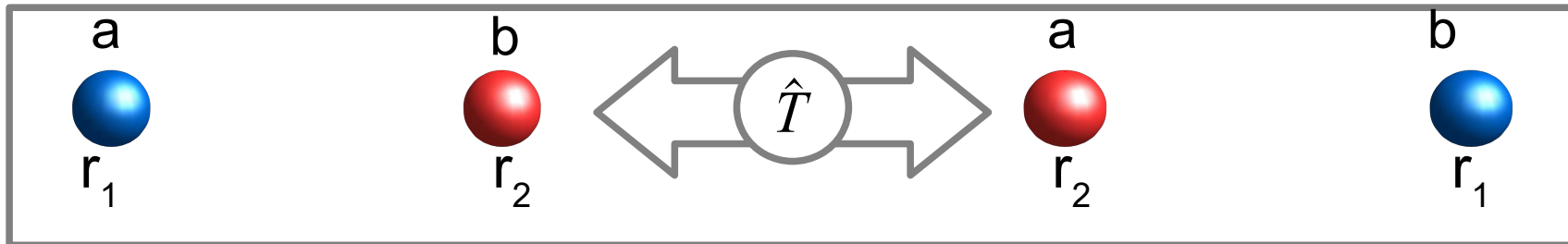


Лекция 8.

1. Неразличимость частиц: последствия
2. Сложный атом. Термы. Правила Хунда.
3. Атом в магнитном поле. g -фактор (множитель Ланде)
4. Оптический эффект Зеемана

Часть 1. Неразличимость частиц: последствия

Неразличимые частицы в одном КВАНТОВОМ СОСТОЯНИИ



$$\Psi_{ab}^{(\pm)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = C \left[\Psi_a(\vec{r}_1) \Psi_b(\vec{r}_2) \pm \Psi_a(\vec{r}_2) \Psi_b(\vec{r}_1) \right]$$

БОЗЕ- частицы	ЧЁТНЫЕ k перестановке	МОГУТ находиться в одном состоянии	$S = 0, 1, 2, \dots$
ФЕРМИ- частицы	НЕЧЁТНЫЕ k перестановке	НЕ МОГУТ находиться в одном состоянии	$S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$

Случай двух фермионов с $S=1/2$

$$\hat{H} = \hat{H}_r + \hat{H}_s$$
$$\hat{H} \Psi = E \Psi$$

$$\Psi_{ab}(x_1, \sigma_1, x_2, \sigma_2) = \xi_{ab}(\sigma_1, \sigma_2) F_{ab}(x_1, x_2)$$

спиновая часть

координатная часть

$$\hat{H} \Psi = (\hat{H}_r F) \xi + (\hat{H}_s \xi) F = (E_r + E_s) \Psi = E \Psi$$

Случай двух фермионов с $S=1/2$

$$\Psi_{ab}(x_1, \sigma_1, x_2, \sigma_2) = \xi_{ab}(\sigma_1, \sigma_2) F_{ab}(x_1, x_2)$$

$$\text{нечетность } \Psi \Leftrightarrow \begin{cases} \xi \text{ четная, } F \text{ нечетная} \\ \xi \text{ нечетная, } F \text{ четная} \end{cases}$$

Сложение моментов:

$$S=1 \quad (S_z = \{-1; 0; 1\})$$

или

$$S=0$$

Случай двух фермионов с $S=1/2$

$$\Psi_{ab}(x_1, \sigma_1, x_2, \sigma_2) = \xi_{ab}(\sigma_1, \sigma_2) F_{ab}(x_1, x_2)$$

$$\text{нечетность } \Psi \Leftrightarrow \begin{cases} \xi \text{ четная, } F \text{ нечетная} \\ \xi \text{ нечетная, } F \text{ четная} \end{cases}$$

Сложение моментов:

$$S=1 \quad (S_z = \{-1; 0; 1\})$$

или

$$S=0$$

$$S=1: \begin{cases} |\uparrow\uparrow\rangle \\ [|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle] / \sqrt{2} \\ |\downarrow\downarrow\rangle \end{cases}$$

$$S=0: [|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle] / \sqrt{2}$$

Вспоминая школьную химию...

... два электрона на p-оболочке



$$l_z = 1$$

$$l_z = 0$$

$$l_z = -1$$

p-оболочка $\leftrightarrow l=1$

Вспоминая школьную ХИМИЮ...

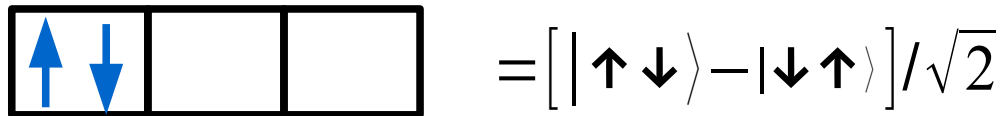
... два электрона на p-оболочке



...если электроны в состояниях с разными l_z есть 4 возможных спиновых состояния ($++$), ($--$), $[(+-)\pm(-+)]$: можно делать четной или нечетной пространственную часть волновой функции «по желанию», подстраиваясь под полный спин электронов

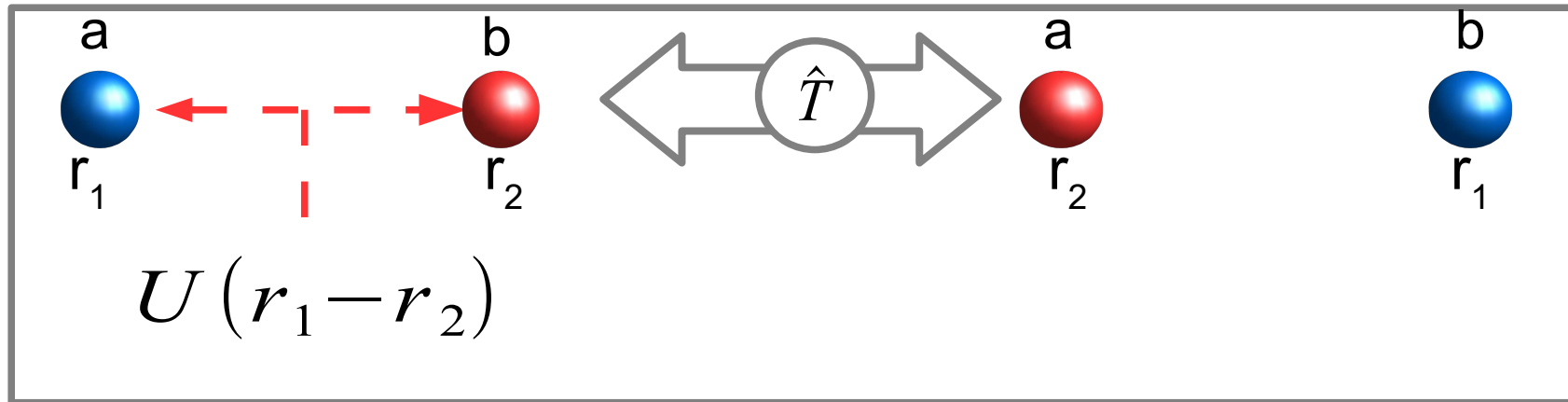
Вспоминая школьную ХИМИЮ...

... два электрона на p-оболочке



возможно поместить два электрона на одну орбиталь атома (в **ОДИНАКОВОЕ** пространственное состояние), но при этом спиновое состояние — *обязательно нечётный по перестановке спиновый синглет $S=0$* .

Тождественность частиц и обменное взаимодействие.



$$\Psi_{ab}^{(\pm)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = C \left[\Psi_a(\vec{r}_1) \Psi_b(\vec{r}_2) \pm \Psi_a(\vec{r}_2) \Psi_b(\vec{r}_1) \right]$$

$$E^{\pm} = \frac{\iint (\Psi_{ab}^{\pm})^* U(x_1, x_2) \Psi_{ab}^{\pm} dx_1 dx_2}{\iint (\Psi_{ab}^{\pm})^* \Psi_{ab}^{\pm} dx_1 dx_2} = A \pm J$$

разная энергия состояний с разной *пространственной* четностью — через запрет Паули связано со спином пары частиц (см. задача 1 к §62 ЛЛ-III)

Обменное взаимодействие. Гамильтониан Гейзенберга.

$$\begin{aligned}\hat{H} &= J \hat{S}_1 \hat{S}_2 = \\ &= \frac{J}{2} \left(\hat{S}_{\text{полн}}^2 - \hat{S}_1^2 - \hat{S}_2^2 \right) = \\ &= \frac{J}{2} \left(S_{\text{полн}} (S_{\text{полн}} + 1) - 2S(S + 1) \right)\end{aligned}$$

$$E(S=1) = \frac{J}{4}$$

$$E(S=0) = -\frac{3J}{4}$$

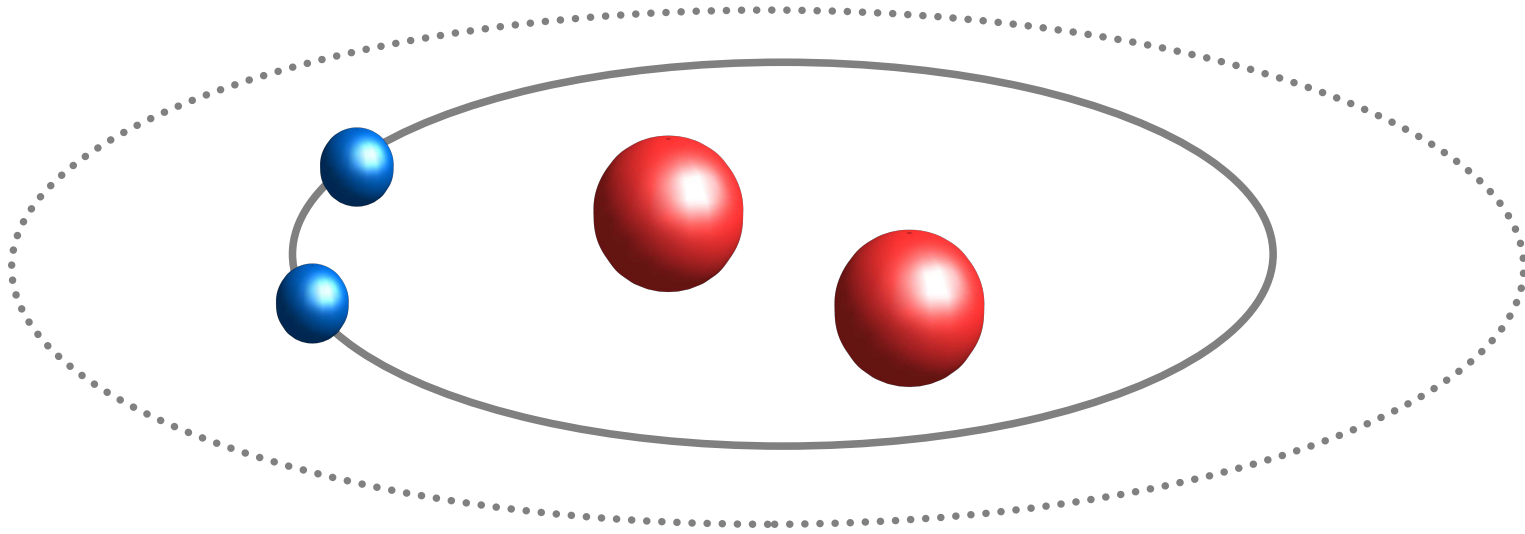
разная энергия состояний с разной *пространственной* четностью — через запрет Паули связано со спином пары частиц

Проявления обменного взаимодействия

$$\hat{H} = J \hat{S}_1 \hat{S}_2 =$$
$$= \frac{J}{2} \left(\hat{S}_{\text{полн}}^2 - \hat{S}_1^2 - \hat{S}_2^2 \right)$$

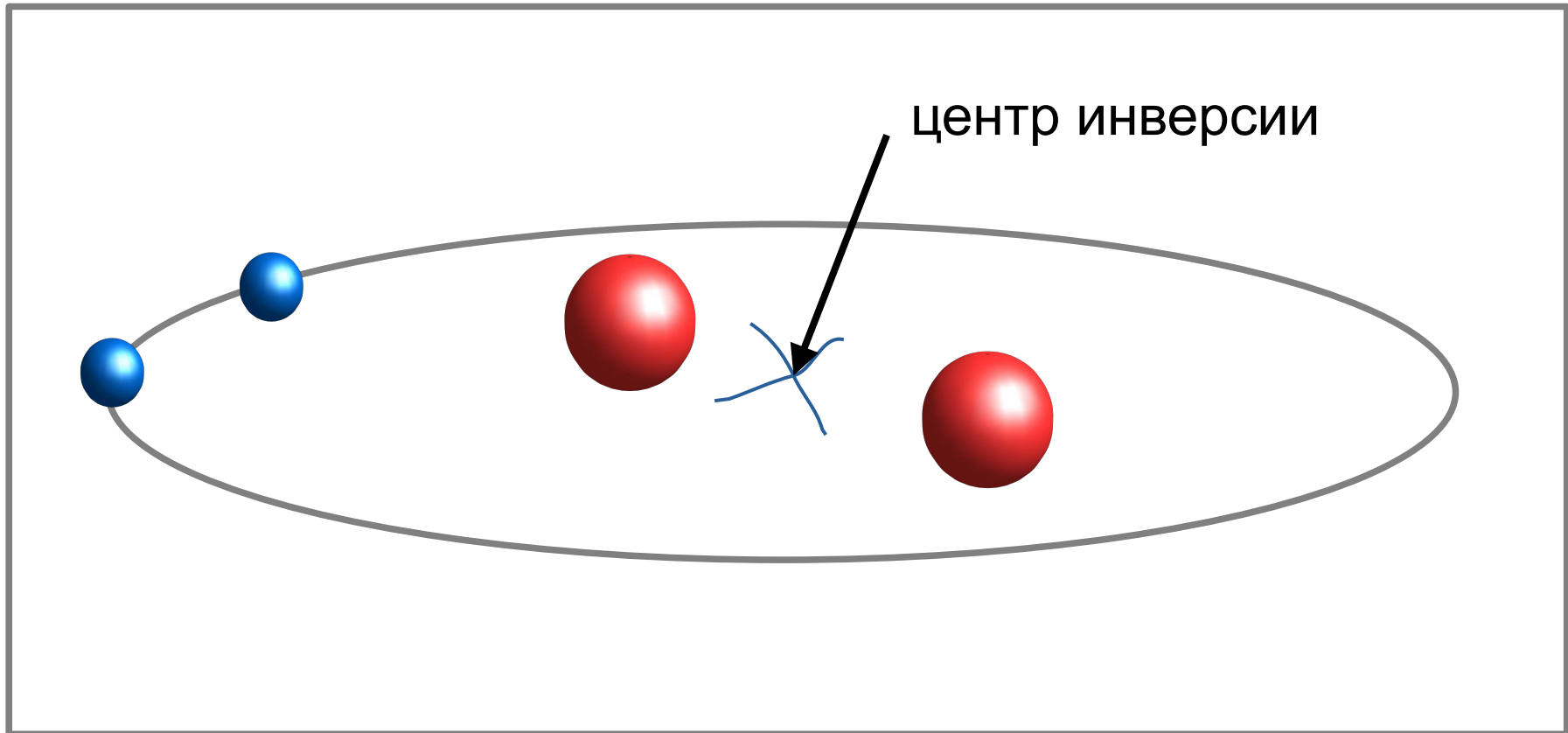
- Выбор полного электронного спина сложных атомов
- Выбор полного спина молекул и атомных кластеров
- Определяет формирование упорядоченных магнитных состояний (в т.ч. «привычный» ферромагнетизм)

Молекула водорода

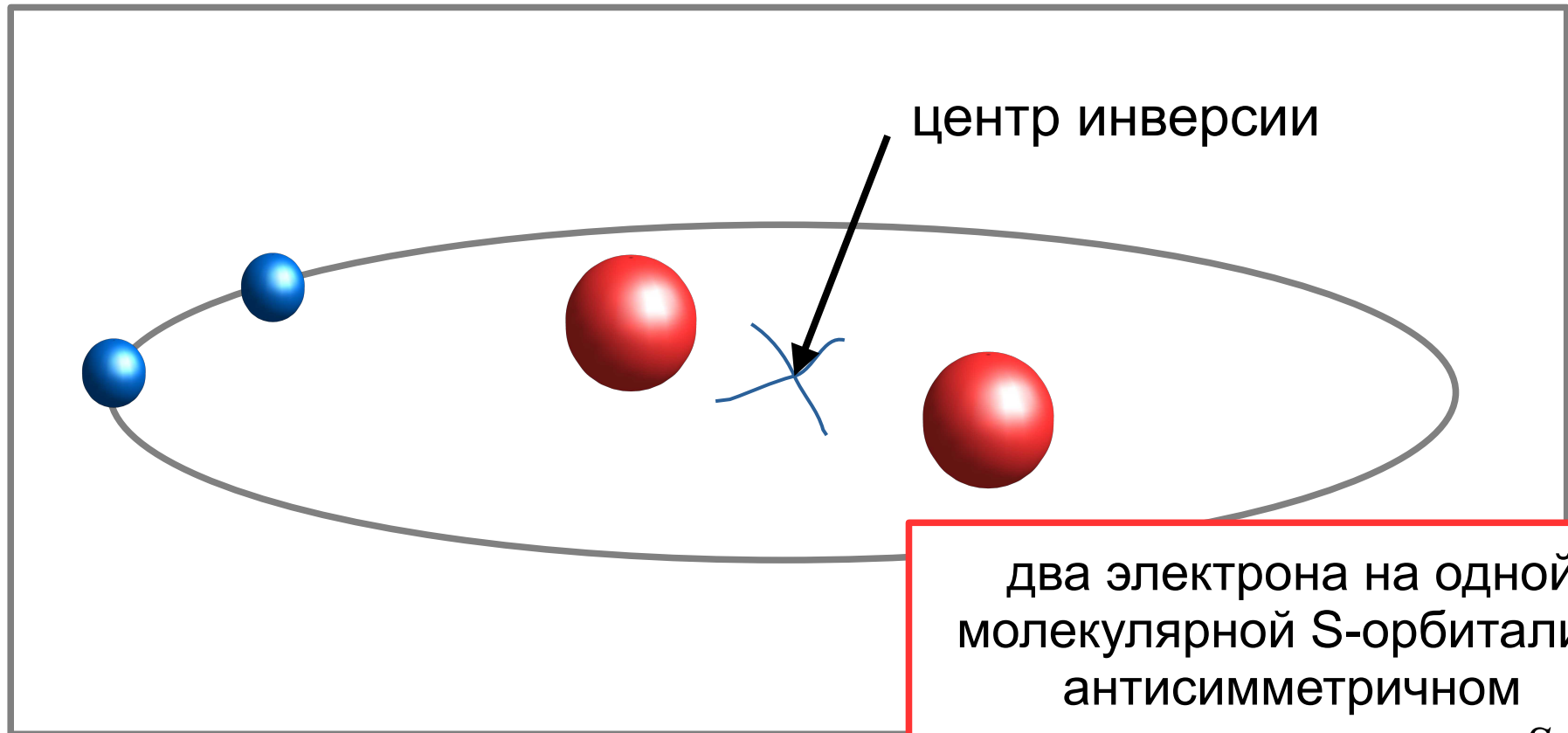


Для водорода не существует второй молекулярной орбитали: молекула может существовать только если два электрона в состоянии $S=0$

Молекула водорода



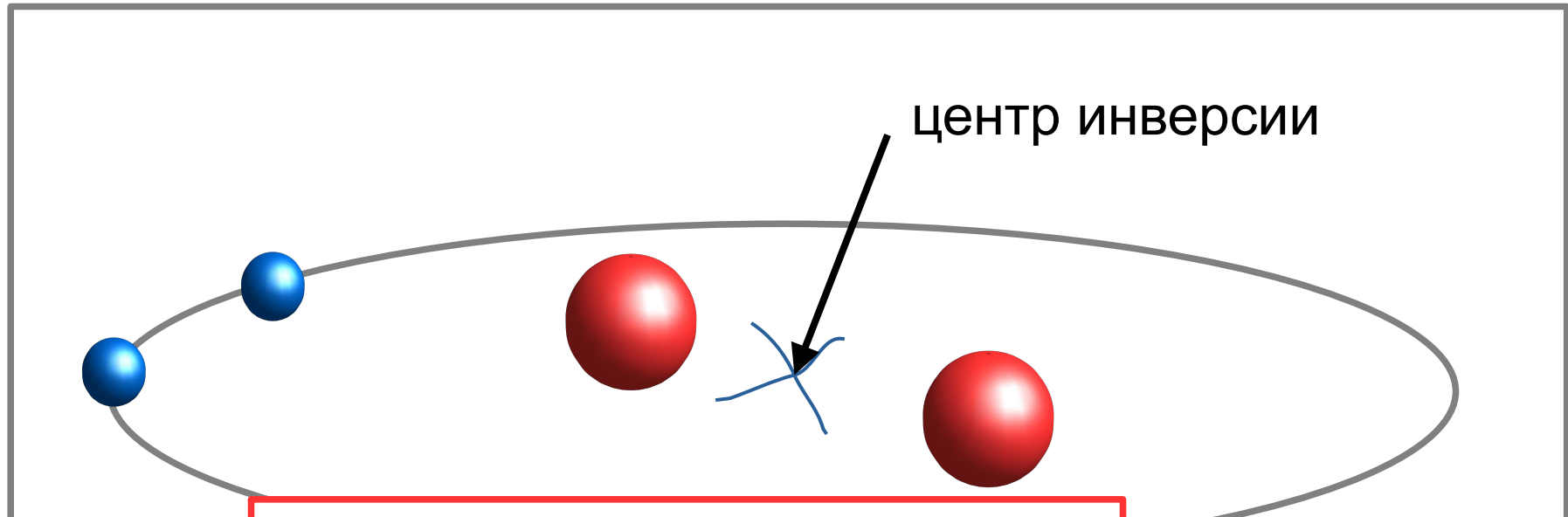
Молекула водорода



два электрона на одной
молекулярной S-орбитали в
антисимметричном
спиновом состоянии с $S=0$

$$S=0: [|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle] / \sqrt{2}$$

Молекула водорода

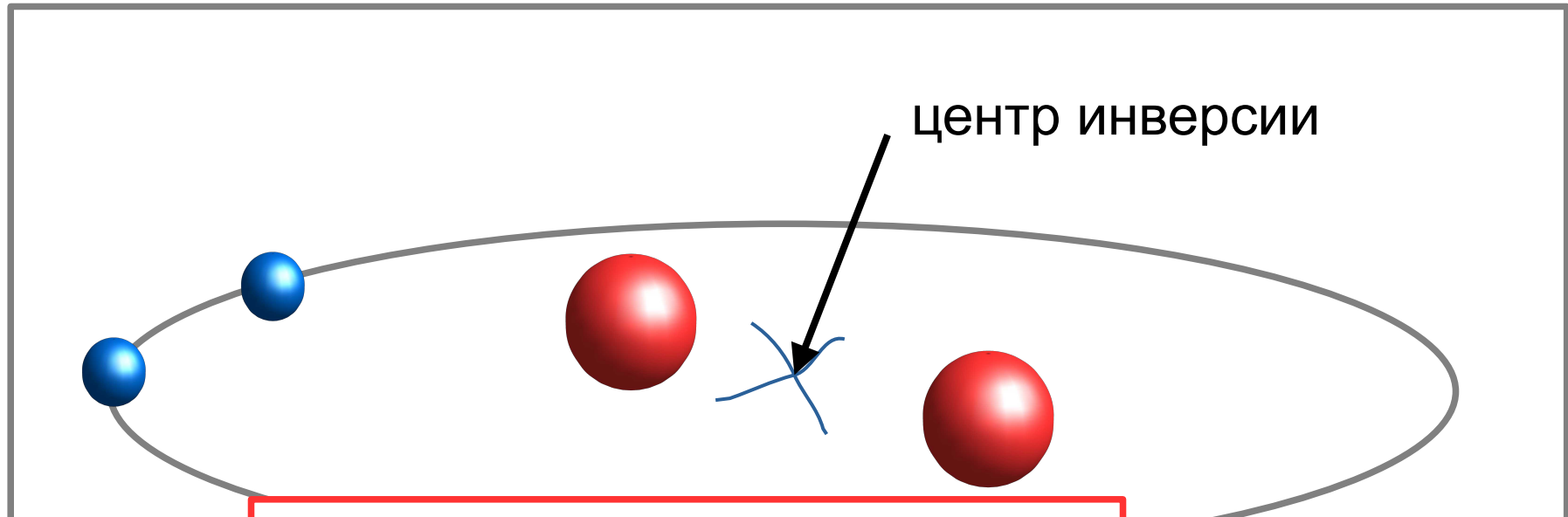


Протоны — тоже фермионы!
В.ф. двух протонов должна
быть антисимметрична по
перестановке.

электрона на одной
сферической S-орбитали в
антисимметричном
состоянии с $S=0$

$$S=0: [|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle] / \sqrt{2}$$

Молекула водорода



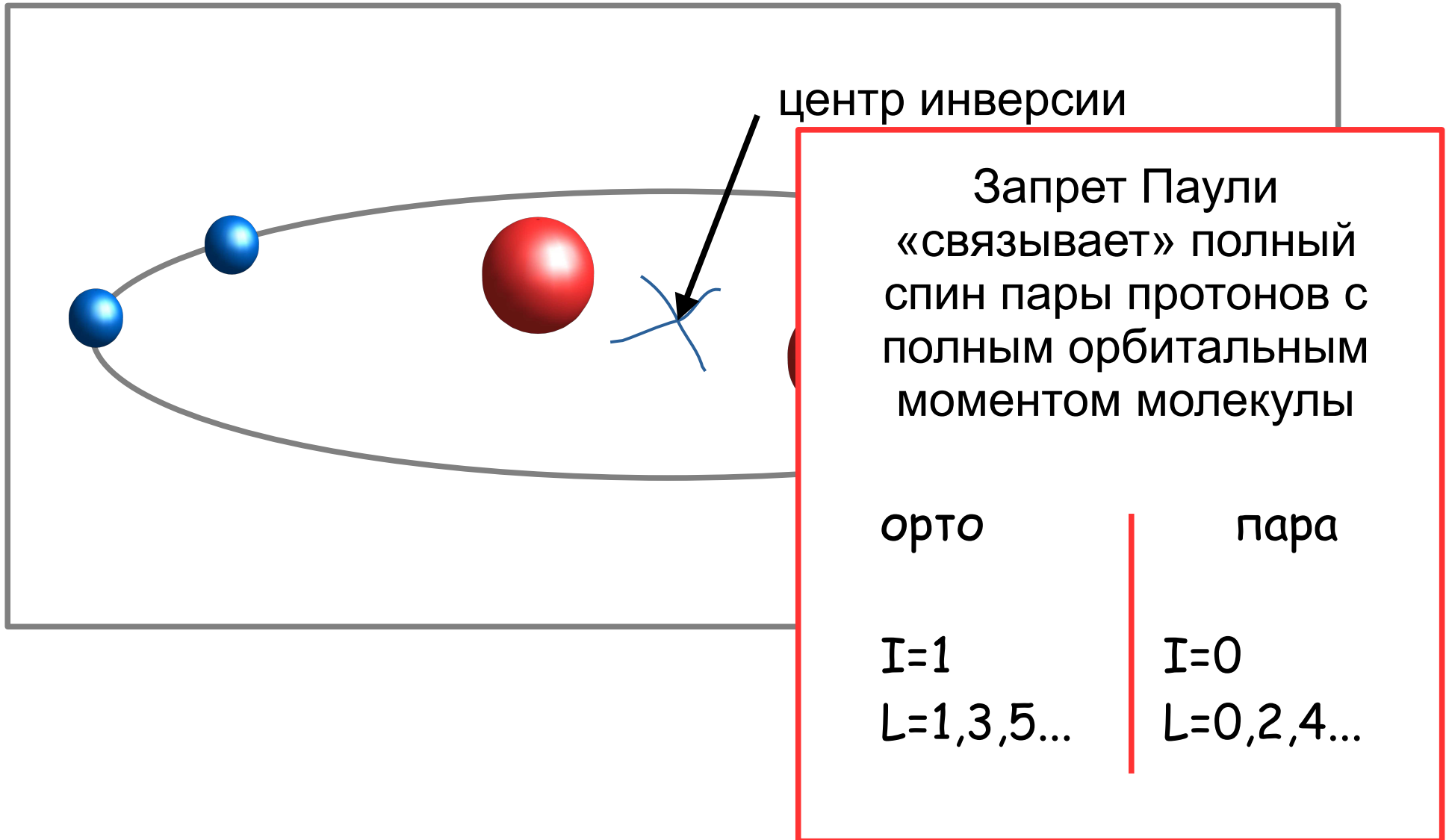
Протоны — тоже фермионы!
В.ф. двух протонов должна
быть антисимметрична по
перестановке.

электрона на одной
сферической S-орбитали в
антисимметричном
состоянии с $S=0$

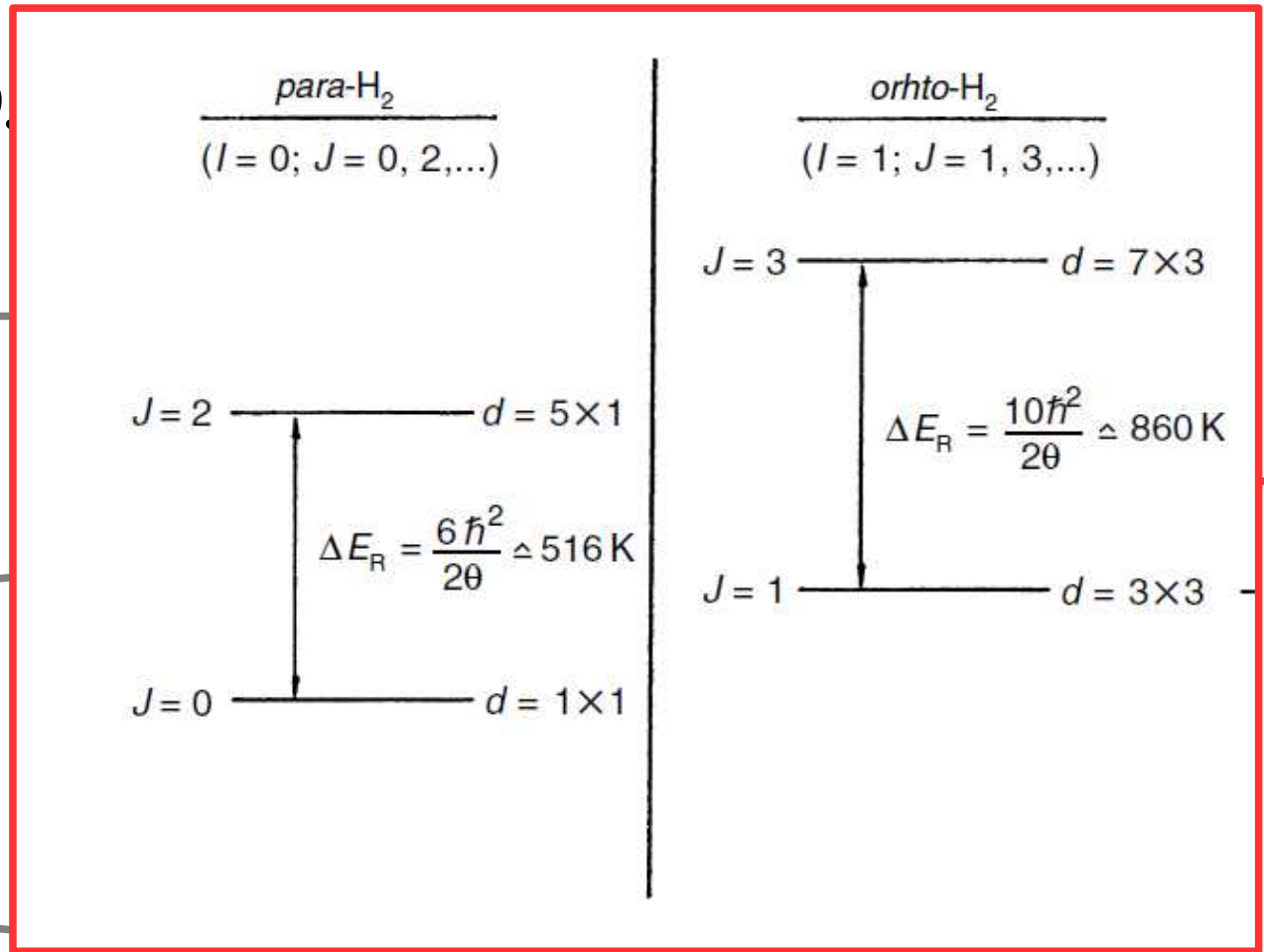
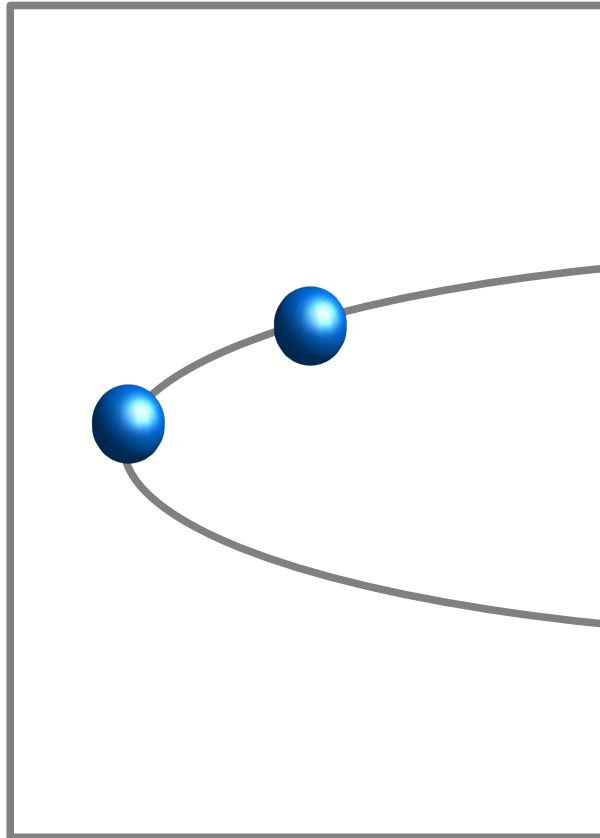
Инверсия отн. ц.м. =
перестановка!
Чётность состояния $(-1)^l$

$$0 : [|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle] / \sqrt{2}$$

Молекула водорода



Мо



орто

пара

$I=1$

$I=0$

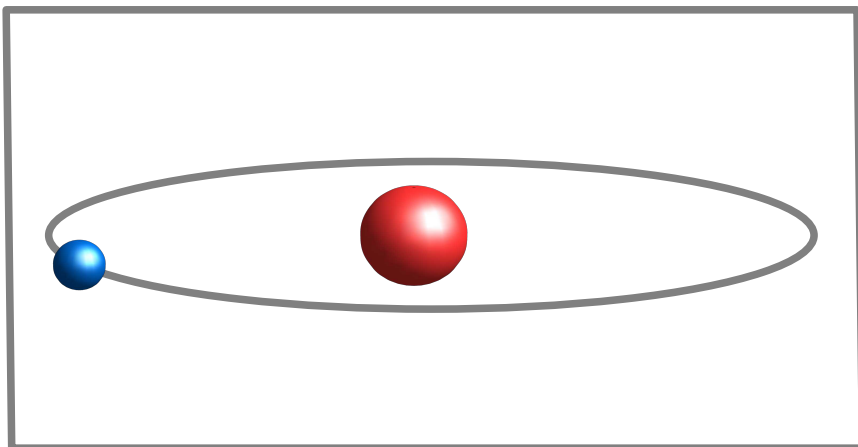
$L=1,3,5\dots$

$L=0,2,4\dots$

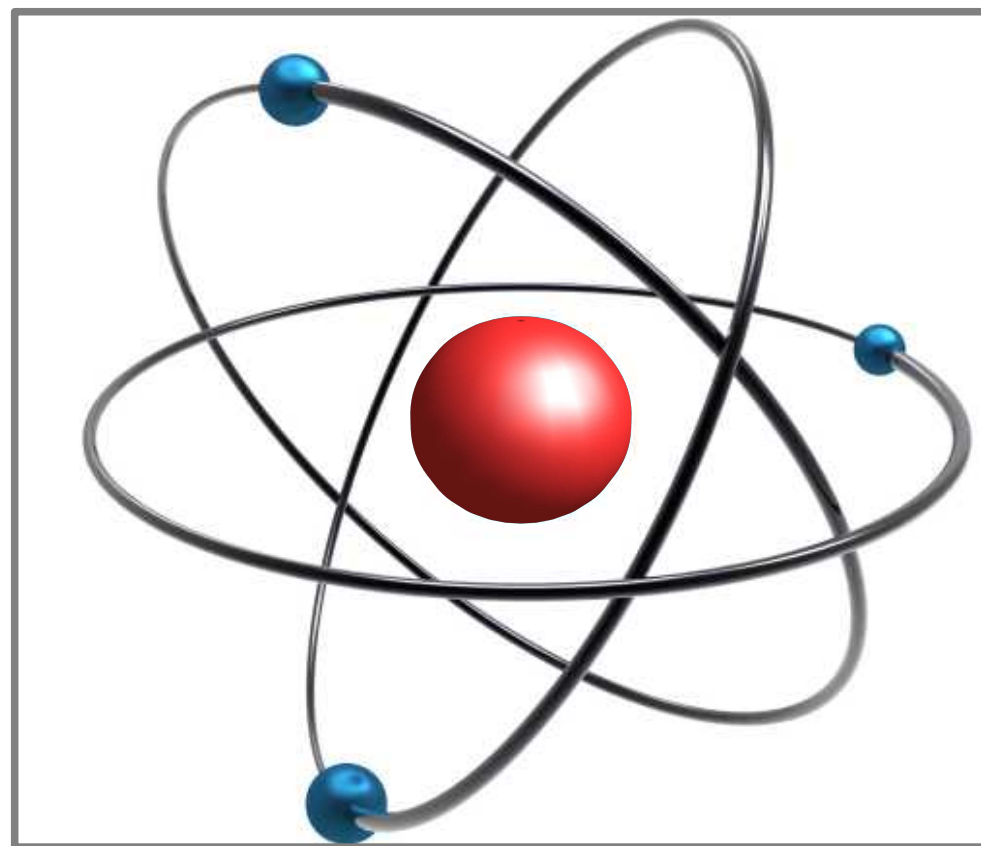
Часть 2. Сложный атом. Термы. Правила Хунда

СЛОЖНЫЙ АТОМ.

атом водорода

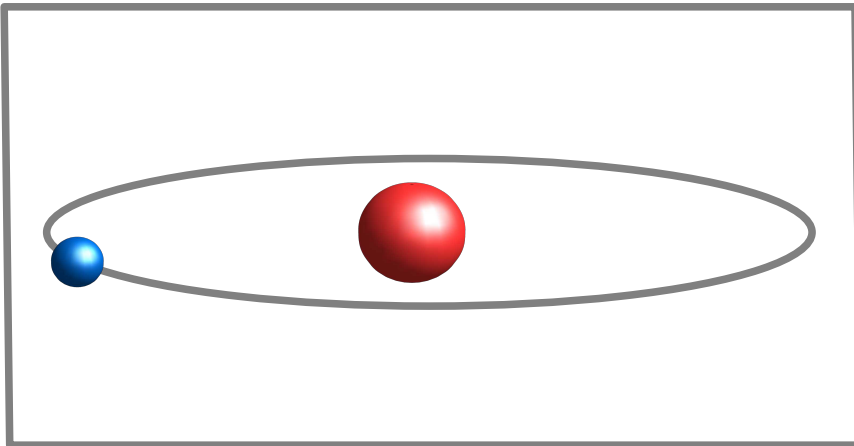


сложный атом

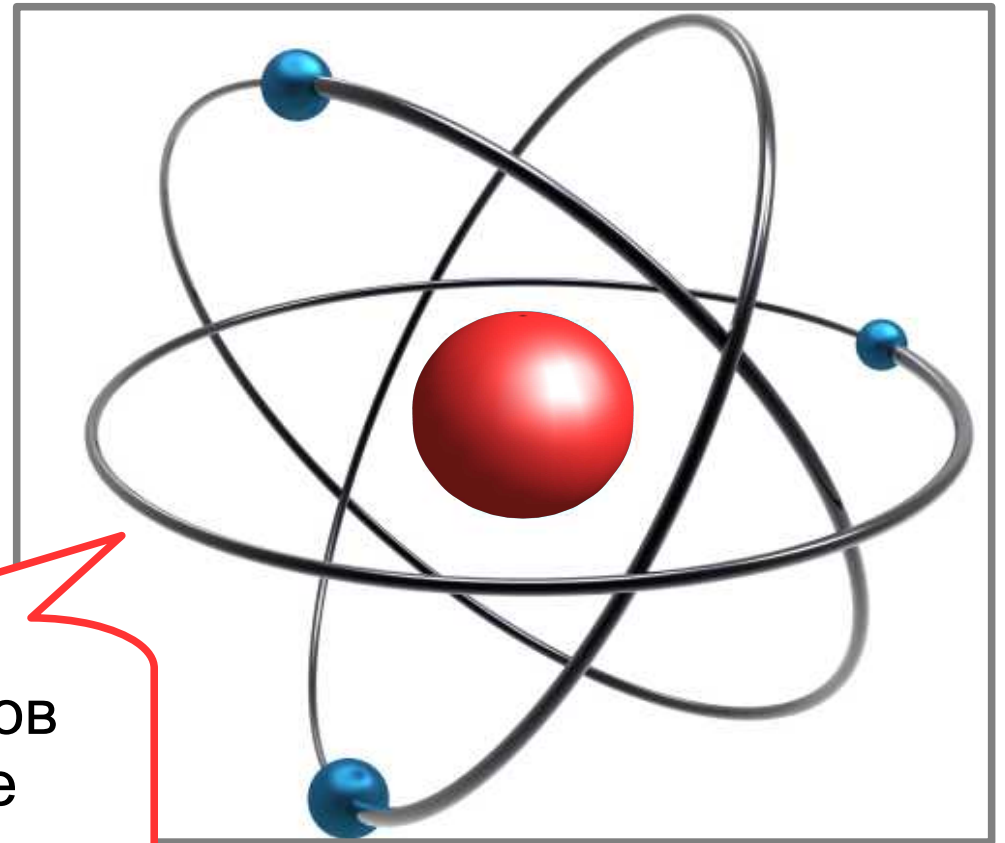


СЛОЖНЫЙ АТОМ.

атом водорода

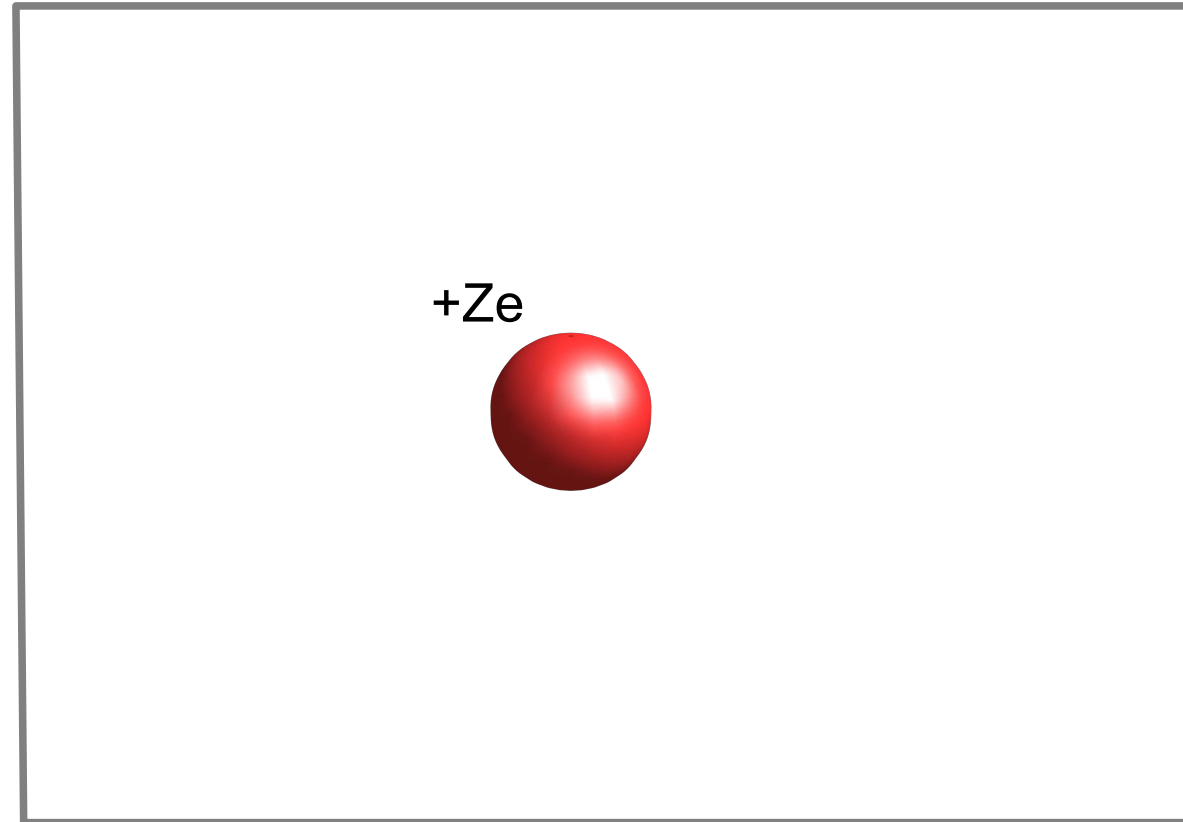
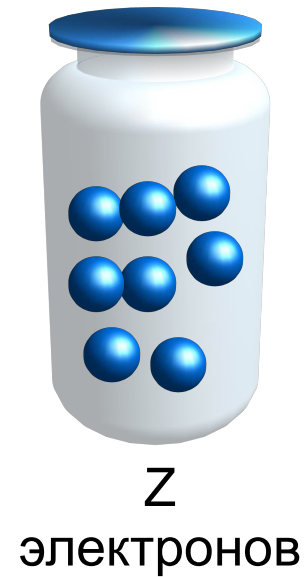


сложный атом



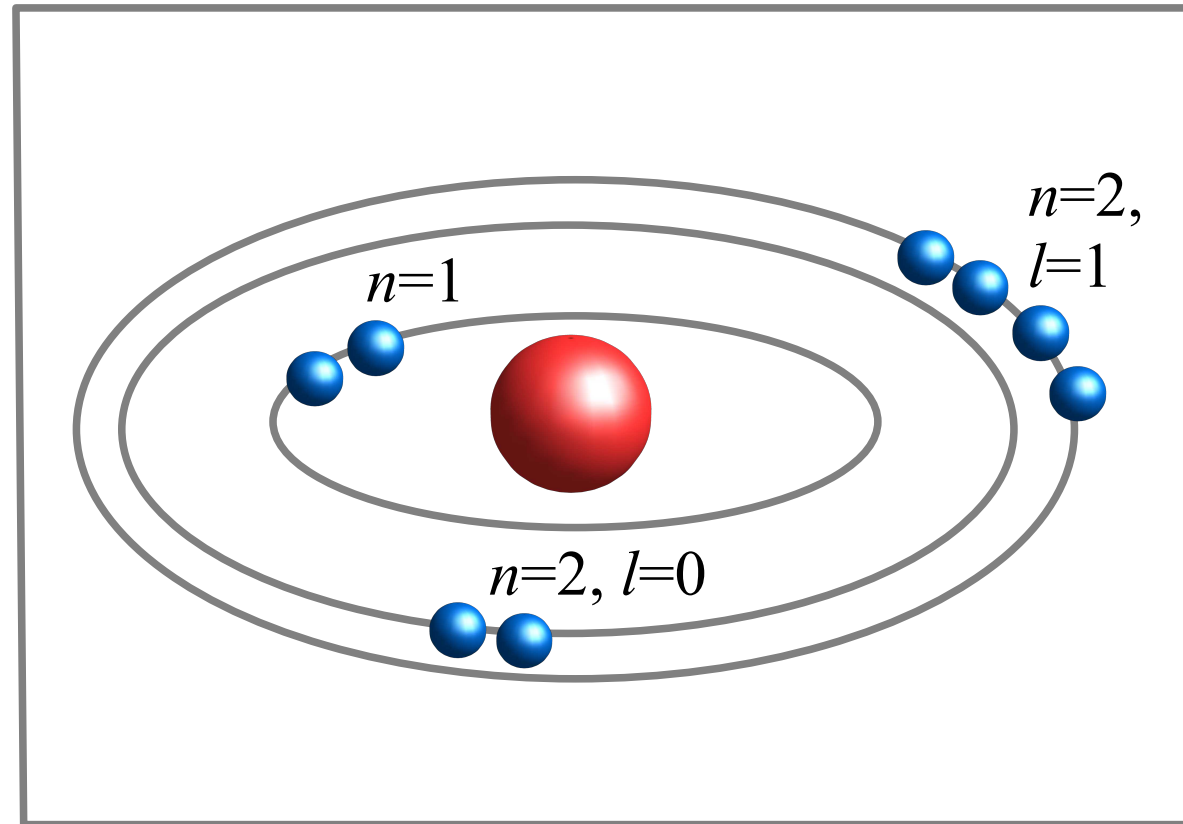
- Много электронов
- Взаимодействие электронов

СЛОЖНЫЙ АТОМ: НАИВНАЯ МОДЕЛЬ



$$E_n = -Z_{\text{эфф}}^2 Ry \frac{1}{n^2}$$

СЛОЖНЫЙ АТОМ: НАИВНАЯ МОДЕЛЬ



$$E_n = -Z_{\text{эфф}}^2 Ry \frac{1}{n^2}$$

Таблица Менделеева

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

периоды	группы элементов																	
	а I б	а II б	а III б	а IV б	а V б	а VI б	а VII б	а VIII б										
1	H водород							He гелий	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> атомный номер U 92 название уран </div>									
2	Li литий	Be бериллий	B бор	C углерод	N азот	O кислород	F фтор	Ne неон										
3	Na натрий	Mg магний	Al алюминий	Si кремний	P фосфор	S сера	Cl хлор	Ar аргон										
4	K калий	Ca кальций	Sc скандий	Ti титан	V ванадий	Cr хром	Mn марганец	Fe железо	Co кобальт	Ni никель								
	Cu медь	Zn цинк	Ga галлий	Ge германий	As мышьяк	Se селен	Br бром	Kr криптон										
5	Rb рубидий	Sr стронций	Y иттрий	Zr цирконий	Nb ниобий	Mo молибден	Tc технеций	Ru рутений	Rh родий	Pd палладий								
	Ag серебро	Cd кадмий	In индий	Sn олово	Sb сурьма	Te теллур	I йод	Xe ксенон										
6	Cs цезий	Ba барий	La* лантан	Hf гафний	Ta тантал	W вольфрам	Re рений	Os осмий	Ir иридий	Pt платина								
	Au золото	Hg ртуть	Tl таллий	Pb свинец	Bi висмут	Po полоний	At астат	Rn радон										
7	Fr франций	Ra радий	Ac* актиний	Ku курчатовий	Ns нильсборий													
* ЛАНТАНОИДЫ																		
Ce церий	Pr празеодим	Nd неодим	Pm прометий	Sm самарий	Eu европий	Gd гадолиний	Tb тербий	Dy диспрозий	Ho гольмий	Er эрбий	Tm тулий	Yb иттербий	Lu лютеций					
* АКТИНОИДЫ																		
Th торий	Pa протактиний	U уран	Np нептуний	Pu плутоний	Am амерций	Cm кюрий	Bk берклий	Cf калифорний	Es эйнштейний	Fm фермий	Md менделевий	No нобелий	Lr лоуренсий					
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: red; margin-right: 5px;"></div> - s - элементы </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: orange; margin-right: 5px;"></div> - p - элементы </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> - d - элементы </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: black; margin-right: 5px;"></div> - f - элементы </div> </div>																		

Таблица Менделеева

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

периоды	группы элементов																	
	а I б	а II б	а III б	а IV б	а V б	а VI б	а VII б	а VIII б	а VIII б	а VIII б	а VIII б	а VIII б	а VIII б	а VIII б	а VIII б	а VIII б	а VIII б	а VIII б
1	H водород							He гелий	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> атомный номер <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> U 92 </div> название </div>									
2	Li литий	Be бериллий	B бор	C углерод	N азот	O кислород	F фтор	Ne неон										
3	Na натрий	Mg магний	Al алюминий	Si кремний	P фосфор	S сера	Cl хлор	Ar аргон										
4	K калий	Ca кальций	Sc скандий	Ti титан	V ванадий	Cr хром	Mn марганец	Fe железо	Co кобальт	Ni никель								
	Cu медь	Zn цинк	Ga галлий	Ge германий	As мышьяк	Se селен	Br бром	Kr криптон										
	Rb рубидий	Sr стронций	Y иттрий	Zr цирконий	Nb ниобий	Mo молибден	Tc технеций	Ru рутений	Rh родий	Pd палладий								
	Ag серебро	Cd кадмий	In индий	Sn олово	Sb сурьма	Te телур	I йод	Xe ксенон										
6	Cs цезий	Ba барий	La* лантан	Hf гафний	Ta тантал	W вольфрам	Re рений	Os осмий	Ir иридий	Pt платина								
	Au золото	Hg ртуть	Tl таллий	Pb свинец	Bi висмут	Po полоний	At астат	Rn радон										
7	Fr франций	Ra радий	Ac* актиний	Ku курчатовий	Ns нильсборий													
	* ЛАНТАНОИДЫ																	
	Ce церий	Pr празеодим	Nd неодим	Pm прометий	Sm самарий	Eu европий	Gd гадолиний	Tb тербий	Dy диспрозий	Ho гольмий	Er эрбий	Tm тулий	Yb иттербий	Lu лютеций				
	* АКТИНОИДЫ																	
	Th торий	Pa протактиний	U уран	Np нептуний	Pu плутоний	Am амерций	Cm кюрий	Bk берклий	Cf калифорний	Es эйнштейний	Fm фермий	Md менделевий	No нобелий	Lr лоуренсий				
	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: red; border: 1px solid black;"></div> - s - элементы <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: orange; border: 1px solid black;"></div> - p - элементы <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: blue; border: 1px solid black;"></div> - d - элементы <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: black; border: 1px solid black;"></div> - f - элементы </div>																	

2

2 & 6

2 & 6 & 10

14

Таблица Менделеева

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

периоды	группы элементов															
	а I б	а II б	а III б	а IV б	а V б	а VI б	а VII б	а VIII б								
1	H водород							He гелий								
2	Li литий	Be бериллий	B бор	C углерод	N азот	O кислород	F фтор	Ne неон								
3	Na натрий	Mg магний	Al алюминий	Si кремний	P фосфор	S сера	Cl хлор	Ar аргон								
4	K калий	Ca кальций	Sc скандий	Ti титан	V ванадий	Cr хром	Mn марганец	Fe железо	Co кобальт	Ni никель						
	Cu медь	Zn цинк	Ga галлий	Ge германий	As мышьяк	Se селен	Br бром	Kr криптон								
5	<p>Правило Маделунга-Клечковского: Оболочки заполняются в порядке роста $(n+l)$, при равных $(n+l)$ первыми заполняются уровни с меньшим n</p>															
6	Au золото	Hg ртуть	Tl таллий	Pb свинец	Bi висмут	Po полоний	At астат	Rn радон								
7	Fr франций	Ra радий														
	Ce церий	Pr празеодим	Nd неодим													
	Th торий	Pa протактиний	U уран													
	<p>$1s < 2s < 2p < 3s < 3p < 4s < 3d < 4p < 5s < 4d < 5p < 6s < 4f \approx 5d < 6p < 7s < 5f \approx 6d < 7p < 8s$</p>															
	<p>■ - s-элементы ■ - p-элементы ■ - d-элементы ■ - f-элементы</p>															



Таблица Менделеева

Реальность:



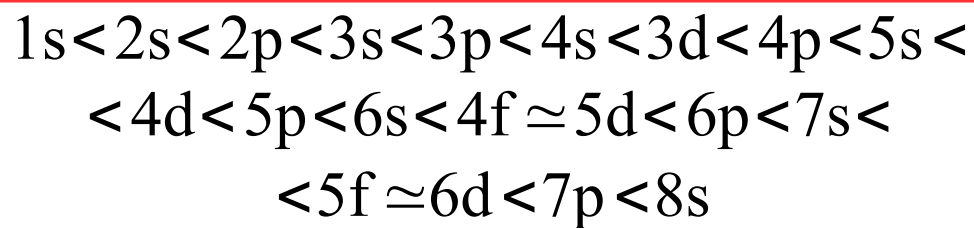
ТАБЛИЦА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

группы элементов

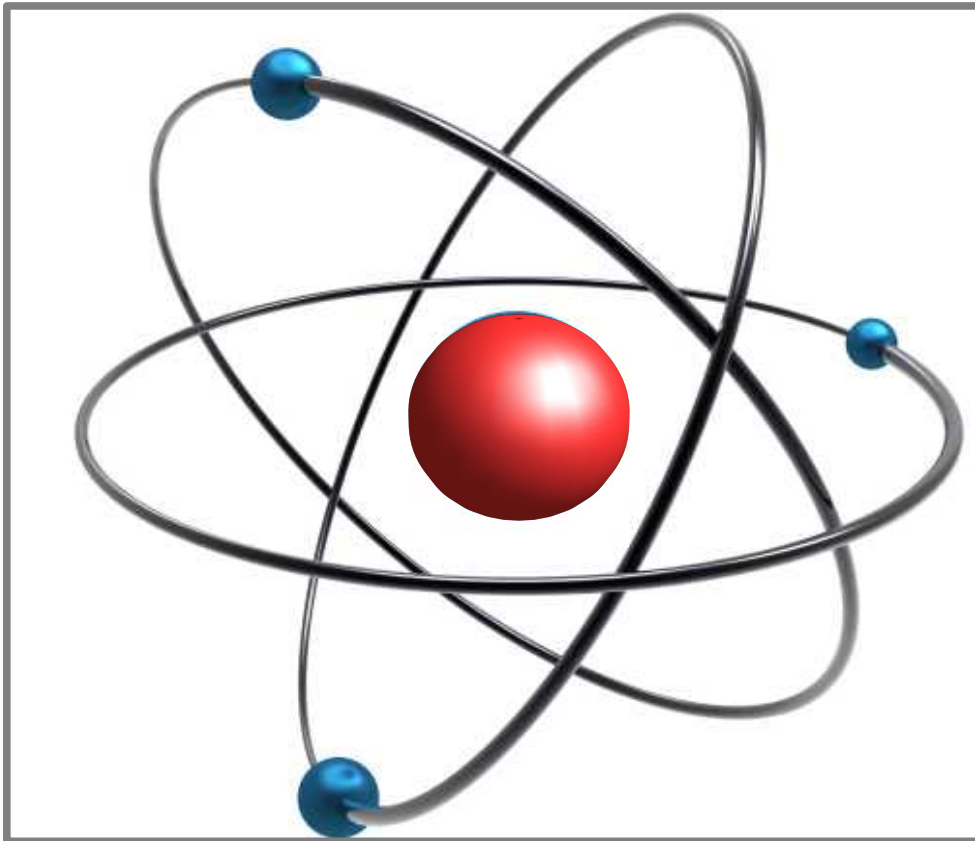
a IV б		a V б		a VI б		a VII б		a VIII б		a VIII б		b	
						1	2	3	4	5	6	7	8
						Н	He						
						водород	гелий						
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
С	N	O	F	Ne									
углерод	азот	кислород	фтор	неон									
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Si	P	S	Cl	Ar									
кремний	фосфор	сера	хлор	аргон									
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni							
титан	ванадий	хром	марганец	железо	кобальт	никель							
32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Ge	As	Se	Br	Kr									
германий	мышьяк	селен	бром	криптон									

Правило Маделунга-Клечковского:

Оболочки заполняются в порядке роста $(n+l)$, при равных $(n+l)$ первыми заполняются уровни с меньшим n



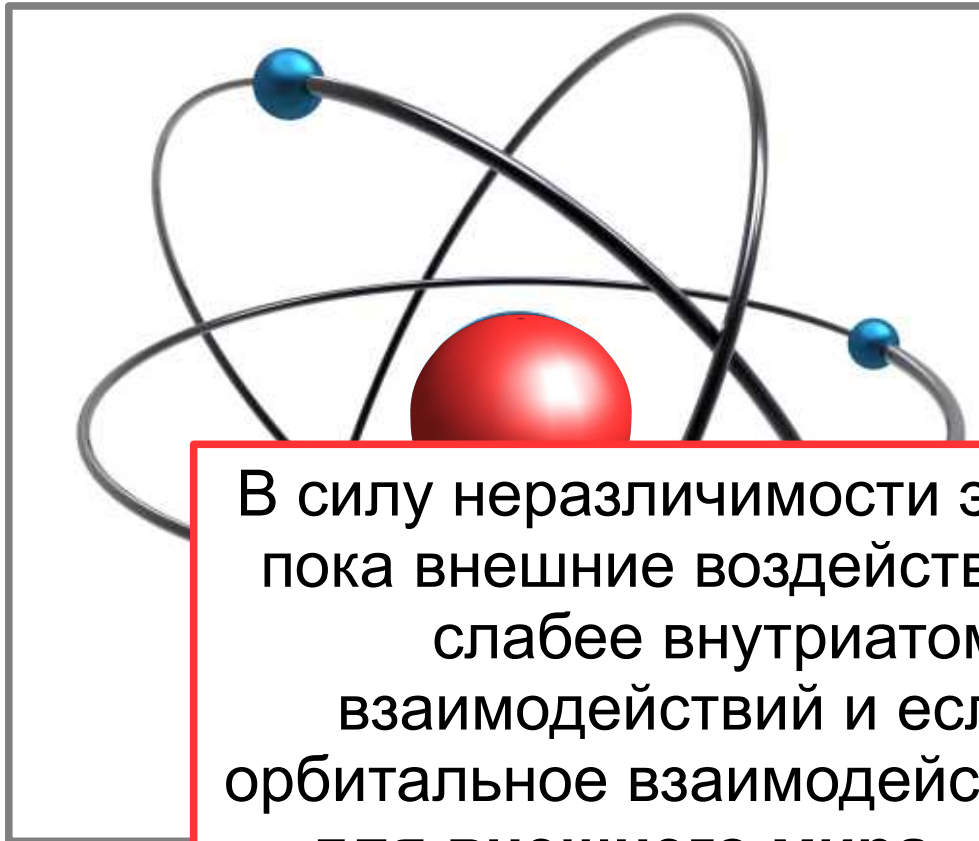
Термы сложного атома.



- Много электронов
- Взаимодействие электронов

Будет некоторое заполнение доступных электронных состояний.
В большинстве случаев такое состояние *заметно* выгоднее.

Сложный атом. Термы.



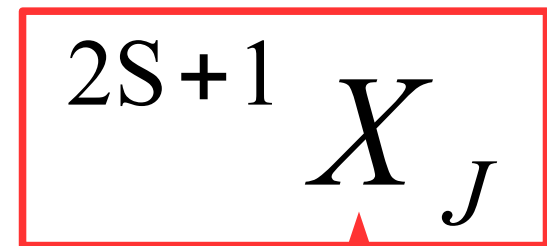
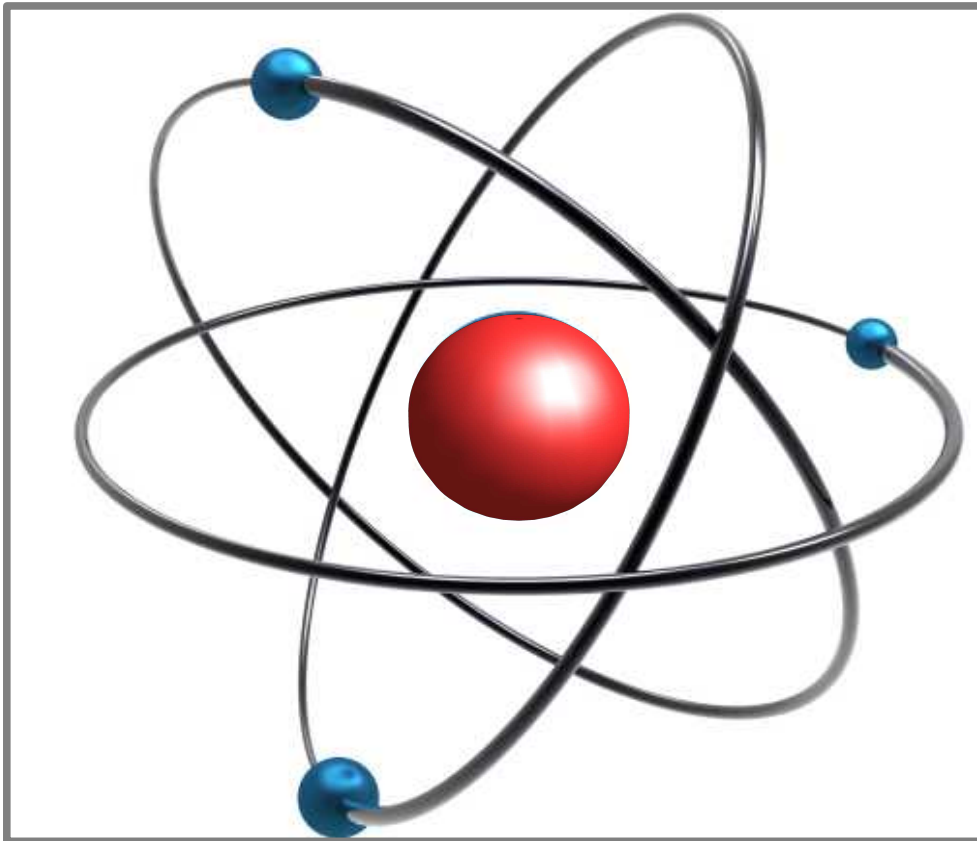
- Много электронов
- Взаимодействие электронов

В силу неразличимости электронов, пока внешние воздействия сильно слабее внутриатомных взаимодействий и если спин-орбитальное взаимодействие слабо «для внешнего мира» свойства атома описываются его **ПОЛНЫМИ L, S, J**

Будет некоторое количество доступных электронных состояний.

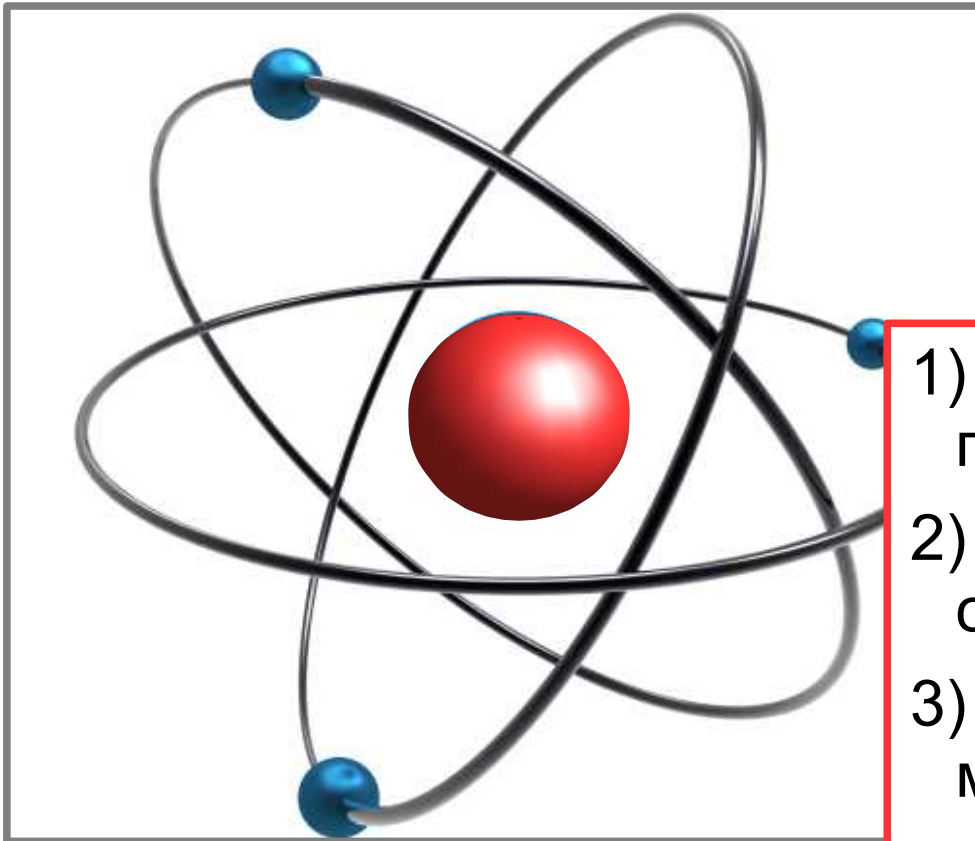
**ТЕРМ
АТОМА**

Сложный атом. Термы.



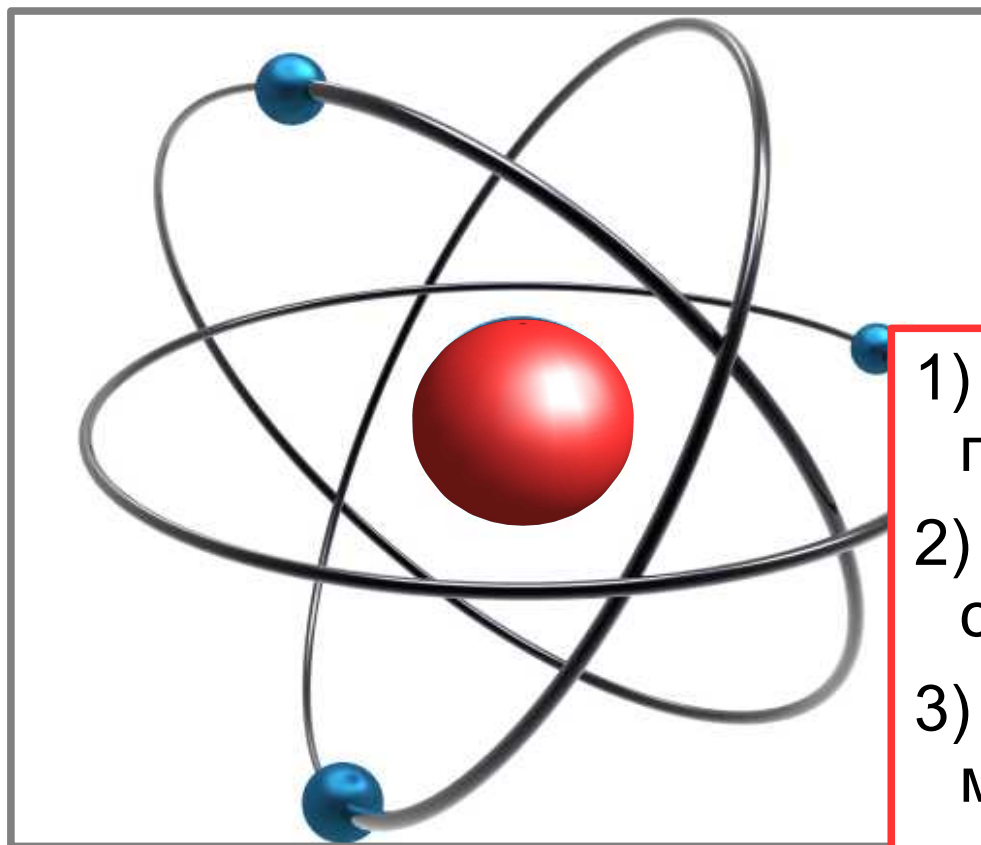
S,P,D,F,G,H...

Правила Хунда



- 1) Максимально возможный полный спин S
- 2) Для данного полного спина — максимальное L
- 3) Если оболочка заполнена менее чем на половину
 $J=|L-S|$, если более чем на половину $J=L+S$

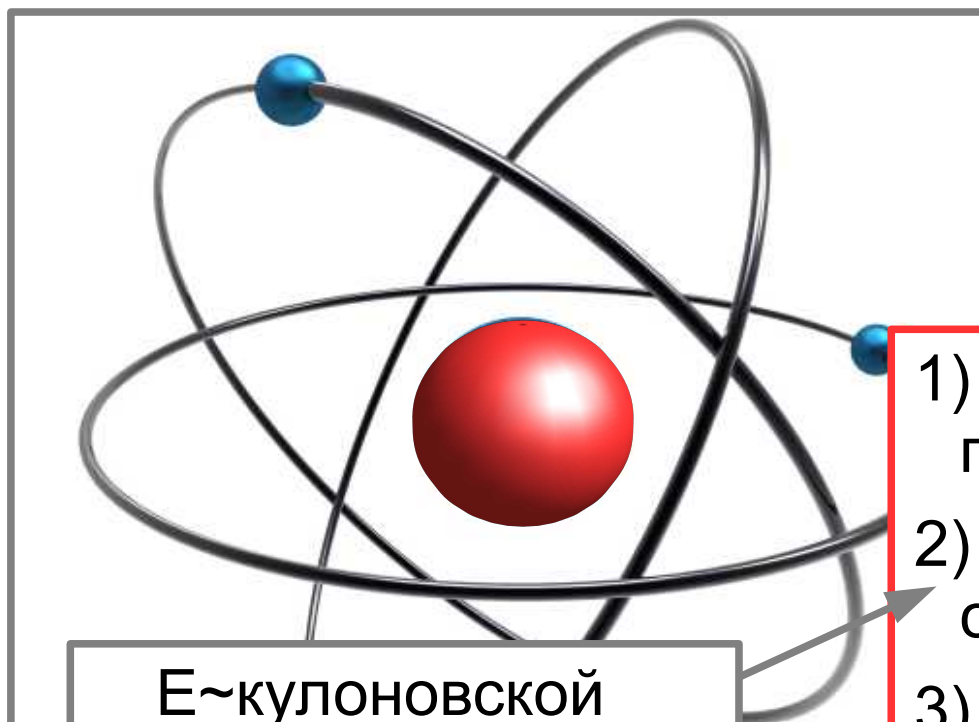
Правила Хунда



$E \sim$ кулоновской!
Обменное взаимодействие
«предпочитает»
параллельную ориентацию
спинов

- 1) Максимально возможный полный спин S
- 2) Для данного полного спина — максимальное L
- 3) Если оболочка заполнена менее чем на половину
 $J = |L - S|$, если более чем на половину $J = L + S$

Правила Хунда

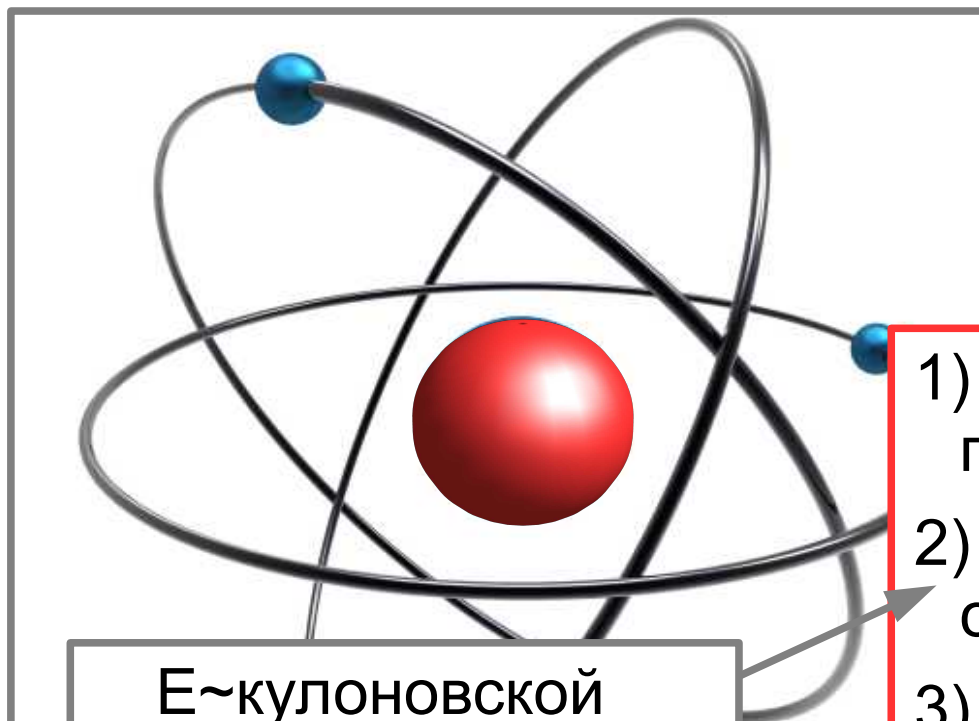


$E \sim$ кулоновской
«вращение» в одном
направлении
минимизирует энергию
отталкивания

$E \sim$ кулоновской!
Обменное взаимодействие
«предпочитает»
параллельную ориентацию
спинов

- 1) Максимально возможный полный спин S
- 2) Для данного полного спина — максимальное L
- 3) Если оболочка заполнена менее чем на половину
 $J = |L - S|$, если более чем на половину $J = L + S$

Правила Хунда



$E \sim$ кулоновской!
Обменное взаимодействие
«предпочитает»
параллельную ориентацию
спинов

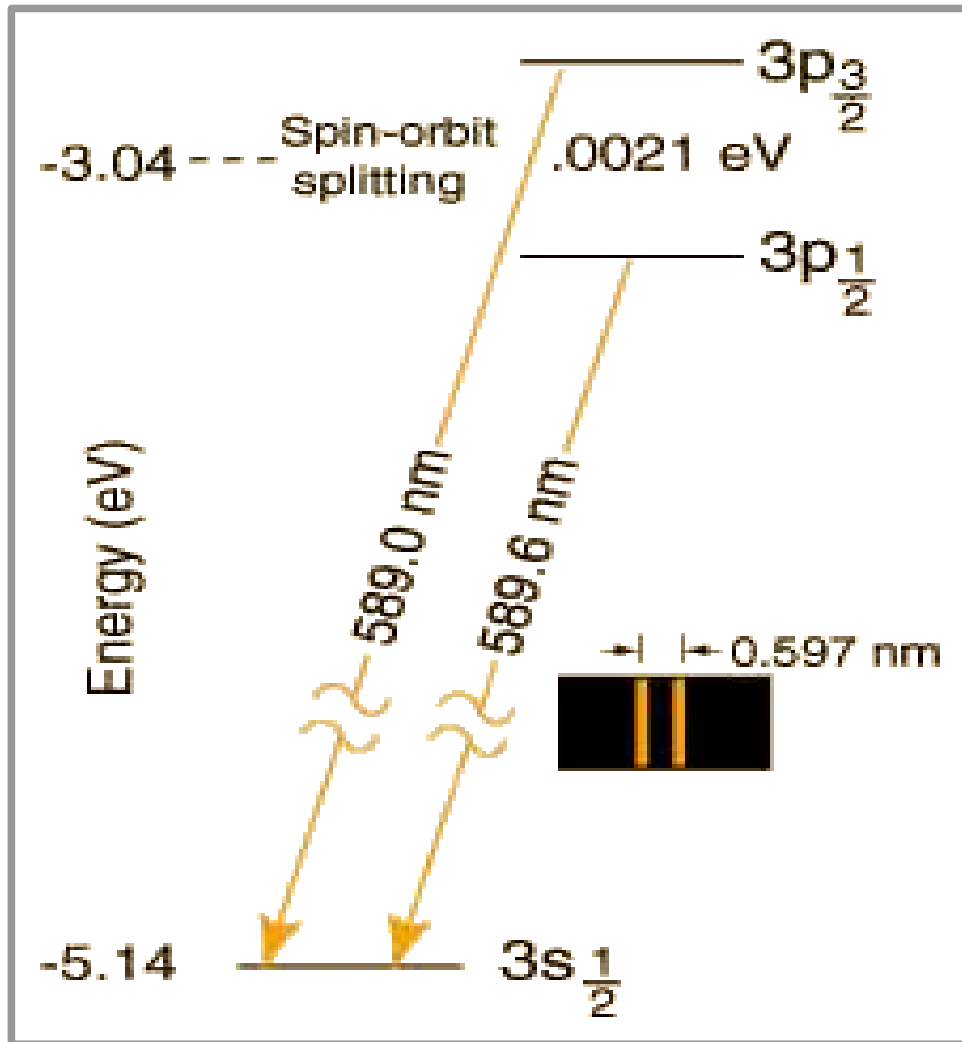
$E \sim$ кулоновской
«вращение» в одном
направлении
минимизирует энергию

$E \sim$ спин-орбит., α^2
«Эффект барона Мюнхаузена» +
дуализм электронов и «дырок»

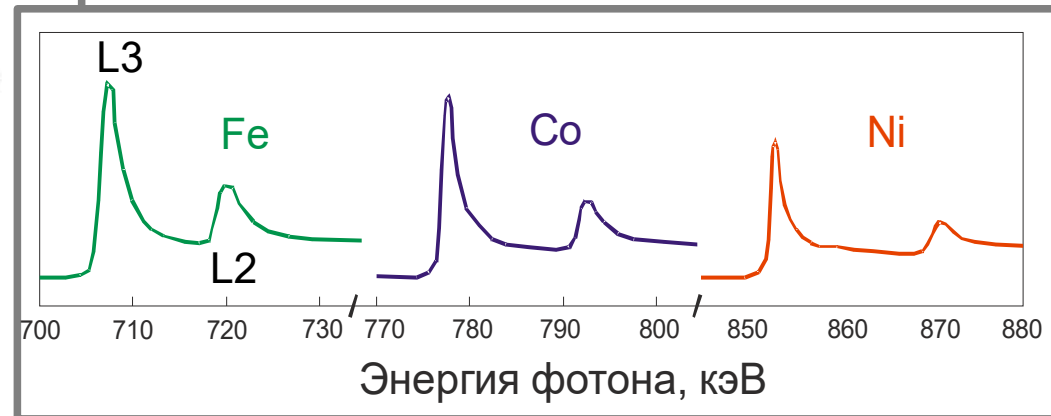
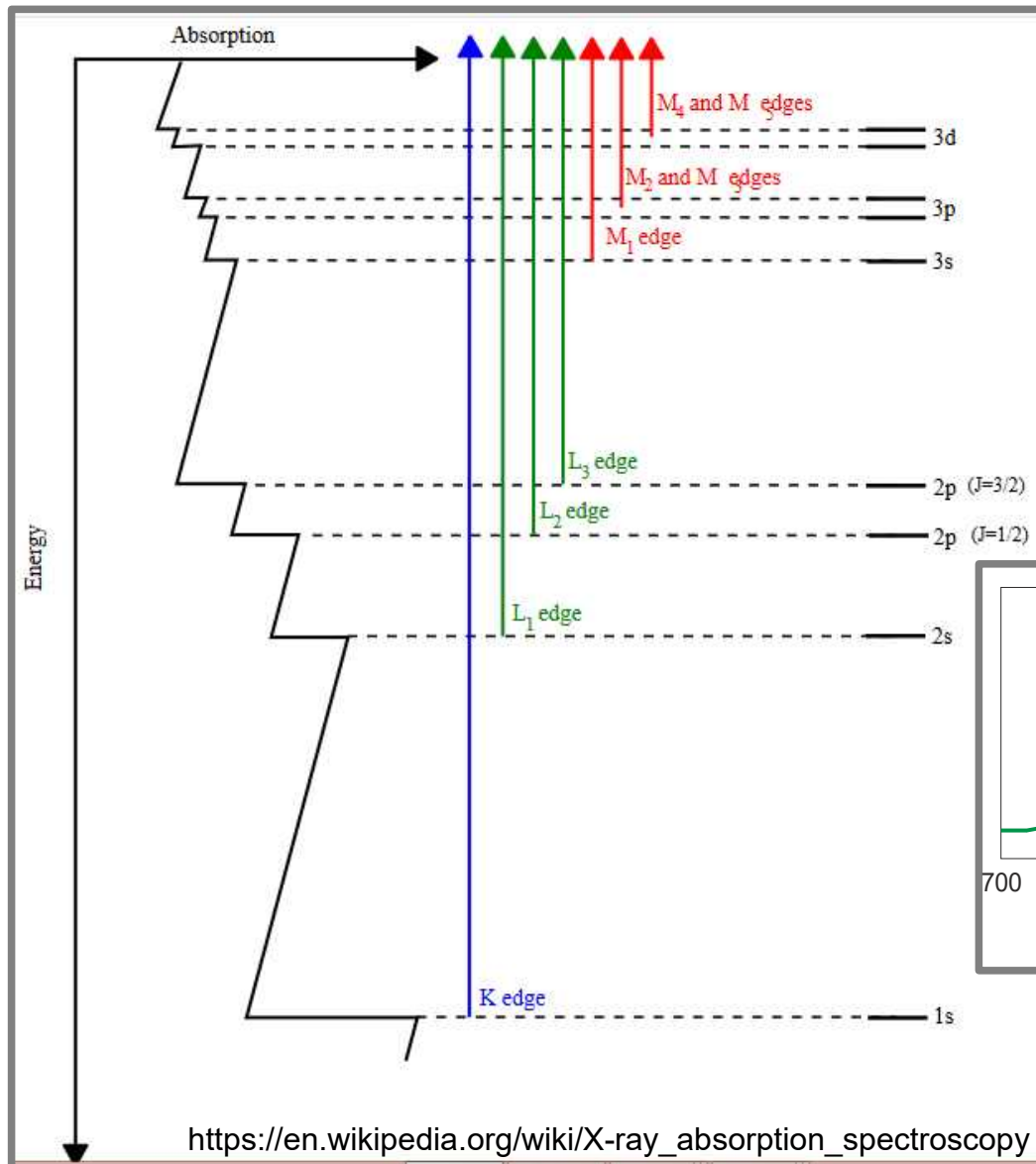
- 1) Максимально возможный полный спин S
- 2) Для данного полного спина — максимальное L
- 3) Если оболочка заполнена менее чем на половину
 $J = |L - S|$, если более чем на половину $J = L + S$

Часть 3. Тонкая структура термов сложных атомов. Спин-орбитальное взаимодействие.

Пример 1. Желтый дублет натрия



Пример 2. Внутренние оболочки сложных атомов. «Край поглощения»

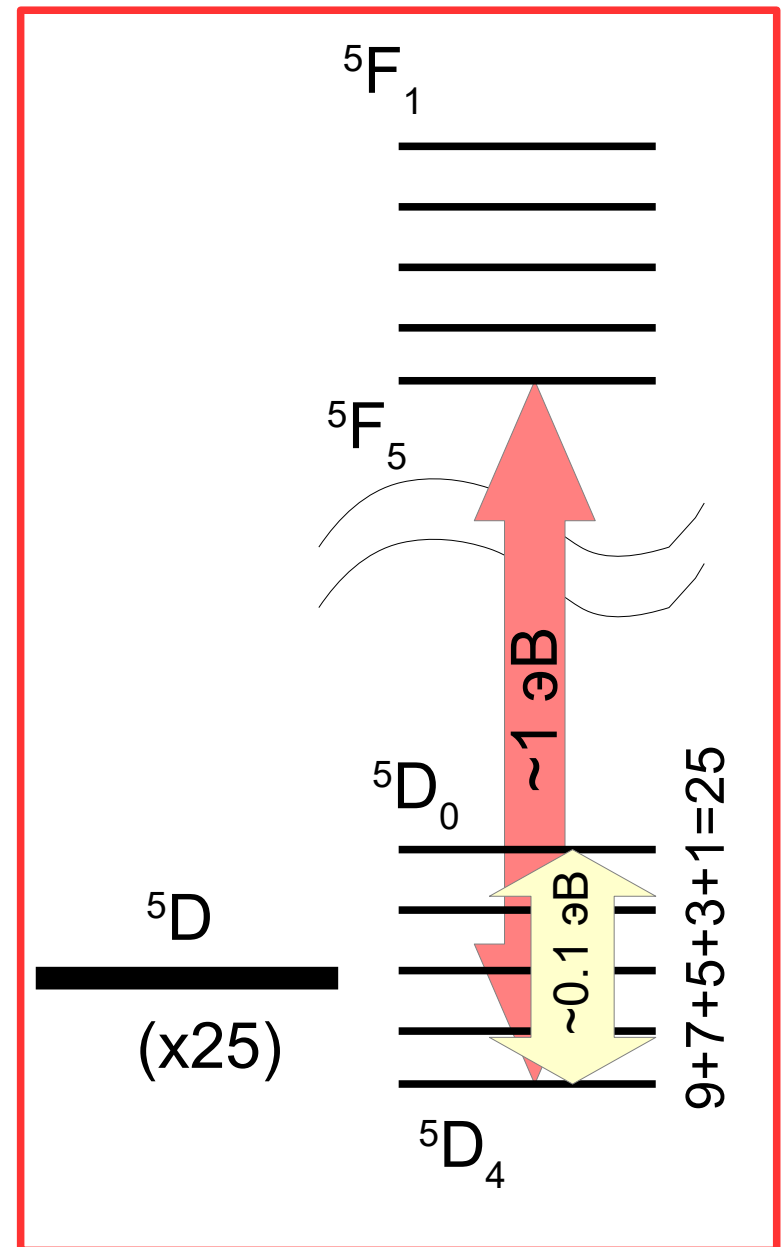


<https://www-ssrl.slac.stanford.edu/dichroism/xas.html>

Пример 3. Тонкая структура термов железа

Fe: $3d^6$
 $\max S_z = 4 \times \frac{1}{2} = 2$ + - + + + +
 $\max L_z = 2$

терм 5D
 полный момент J:
 от 0 до 4



Достоверный источник сведений по термам и спектрам атомов

NIST
National Institute of
Standards and Technology
Physical Meas. Laboratory

Basic Atomic Spectroscopic Data

Iron (Fe)

Other Elements

Neutral Atom

Singly Ionized

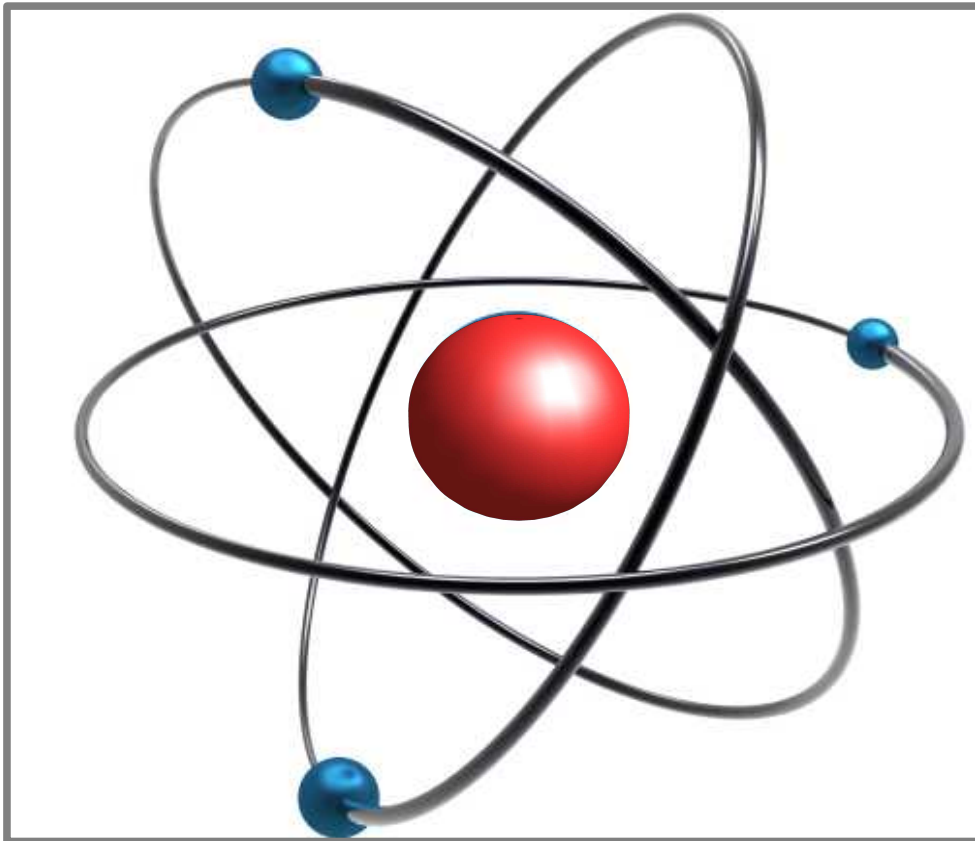
[Main Page](#)
[Finding List](#)
[Element Name](#)
[Atomic Number](#)
[Periodic Table](#)
[Atomic Data](#)
[Strong Lines](#)
[Persistent Lines](#)
[Energy Levels](#)
[Persistent Lines](#)
[Energy Levels](#)
[Ref.](#)

[Switch to ASCII Version](#)

Energy Levels of Neutral Iron (Fe I)

Configuration	Term	<i>J</i>	Level (cm ⁻¹)	Ref.
3d ⁶ 4s ²	a ⁵ D	4	0.000	NJLT94
		3	415.933	NJLT94
		2	704.007	NJLT94
		1	888.132	NJLT94
		0	978.074	NJLT94
3d ⁷ (⁴ F) 4s	a ⁵ F	5	6928.268	NJLT94
		4	7376.764	NJLT94
		3	7728.059	NJLT94
		2	7985.784	NJLT94
		1	8154.713	NJLT94
3d ⁷ (⁴ F) 4s	a ³ F	4	11976.238	NJLT94
		3	12560.933	NJLT94
		2	12968.553	NJLT94
3d ⁷ (⁴ P) 4s	a ⁵ P	3	17550.180	NJLT94
		2	17726.987	NJLT94
		1	17927.381	NJLT94

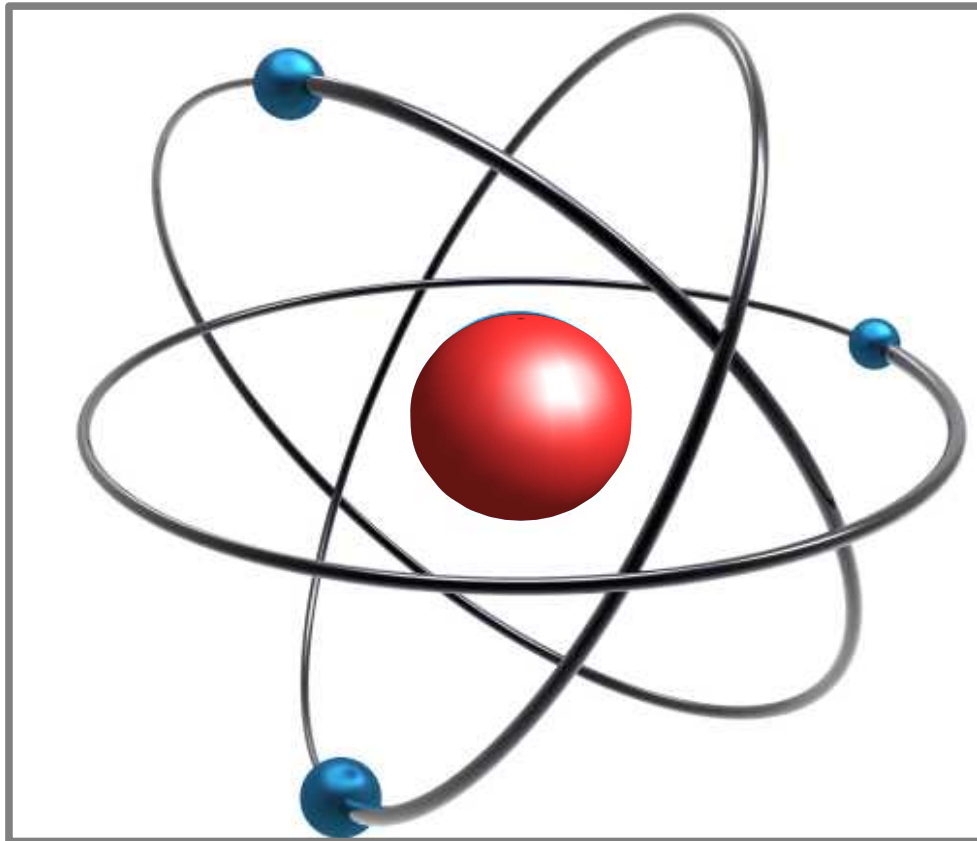
Спин-орбитальное взаимодействие



Квантовые числа атома

$$|L, S, L_z, S_z\rangle$$

Спин-орбитальное взаимодействие

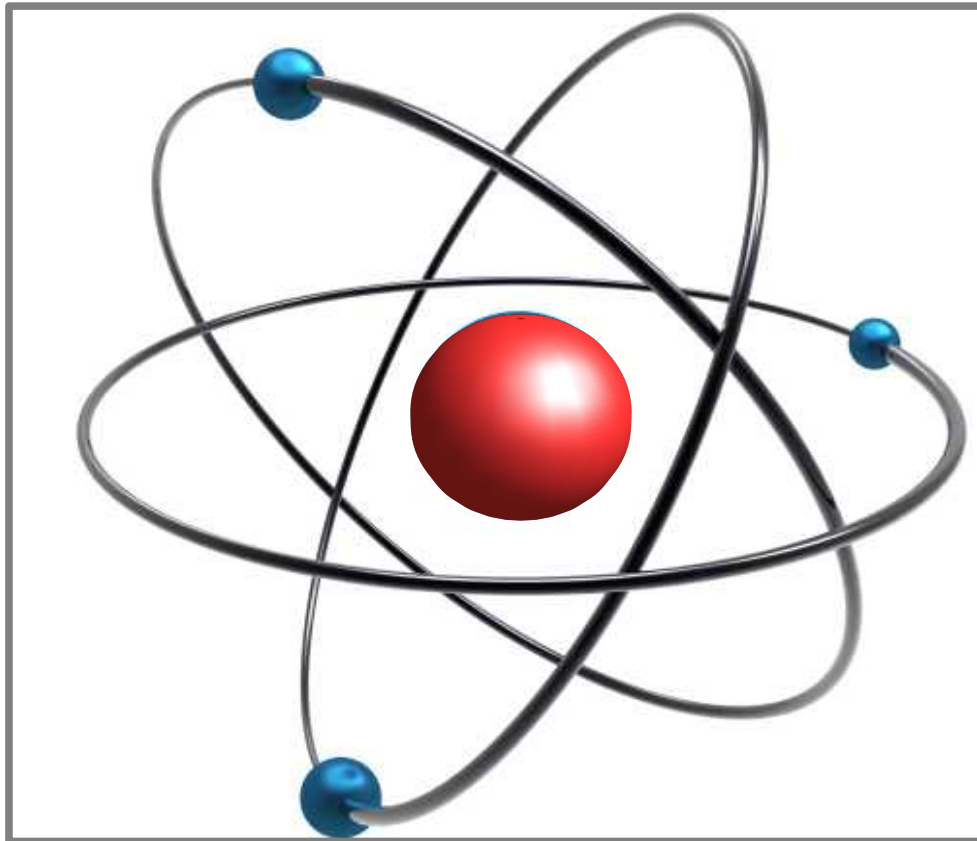


Квантовые числа атома

$$|L, S, L_z, S_z\rangle$$

$$\begin{aligned}\hat{J} &= \hat{S} + \hat{L} \\ \hat{H}_{SL} &= \lambda (\hat{S} \hat{L}) = \\ &= \frac{\lambda}{2} (\hat{J}^2 - \hat{S}^2 - \hat{L}^2)\end{aligned}$$

Спин-орбитальное взаимодействие



Квантовые числа атома

$$|L, S, L_z, S_z\rangle$$

$$\begin{aligned}\hat{J} &= \hat{S} + \hat{L} \\ \hat{H}_{SL} &= \lambda (\hat{S} \hat{L}) = \\ &= \frac{\lambda}{2} (\hat{J}^2 - \hat{S}^2 - \hat{L}^2)\end{aligned}$$

$$|J, L, S, J_z\rangle$$

Пример: $L=2, S=1$

$$|L, S, L_z, S_z\rangle:$$

$$L_z = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$$

$$S_z = \{-1, 0, 1\}$$

всего 15 состояний с
разными проекциями
момента импульса и
спина

Пример: $L=2, S=1$

$$|L, S, L_z, S_z\rangle:$$

$$L_z = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$$

$$S_z = \{-1, 0, 1\}$$

всего 15 состояний с
разными проекциями
момента импульса и
спина

$$|J, L, S, J_z\rangle:$$

$$J=3, {}^3D_3, 7 \text{ состояний}$$

$$J=2, {}^3D_2, 5 \text{ состояний}$$

$$J=1, {}^3D_1, 3 \text{ состояния}$$

$$7+5+3=15$$

$$E_{SL} = \frac{\lambda}{2} (J(J+1) - S(S+1) - L(L+1))$$

Часть 4. Свободный атом (ион) в магнитном поле

Напоминание о связи момента импульса и магнитного момента

орбитальное движение
(обобщая классический
результат):

$$\vec{\hat{M}}^{(l)} = \mu_B \hat{\vec{l}}$$
$$\hat{M}_z^{(l)} = \mu_B \hat{l}_z$$

спиновое движение
(релятивистская
квантовая физика,
экспериментально из
опытов Эйнштейна-де
Гааза и Штерна-Герлаха):

$$\vec{\hat{M}}^{(s)} = 2\mu_B \hat{\vec{S}}$$
$$\hat{M}_z^{(s)} = 2\mu_B \hat{S}_z$$

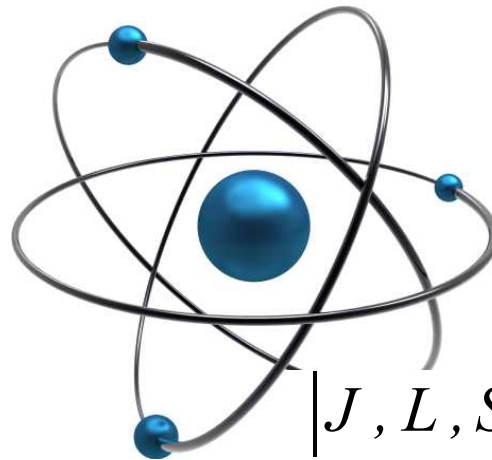
Напоминание о связи момента импульса и магнитного момента

орбитальное движение
(обобщая классический
результат):

$$\vec{\hat{M}}^{(l)} = \mu_B \hat{\vec{l}}$$
$$\hat{M}_z^{(l)} = \mu_B \hat{l}_z$$

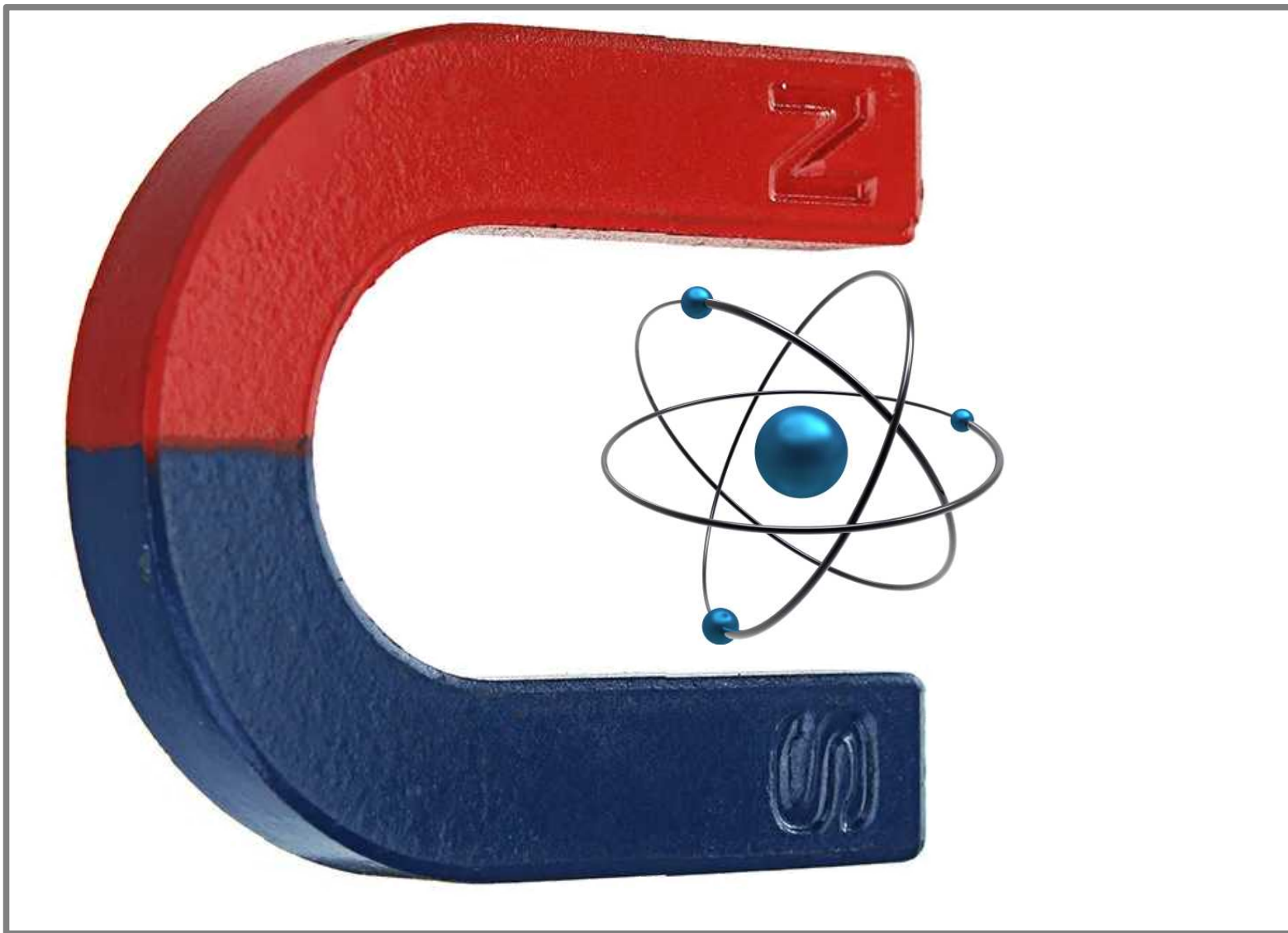
спиновое движение
(релятивистская
квантовая физика,
экспериментально из
опытов Эйнштейна-де
Гааза и Штерна-Герлаха):

$$\vec{\hat{M}}^{(s)} = 2\mu_B \hat{\vec{S}}$$
$$\hat{M}_z^{(s)} = 2\mu_B \hat{S}_z$$

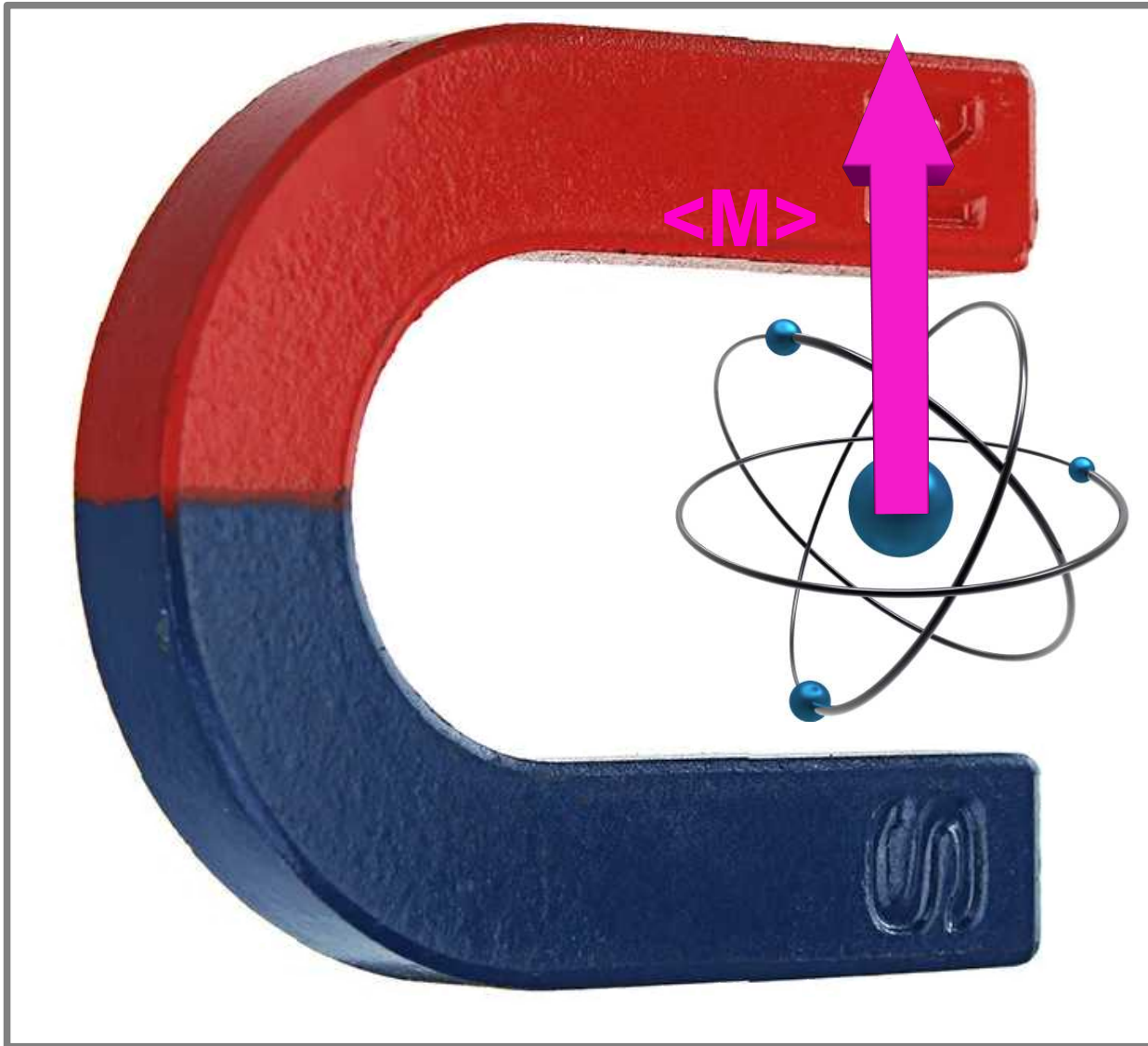


$|J, L, S, J_z\rangle$

СВОБОДНЫЙ АТОМ (ИОН) МАГНИТНОМ ПОЛЕ



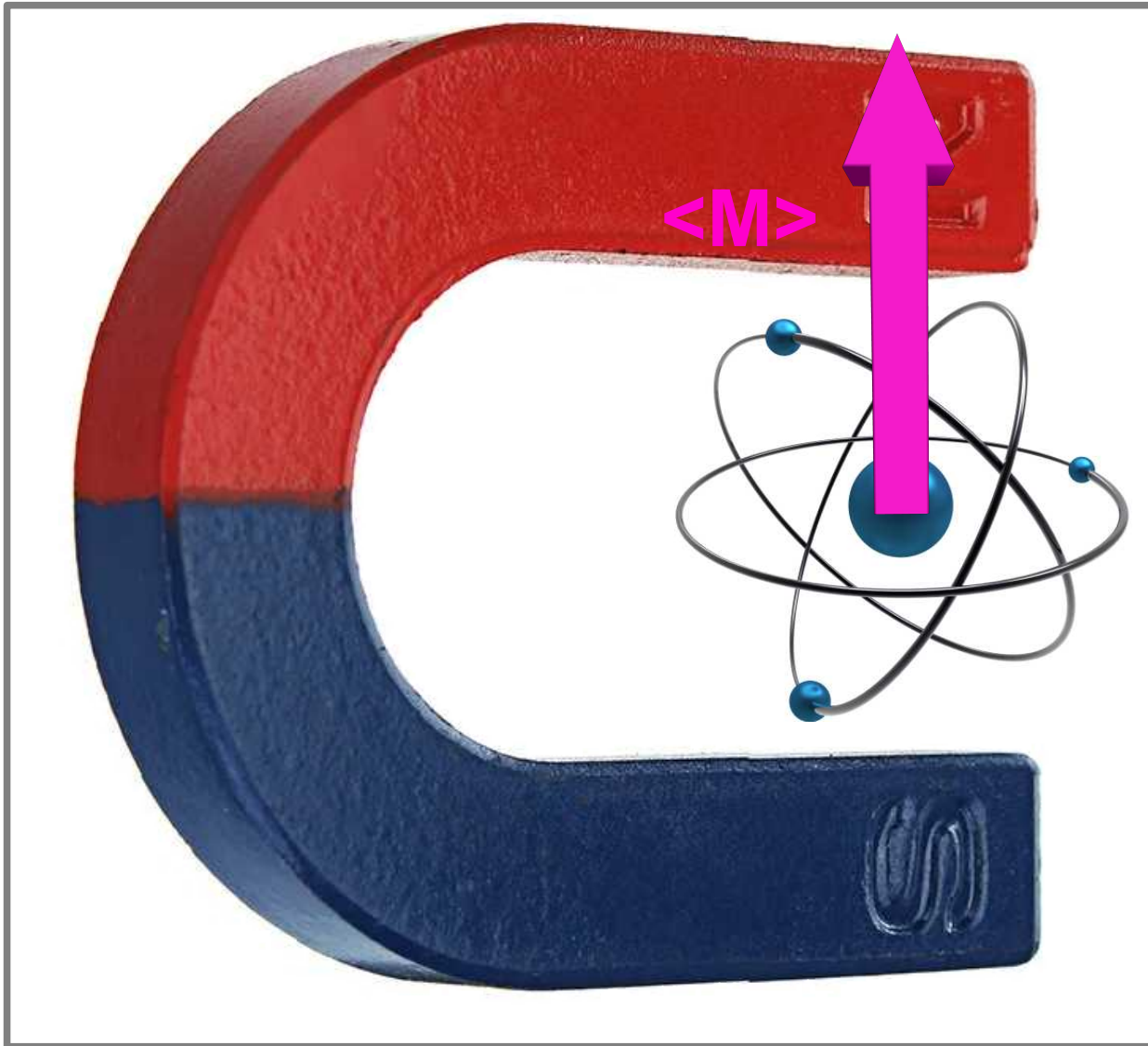
СВОБОДНЫЙ АТОМ (ИОН) МАГНИТНОМ ПОЛЕ



$$\hat{J} = \hat{S} + \hat{L}$$
$$\hat{M} = \mu_B \hat{L} + 2\mu_B \hat{S}$$

«непараллельность»
операторов полного
механического и
магнитного моментов

СВОБОДНЫЙ АТОМ (ИОН) МАГНИТНОМ ПОЛЕ



$$\hat{J} = \hat{S} + \hat{L}$$
$$\hat{M} = \mu_B \hat{L} + 2\mu_B \hat{S}$$

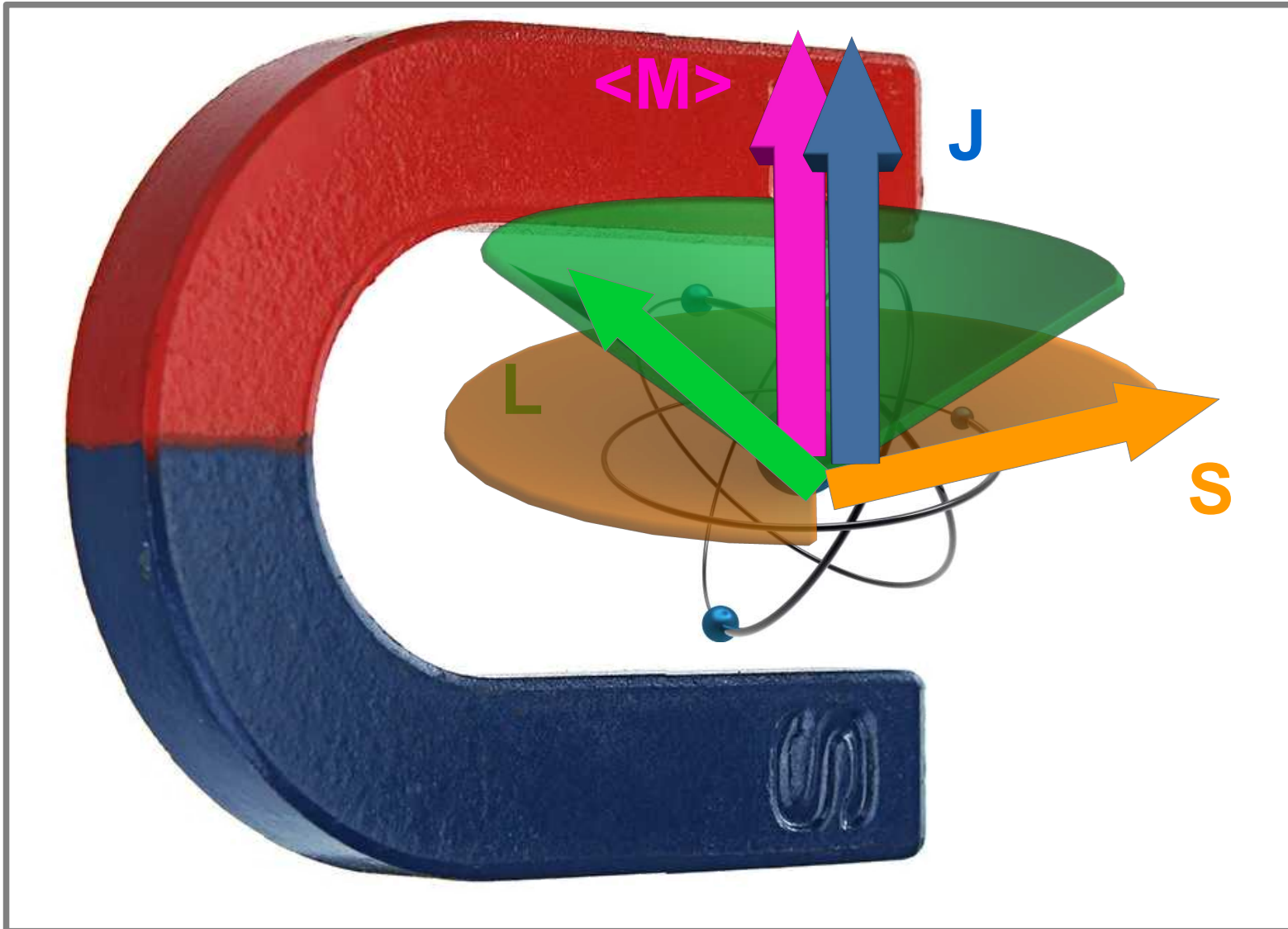
«непараллельность»
операторов полного
механического и
магнитного моментов

$$\hat{H}_{SL} = \lambda (\hat{S} \hat{L})$$

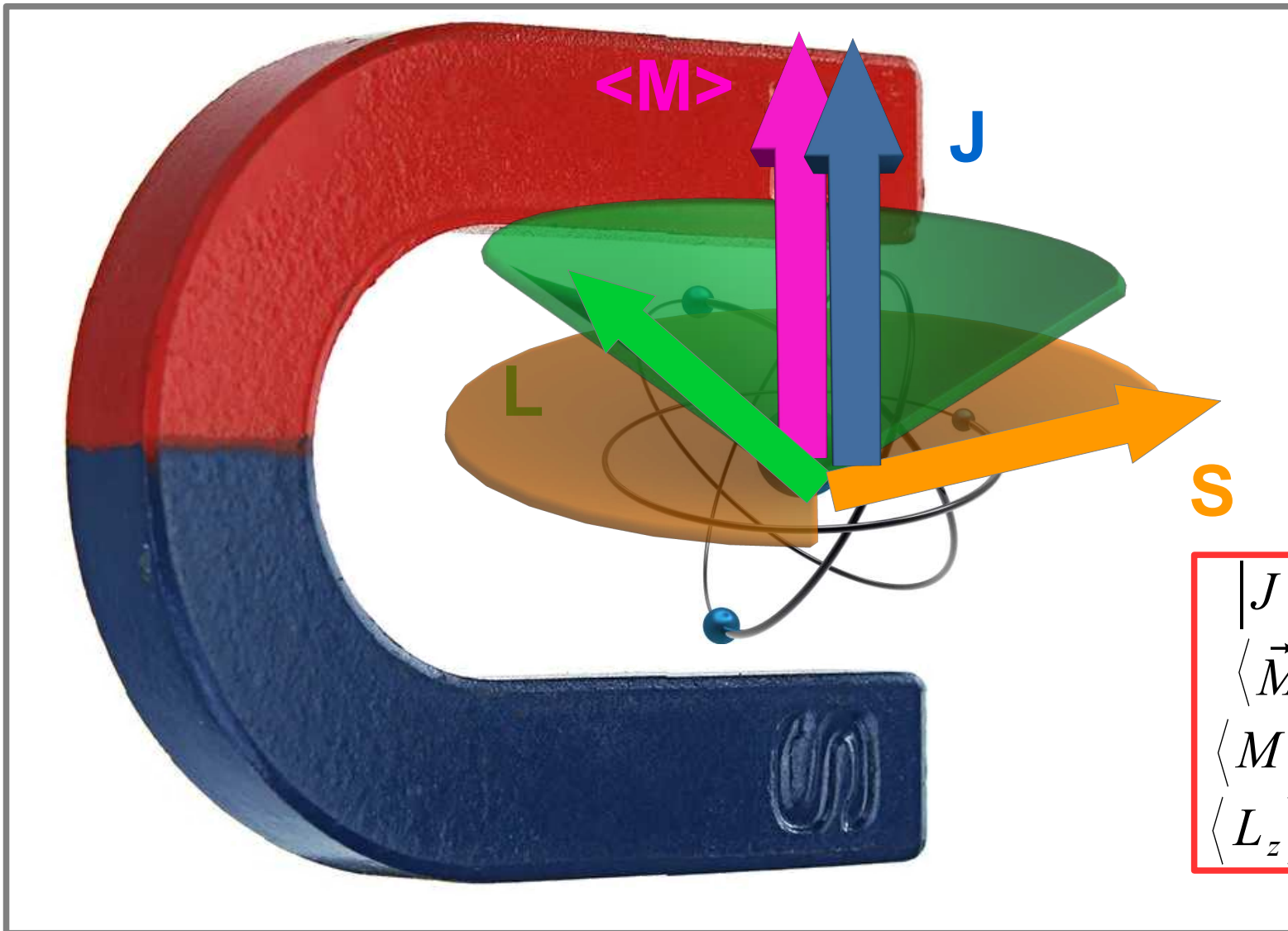
vs.

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

СВОБОДНЫЙ АТОМ (ИОН) В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ



СВОБОДНЫЙ АТОМ (ИОН) В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ



$$\begin{aligned} &|J, L, S, J_z\rangle \\ &\langle \vec{M} \rangle = g \mu_B \vec{J} \\ &\langle M_z \rangle = g \mu_B J_z \\ &\langle L_z \rangle, \langle S_z \rangle = ??? \end{aligned}$$

Слабое поле: g-фактор

$$\begin{aligned} & |J, L, S, J_z\rangle \\ \hat{M}_z &= \mu_B \hat{L}_z + 2\mu_B \hat{S}_z = \mu_B (\hat{J}_z + \hat{S}_z) \\ \langle \hat{M}_z \rangle &= \mu_B (J_z + \langle \hat{S}_z \rangle) \end{aligned}$$

Слабое поле: g-фактор

$$|J, L, S, J_z\rangle$$

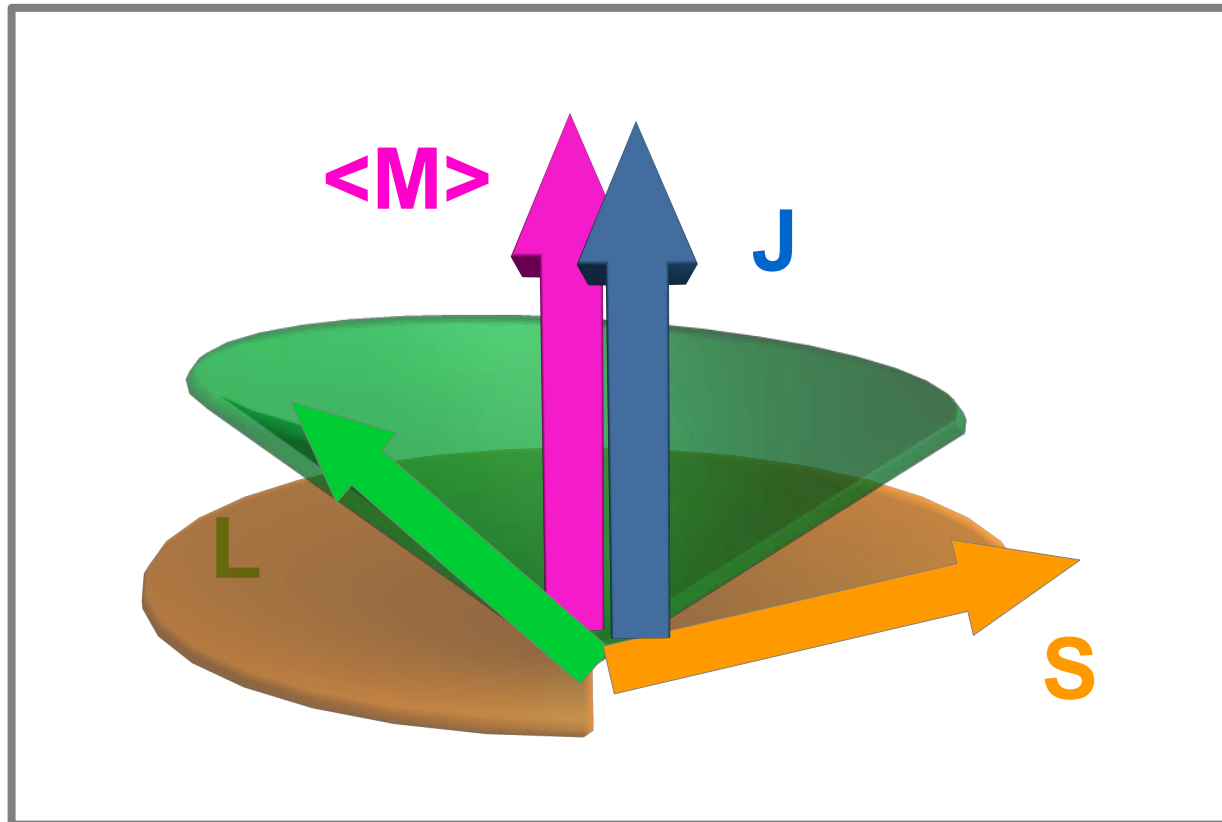
$$\hat{M}_z = \mu_B \hat{L}_z + 2\mu_B \hat{S}_z = \mu_B (\hat{J}_z + \hat{S}_z)$$

$$\langle \hat{M}_z \rangle = \mu_B (J_z + \langle \hat{S}_z \rangle)$$

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

$$\langle \vec{S} \rangle = A \vec{J}$$

$$\langle S_z \rangle = A J_z$$



Слабое поле: g-фактор

$$|J, L, S, J_z\rangle$$

$$\hat{M}_z = \mu_B \hat{L}_z + 2\mu_B \hat{S}_z = \mu_B (\hat{J}_z + \hat{S}_z)$$

$$\langle \hat{M}_z \rangle = \mu_B (J_z + \langle \hat{S}_z \rangle)$$

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

$$\langle \vec{S} \rangle = A \vec{J}$$

$$\langle S_z \rangle = A J_z$$

$$\langle \vec{S} \vec{J} \rangle = A J^2$$

$$L^2 = (\vec{J} - \vec{S})^2$$

$$\langle \vec{S} \vec{J} \rangle = (J^2 + S^2 - L^2)/2$$

Слабое поле: g-фактор

$$|J, L, S, J_z\rangle$$

$$\hat{M}_z = \mu_B \hat{L}_z + 2\mu_B \hat{S}_z = \mu_B (\hat{J}_z + \hat{S}_z)$$

$$\langle \hat{M}_z \rangle = \mu_B (J_z + \langle \hat{S}_z \rangle)$$

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

$$\langle \vec{S} \rangle = A \vec{J}$$

$$\langle S_z \rangle = A J_z$$

$$\langle \vec{S} \vec{J} \rangle = A J^2$$

$$L^2 = (\vec{J} - \vec{S})^2$$

$$\langle \vec{S} \vec{J} \rangle = (J^2 + S^2 - L^2)/2$$

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

Слабое поле: g-фактор

$$|J, L, S, J_z\rangle$$

$$\hat{M}_z = \mu_B \hat{L}_z + 2\mu_B \hat{S}_z = \mu_B (\hat{J}_z + \hat{S}_z)$$

$$\langle \hat{M}_z \rangle = \mu_B (J_z + \langle \hat{S}_z \rangle)$$

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

$$\langle \vec{S} \rangle = A \vec{J}$$

$$\langle S_z \rangle = A J_z$$

$$\langle \vec{S} \vec{J} \rangle = A J^2$$

$$L^2 = (\vec{J} - \vec{S})^2$$

$$\langle \vec{S} \vec{J} \rangle = (J^2 + S^2 - L^2)/2$$

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

$$\langle \hat{M}_z \rangle = g \mu_B J_z$$

$$g = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

$$E_z = -g \mu_B B J_z$$

Возможные значения g-фактора

$$g = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

терм	J	L	S	g
5D_4	4	2	2	1,5
3S_1	1	0	1	2
${}^2P_{1/2}$	1/2	1	1/2	2/3
${}^2P_{3/2}$	3/2	1	1/2	4/3
5F_5	5	3	2	1,4
1P_1	1	1	0	1
5F_1	1	3	2	0
7G_1	1	4	3	-0,5



S=L, g=3/2



L=0, g=2



S=0, g=1



g=0



g<0