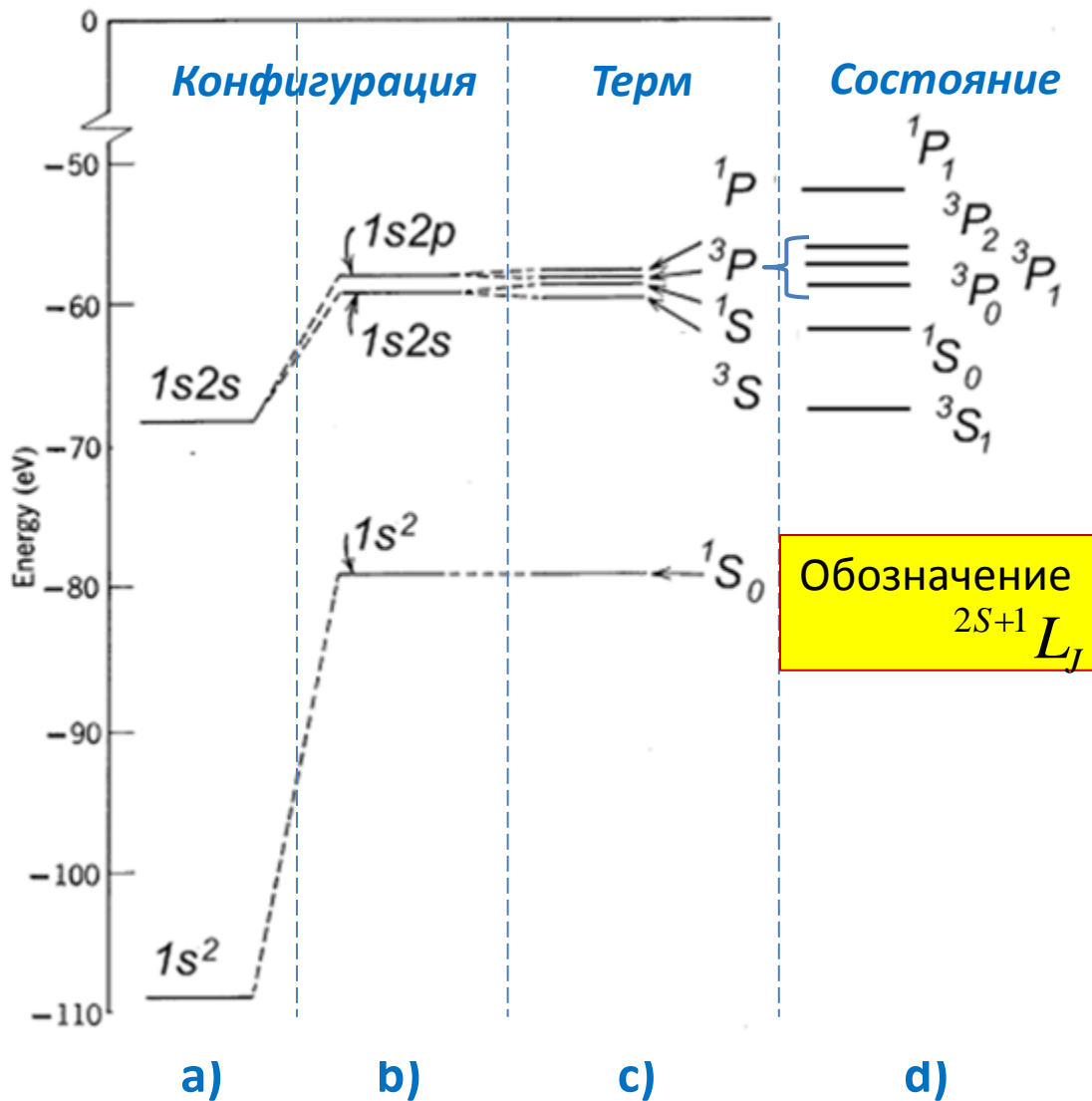
слева (a): без учета кулоновского взаимодействия электронов

в центре (b): с учетом кулоновского, но без учета обменного взаимодействия электронов

справа (c): с учетом кулоновского и обменного взаимодействия электронов (все триплеты ниже по энергии т.к. для них энергия электростатического взаимодействия электронов меньше)



Атом гелия



Низшие уровни энергии атома гелия:

(a): без учета кулоновского взаимодействия электронов

(b): с учетом кулоновского, но без учета обменного взаимодействия электронов

(c): с учетом кулоновского и обменного взаимодействия электронов (все триплеты ниже по энергии т.к. для них энергия взаимодействия электронов меньше)



(d): мультиплетное расщепление уровней с учетом спин-орбитального (тонкого) взаимодействия (не в масштабе).

мультиплетность = $\min[(2S+1), (2L+1)]$
все S термы - синглеты!

Многоэлектронный атом

Приближение самосогласованного поля (метод Хартри – Фока).

Состояние i -того электрона описывается волновой функцией, которая определяется из одночастичного уравнения Шредингера, описывающего движение этого электрона в самосогласованном потенциале, созданным ядром и всеми другими электронами. Самосогласованный потенциал сохраняет центральную симметрию, поэтому состояние электрона определяется теми же квантовыми числами n, l, m_l, m_s , что и для одноэлектронного атома.

Электростатические силы, действующие между электронами, изменяются в зависимости от полного орбитального L и спинового момента S данной электронной конфигурации, т.к. волновые функции с разной пространственной симметрией приводят к разным значениям среднего удаления электронов друг от друга и, как следствие, разной величине энергии электростатического взаимодействия электронов. При этом величина расщепления уровней энергии (термов) определяется обменной частью кулоновского интеграла межэлектронного взаимодействия.

Устойчивые конфигурации отвечают только определенным значениям полного орбитального L и полного спинового момента S . Если электростатическое взаимодействие электронов в атоме значительно больше спин-орбитального взаимодействия (приближение LS , или нормальной связи), то $\vec{L} = \sum_i \vec{l}_i$, $\vec{S} = \sum_i \vec{s}_i$ и $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$. В противном случае (для тяжелых атомов),

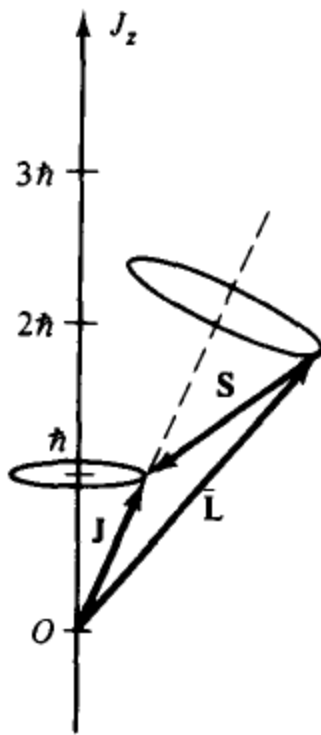
суммарный момент атома равен сумме спин-орбитальных моментов $\vec{J} = \sum_i \vec{J}_i = \sum_i (\vec{l}_i + \vec{s}_i)$ (j - j связь).

Энергия спин – орбитального взаимодействия $E_{LS} \sim Z^4 \alpha^2 Ry$, энергия электростатического взаимодействия $E_{ee} \sim ZRy$, поэтому j - j связь реализуется при $Z \geq Z^* \cong \alpha^{-2/3} \cong 27$.

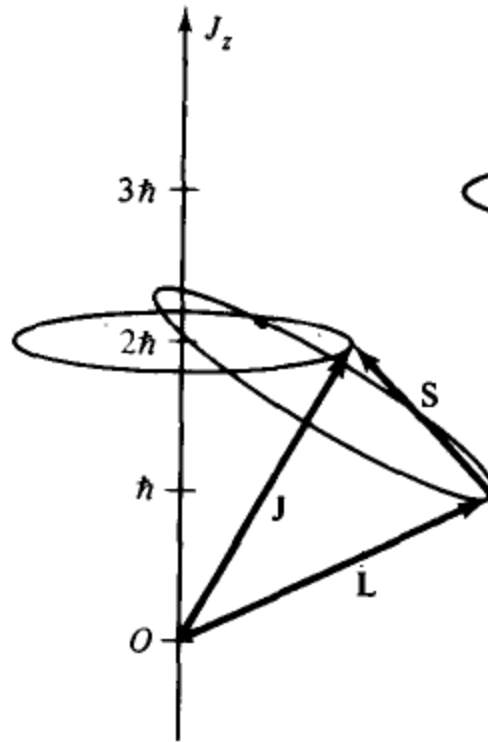
Полный момент импульса двух электронов

$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$ Для нормальной связи $\vec{L} = \sum_i \vec{l}_i$, $\vec{S} = \sum_i \vec{s}_i$

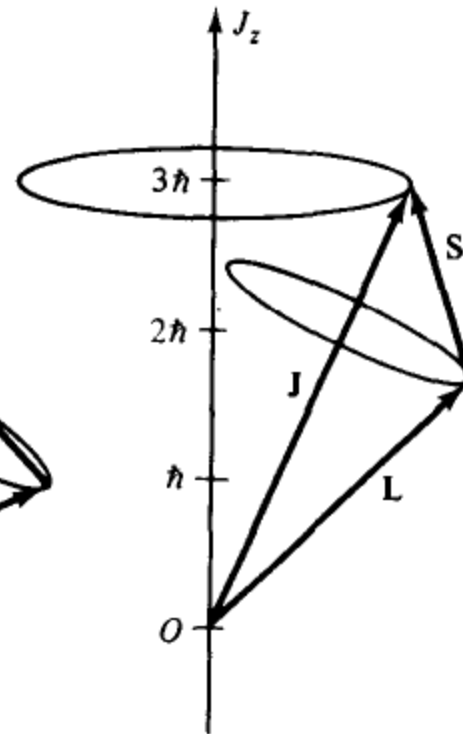
$s = 0 \rightarrow {}^1S, {}^1P, {}^1D, \dots$
 $s = 1 \rightarrow {}^3S, {}^3P, {}^3D, \dots$



3D_1



3D_2



3D_3

Сложение L и S для триплетных состояний (L=2, S=1).

Вырождение по J: $2J+1$ (снимается в магнитном поле)

Многоэлектронный атом. Тонкая структура терма.

Спин–орбитальное взаимодействие приводит к появлению тонкой структуры: терм расщепляется на группу состояний - мультиплет, число компонентов которого определяется числом возможных ориентаций векторов L и S , то есть числом возможных значений квантового числа J , задающего величину полного момента электронной оболочки атома. Для LS - связи

$$\vec{L} = \sum_i \vec{l}_i, \quad \vec{S} = \sum_i \vec{s}_i, \quad \vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

Обозначение терма $^{2S+1}L_J$ $^2S_{1/2}; ^2P_{1/2}; ^2P_{3/2}...$

мультиплетность = $\min[(2S + 1), (2L + 1)]$

Правило интервалов Ланде:

Оператор спин – орбитального взаимодействия

$$\hat{V}_{LS} = A(\hat{L}\hat{S})$$

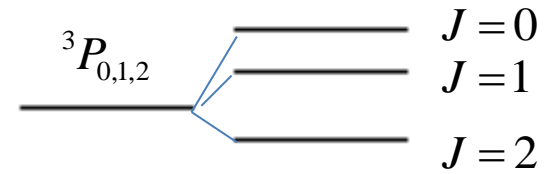
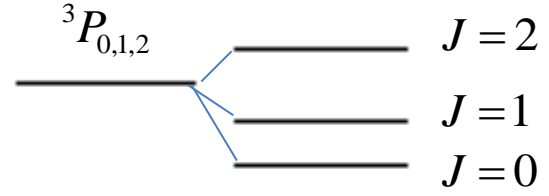
$$\hat{V}_{LS} = \frac{A(\hat{J}^2 - \hat{L}^2 - \hat{S}^2)}{2}$$

$$E_J = \frac{A}{2} \hbar^2 (J(J+1) - L(L+1) - S(S+1))$$

расстояние между соседними компонентами мультиплета

$$\Delta E_J = E_J - E_{J-1} = A' J$$

Нормальный мультиплет



Обращенный мультиплет

Тонкая структура терма

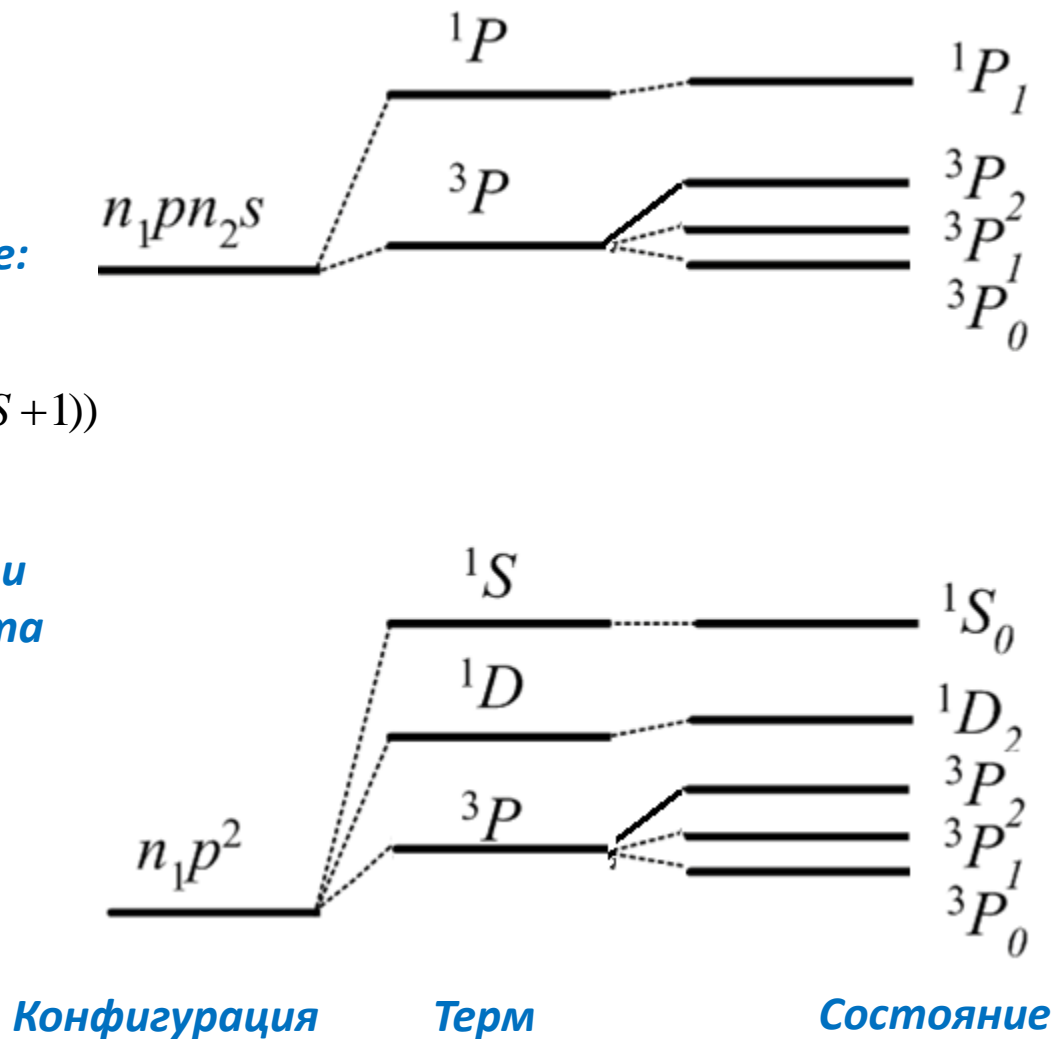
мультиплетность =
 $\min[(2S + 1), (2L + 1)]$

Правило интервалов Ланде:

$$E_J = \frac{A^2}{2} (J(J + 1) - L(L + 1) - S(S + 1))$$

расстояние между соседними компонентами мультиплета

$$\Delta E_J = E_J - E_{J-1} = AJ$$



Заполнение электронных оболочек (слоев)



Вольфганг Паули
(1940)

Кратность вырождения $N = 2n^2$

Оболочка	K		L			M								
Подоболочка (n, l)	1s	2s	2p			3s	3p			3d				
m_l	0	0	+1	0	-1	0	+1	0	-1	+2	+1	0	-1	-2
m_s	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓
Число электронов	2	2	6			2	6			10				

Полностью заполненные оболочки (замкнутые)

$$\vec{L} = 0 \quad \vec{S} = 0 \quad \vec{J} = 0$$

Правило Маделунга: } Заполнение оболочек происходит в порядке возрастания суммы $(n+l)$, с приоритетом по n .

(обычно, 4s и 5s подоболочки заполняются раньше, чем 3d и 4d)

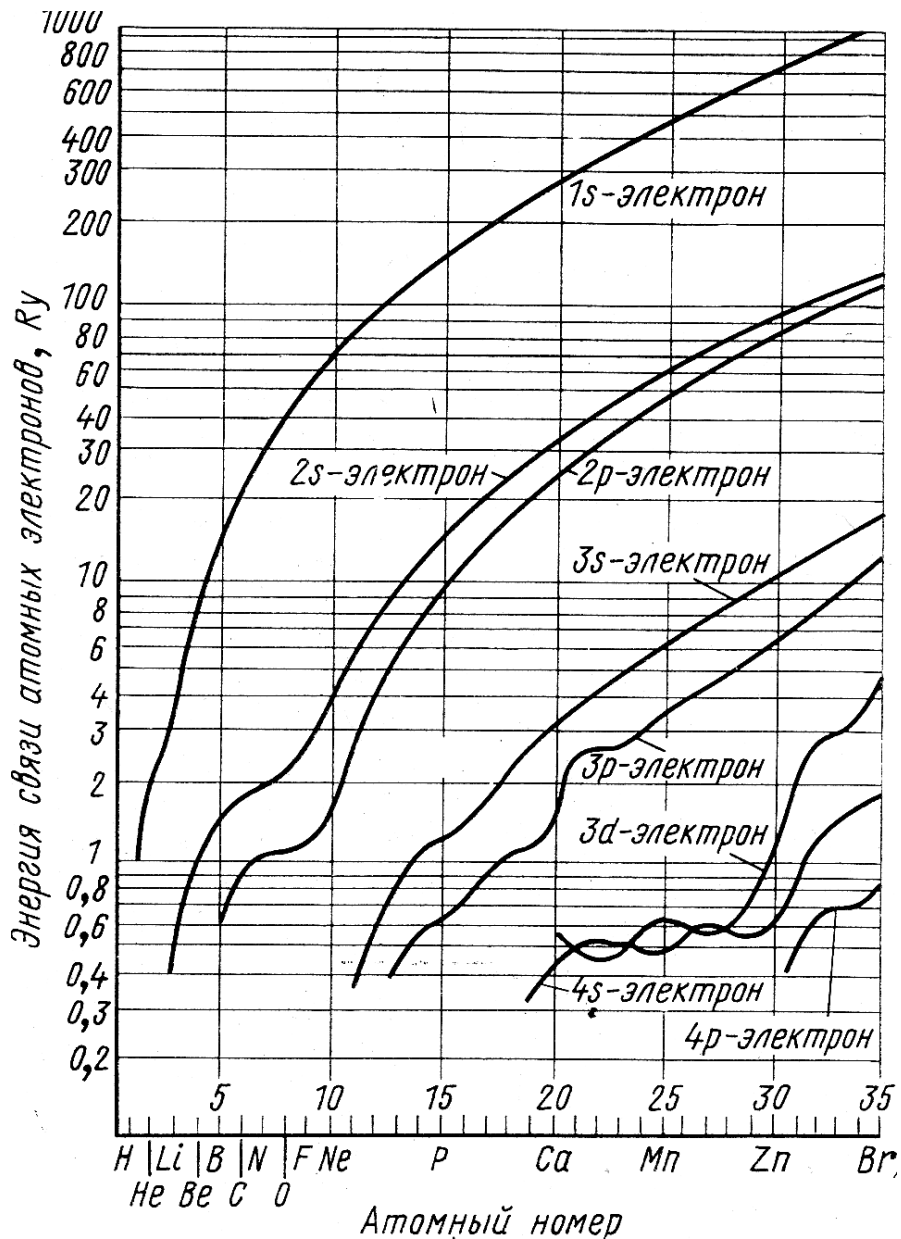
$n+l:$	1	2	3	4	5	6	7
	1s	2s	2p 3s	3p 4s	3d 4p 5s	4d 5p 6s	4f 5d 6p 7s
Z	1	3	5 11	13 19	21 31 37	39 49 55	57 72 82 87

Z - заряд ядра атома, у которого начинается заполнение указанной подоболочки.

В любом квантовом состоянии не может находиться более одного электрона

Нобелевская премия по физике
(1945)

Заполнение оболочек

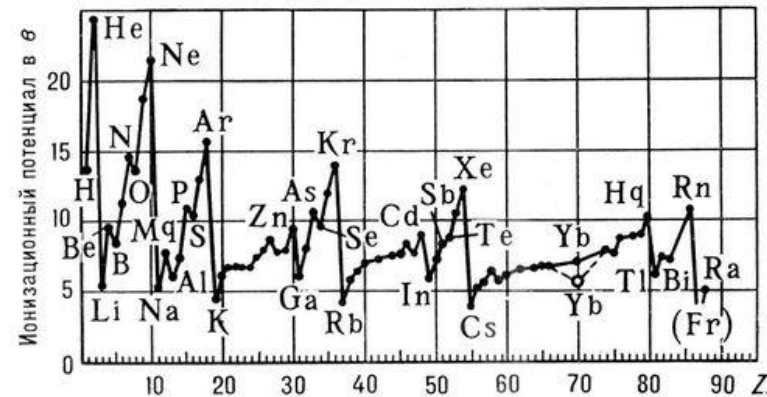


Заполнение оболочек происходит в порядке возрастания суммы $(n+l)$, с приоритетом по n .

(обычно, 4s и 5s подоболочки заполняются раньше, чем 3d и 4d)

Периодическая таблица Д.И.Менделеева

Элемент Z	L			M			N		Основной терм
	K 1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	
1 H 2 He	1 2	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	$^2S_{1/2}$ 1S_0
3 Li 4 Be	2 2	1 2	— —	— —	— —	— —	— —	— —	$^2S_{1/2}$ 1S_0
5 B 6 C	2 2	2 2	1 2	— —	— —	— —	— —	— —	$^2P_{1/2}$ 3P_0
7 N 8 O	2 2	2 2	3 4	— —	— —	— —	— —	— —	$^4S_{3/2}$ 3P_2
9 F 10 Ne	2 2	2 2	5 6	— —	— —	— —	— —	— —	$^2P_{3/2}$ 1S_0
11 Na 12 Mg	2 2	2 2	6 6	1 2	— —	— —	— —	— —	$^2S_{1/2}$ 1S_0
13 Al 14 Si	2 2	2 2	6 6	2 2	1 2	— —	— —	— —	$^2P_{1/2}$ 3P_0
15 P 16 S	2 2	2 2	6 6	2 2	3 4	— —	— —	— —	$^4S_{3/2}$ 3P_2
17 Cl 18 Ar	2 2	2 2	6 6	2 2	5 6	— —	— —	— —	$^2P_{3/2}$ 1S_0
19 K 20 Ca	2 2	2 2	6 6	2 2	6 6	— —	1 2	— —	$^2S_{1/2}$ 1S_0
21 Sc 22 Ti	2 2	2 2	6 6	2 2	6 6	1 2	2 2	— —	$^2D_{3/2}$ 3F_2



Ионизационные потенциалы атомов.

Правила Хунда

1. Минимальной энергией данной электронной конфигурации обладает терм с наибольшим возможным значением спина S и с наибольшим возможным при таком S значении L .

2. При этом квантовое число

$$J = \begin{cases} |L - S|, & \text{если подоболочка заполнена менее, чем наполовину,} \\ L + S & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$



Минимальной энергией обладают конфигурации с наибольшим спином и орбитальным моментом

“Правило” $(n+l)$: Заполнение оболочек происходит в порядке возрастания суммы $(n+l)$, с приоритетом по n

Периодическая таблица Д.И.Менделеева

1 H Водород s ¹ 1.0794																	2 He Гелий s ² 4.002602						
3 Li Литий s ¹ 6.941	4 Be Бериллий s ² 9.012182																	5 B Бор s ² p ¹ 10.811	6 C Углерод s ² p ² 12.0107	7 N Азот s ² p ³ 14.0067	8 O Кислород s ² p ⁴ 15.9994	9 F Фтор s ² p ⁵ 18.9984032	10 Ne Неон s ² p ⁶ 20.1797
11 Na Натрий s ² 2s ² 98976928	12 Mg Магний s ² 24.3050	<u>Переходные металлы</u>																13 Al Алюминий s ² p ¹ 26.9815386	14 Si Кремний s ² p ² 28.0855	15 P Фосфор s ² p ³ 30.973762	16 S Сера s ² p ⁴ 32.065	17 Cl Хлор s ² p ⁵ 35.453	18 Ar Аргон s ² p ⁶ 39.948
19 K Калий s ¹ 39.098	20 Ca Кальций s ² 40.078	21 Sc Скандий s ² d ¹ 44.956	22 Ti Титан s ² d ² 47.867	23 V Ванадий s ² d ³ 50.942	24 Cr Хром s ¹ d ⁵ 51.996	25 Mn Марганец s ² d ⁵ 54.938	26 Fe Железо s ² d ⁶ 55.845	27 Co Кобальт s ² d ⁷ 58.993	28 Ni Никель s ² d ⁸ 58.693	29 Cu Медь s ¹ d ¹⁰ 63.546	30 Zn Цинк s ² d ¹⁰ 65.38	31 Ga Галлий s ² p ¹ 69.723	32 Ge Германий s ² p ² 72.64	33 As Мышьяк s ² p ³ 74.922	34 Se Селен s ² p ⁴ 78.96	35 Br Бром s ² p ⁵ 79.904	36 Kr Криптон s ² p ⁶ 83.798						
37 Rb Рубидий s ¹ 85.468	38 Sr Стронций s ² 87.62	39 Y Иттрий s ² d ¹ 88.906	40 Zr Цирконий s ² d ² 91.224	41 Nb Ниобий s ¹ d ⁴ 92.906	42 Mo Молибден s ¹ d ⁵ 95.96	43 Tc Технеций s ² d ⁵ 97.907	44 Ru Рутений s ¹ d ⁷ 101.07	45 Rh Родий s ¹ d ⁸ 102.91	46 Pd Палладий d ¹⁰ 106.42	47 Ag Серебро s ¹ d ¹⁰ 107.87	48 Cd Кадмий s ² d ¹⁰ 112.41	49 In Индий s ² p ¹ 114.82	50 Sn Олово s ² p ² 118.71	51 Sb Сурьма s ² p ³ 121.76	52 Te Технеций s ² p ⁴ 127.60	53 I Иод s ² p ⁵ 126.90	54 Xe Ксенон s ² p ⁶ 131.29						
55 Cs Цезий s ¹ 132.91	56 Ba Барий s ² 137.33	72 Hf Гафний s ² d ² 178.49	73 Ta Тантал s ² d ³ 180.94	74 W Вольфрам s ² d ⁴ 183.85	75 Re Рений s ² d ⁵ 186.2	76 Os Осий s ¹ d ⁷ 190.2	77 Ir Иридий s ² d ⁷ 192.2	78 Pt Платина s ¹ d ⁹ 195.09	79 Au Золото s ¹ d ¹⁰ 196.96	80 Hg Ртуть s ² d ¹⁰ 200.59	81 Tl Таллий s ² p ¹ 204.37	82 Pb Свинец s ² p ² 207.19	83 Bi Висмут s ² p ³ 208.98	84 Po Полоний s ² p ⁴ 209.98	85 At Астат s ² p ⁵ 209.98	86 Rn Радон s ² p ⁶ 222.01							
87 Fr Франций s ¹ 223.02	88 Ra Радий s ² 226.02	104 Rf Резерфордий s ² d ² d ⁴ 261	105 Db Дубний s ² d ³ d ⁴ 268	106 Sg Сиборгий s ² d ⁴ d ⁴ 271	107 Bh Борий s ² d ⁵ d ⁴ 267	108 Hs Хасой s ² d ⁶ d ⁴ 269	109 Mt Мейтнерий s ² d ⁷ d ⁴ 276	110 Ds Дармштадтий s ¹ d ⁸ d ⁴ 281	111 Rg Рентгений s ¹ d ⁹ d ⁴ 280	112 Cn Коперниций s ² d ¹⁰ d ⁴ 285	113 Uut Унунтрий s ² p ¹ d ¹⁰ d ⁴ 284	114 Uuq Унунквадий s ² p ² d ¹⁰ d ⁴ 289	115 Uup Унунпентий s ² p ³ d ¹⁰ d ⁴ 288	116 Uuh Унунгексий s ² p ⁴ d ¹⁰ d ⁴ 293	117 Uus Унунсептий s ² p ⁵ d ¹⁰ d ⁴ 294	118 Uuo Унунвосьмий s ² p ⁶ d ¹⁰ d ⁴ 294							
119 Uue Унунений s ¹ 316	120 Ubn Унунбиллий s ² 320	57 La Лантан s ² d ¹ 138.91	58 Ce Церий s ² d ² 140.12	59 Pr Прозердий s ² d ³ 140.90	60 Nd Неодим s ² d ⁴ 144.24	61 Pm Прометий s ² d ⁵ 145	62 Sm Самарий s ² d ⁶ 150.35	63 Eu Европий s ² d ⁷ 151.96	64 Gd Гадолиний s ² d ⁸ 157.25	65 Tb Тербий s ² d ⁹ 158.92	66 Dy Диспрозий s ² d ¹⁰ 162.50	67 Ho Гольмий s ² d ¹¹ 164.93	68 Er Эрбий s ² d ¹² 167.26	69 Tm Тулий s ² d ¹³ 168.93	70 Yb Иттербий s ² d ¹⁴ 173.04	71 Lu Лютеций s ² d ¹⁴ 174.97							
		89 Ac Актиний s ² d ¹ 227.02	90 Th Торий s ² d ² 232.03	91 Pa Протактиний s ² d ³ d ¹ 231.03	92 U Уран s ² d ⁴ d ¹ 238.02	93 Np Нептуний s ² d ⁵ d ¹ 237.04	94 Pu Плутоний s ² d ⁶ d ¹ 244.06	95 Am Америций s ² d ⁷ 243.06	96 Cm Кюрий s ² d ⁸ d ¹ 247.07	97 Bk Берклий s ² d ⁹ 247.07	98 Cf Калифорний s ² d ¹⁰ 251.07	99 Es Эйнштейний s ² d ¹¹ 252.08	100 Fm Фермий s ² d ¹² 257.08	101 Md Менделеевий s ² d ¹³ 258.09	102 No Нобелий s ² d ¹⁴ 259.10	103 Lr Лоуренсий s ² d ¹⁴ 260.10							
		121 Ubu Унбундий s ² d ¹ 320	122 Ubb Унбийдий s ² d ² —	123 Ubt Унбитрий s ² d ³ —	124 Ubb Унбиквадий s ² d ⁴ —	125 Ubp Унбипентий s ² d ⁵ 332	126 Ubb Унбигексий s ² d ⁶ 322																

Лантаноиды

Актиноиды