

ошибкам, как видно из таблицы эксперим. значений магн. моментов нек-рых адронов.

Магнетизм атомов (магнетизм атомных ядер рассмотрен в ст. *Ядро атома*). Все одноэлектронные оболочки изотопов водорода (^1H , ^2D , ^3T) и водородоподобных ионов (He^+ , Li^{2+} , Be^{3+} и др.) имеют различные магн. моменты ядер, но одинаковый спиновый магн. момент оболочки. Спиновый момент электрона s (см. *Спин*) имеет величину $|s| = \sqrt{s(s+1)}\hbar = \sqrt{3}\hbar/2$, где $s=1/2$ — спиновое квантовое число. Возможные проекции s на ось квантования z равны: $s_z = m_s\hbar = \pm\hbar/2$, где m_s , равное $+1/2$ или $-1/2$, — магн. спиновое квантовое число. Электрон с зарядом $-e$ и массой m обладает *магнито-механическим отношением* $\gamma_0 = |e|/2mc$, аномальным множителем Ланде $g_{\text{сп}} = 2$ и проекцией спинового магн. момента $\mu_{\text{сп}}^z = g_{\text{сп}}\gamma_0 s_z = \pm 2(|e|/2mc)(\hbar/2) = \pm\mu_{\text{Б}}$, где $\mu_{\text{Б}}$ — магнетон Бора; абс. величина $|\mu_{\text{сп}}| = g_{\text{сп}}\gamma_0 |s| = \sqrt{3}\mu_{\text{Б}}$. Орбитальный механ. l и магн. $\mu_{\text{орб}}$ моменты (см. *Орбитальный момент*) определяются орбитальным квантовым числом l [$l=0, 1, 2, \dots, (n-1)$, где n — главное квантовое число] и при $g_{\text{орб}} = 1$ значение $|l| = \sqrt{l(l+1)}\hbar$ и $|\mu_{\text{орб}}| = g_{\text{орб}}\gamma_0 |l| = \sqrt{l(l+1)}\mu_{\text{Б}}$. При $l=0$ (s -состояние) $|\mu_{\text{орб}}| = |l| = 0$; при $l>0$ возможны состояния: p ($l=1$), d ($l=2$), f ($l=3$) и т. д., причём $|\mu_{\text{орб}}|$ и $|l|$ не равны нулю. В соответствии с пространственным квантованием $l_z = m_l\hbar$, где магн. орбитальные квантовые числа m_l при заданном l равны: $-l, -(l-1), \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, (l-1), l$, т. е. всего существует $2l+1$ проекций l на ось квантования; $\mu_{\text{орб}}^z = g_{\text{орб}}\gamma_0 l_z = m_l\mu_{\text{Б}}$. Полный механ. момент оболочки (из одного электрона) равен $j = l + s$. Если $l=0$, то квантовое число полного момента $j = s = 1/2$, если $l>0$, то $j = l \pm 1/2$.

В многоэлектронных атомах и ионах в приближении центрально-симметричного поля сохраняются те же квантовые числа для состояний отд. электронов (векторная модель); эти состояния определяются электронной конфигурацией, т. е. числом электронов с заданными n и l . По *Паули принципу*, в каждом состоянии может находиться не более $2(2l+1)$ электронов; когда это число достигнуто, слой оказывается замкнутым. Замкнутые слои обозначаются: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3d^{10}, \dots$. Состояние оболочки в целом определяют полные моменты — орбитальный $L = \sum_k l_k$ и спиновый $S = \sum_k s_k$. Их квантовые значения выражаются через суммарные квантовые числа L и S , образуемые комбинациями чисел l_k и s_k . Для полного момента $J = L + S$, его квантовые числа равны: $J = L + S, L + S - 1, \dots, L - S + 1, L - S$ (если $L \geq S$) и $J = S + L, S + L - 1, \dots, S - L + 1, S - L$ (если $L < S$). Величины всех моментов — механических и магнитных — равны:

$$|L| = \sqrt{L(L+1)}\hbar, |S| = \sqrt{S(S+1)}\hbar, |J| = \sqrt{J(J+1)}\hbar, \quad (1)$$

$$|\mu_L| = \sqrt{L(L+1)}\mu_{\text{Б}}, |\mu_S| = \sqrt{S(S+1)}\mu_{\text{Б}}, |\mu_J| = \sqrt{J(J+1)}\mu_{\text{Б}}, \quad (2)$$

их проекции определяются квантовыми числами

$$\begin{aligned} m_L &= -L, -(L-1), \dots, (L-1), L; \\ m_S &= -S, -(S-1), \dots, (S-1), S; \\ m_J &= -J, -(J-1), \dots, (J-1), J. \end{aligned} \quad (3)$$

В векторной модели есть два предельных случая: LS -связь и jj -связь. В первом случае (см. *Спин-орбитальное взаимодействие*) электростатич. взаимодействие значительно больше магнитного. Поэтому разности энергий состояний оболочки с различными L и S заметно больше разностей энергий состояний с данными L и S , но с различными J , т. е. различными взаимными ориентациями (углами) векторов L и S . LS -связь обус-

ловливает *тонкую структуру* атомных спектров. В случае оболочек атомов тяжёлых хим. элементов магн. спин-орбитальная связь может по энергии сравниться и даже превзойти электростатич. энергию, это нарушит LS -связь. В возникшей jj -связи l_k и s_k сначала объединяются ($j_k = l_k + s_k$), а затем создают полный (суммарный) момент J . Конкретные значения L, S и J находят с помощью *Хунда правил*: 1) наименьшей энергией обладает состояние с наибольшим (при заданной конфигурации) значением суммарного спина S и наибольшим при заданном S суммарным орбитальным моментом L ; 2) если $L \neq 0$ и $S \neq 0$, а оболочка nl содержит меньше половины максимально возможного числа электронов ($< 2l+1$), то наименьшую энергию имеют уровни мультиплета с $J = |L - S|$, а при числе электронов, превышающем $2l+1$, — уровни с $J = L + S$. Согласно этому, можно найти L

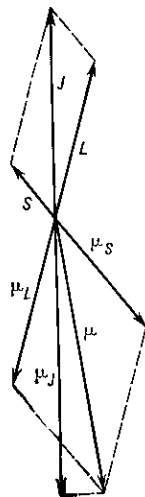


Рис. 1. Сложение механических и магнитных моментов электронной оболочки атома.

и S для атомов начала таблицы Менделеева: у He с $Z=2$ $S_{\text{He}} = L_{\text{He}} = 0$; то же у Be с $Z=4$; но у C ($Z=6$) с шестью электронами характер заполнения электронной оболочки иной — появляются p -уровни и по правилу Хунда два p -электрона имеют параллельные спины и орбиты с $l=1$, т. е. $S_C = 1$ и $L_C = 1$. Из первых 18 элементов с чётным числом электронов только атомы восьми магнетоннейтральны: атомы инертных газов ($\text{He}, \text{Ar}, \text{Ne}, \text{Kr}$) и ещё $\text{Be}, \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Zn}$. Атомы всех остальных 10 элементов с чётным числом электронов ($\text{C}, \text{O}, \text{Si}, \text{S}, \text{Ti}, \text{Cr}, \text{Fe}, \text{Ni}, \text{Ge}, \text{Se}$) и все 18 с нечётным числом (от H до Br) являются парамагнитными, из них только 5 со спиновыми моментами ($\text{H}, \text{Li}, \text{Na}, \text{K}, \text{Cu}$) и 13 со спиновыми и орбитальными ($\text{B}, \text{N}, \text{F}, \text{Al}, \text{P}, \text{Cl}, \text{Sc}, \text{V}, \text{Mn}, \text{Co}, \text{Ga}, \text{As}, \text{Br}$). Можно определить моменты атомов и всех др. элементов, включая также и элементы переходных групп. Результирующий магн. момент оболочки μ , в силу аномалии спинового фактора Ланде ($g_{\text{сп}} = 2g_{\text{орб}}$) не будет совпадать по направлению с моментом J (рис. 1). Поскольку заряд

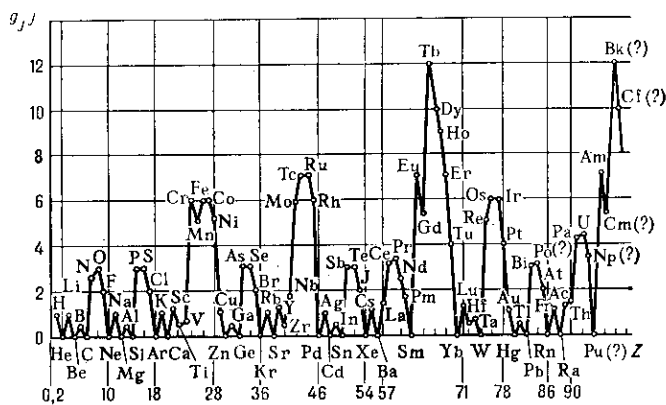


Рис. 2. Максимальные проекции полных магнитных моментов электронных оболочек атомов $g_J J$ (в единицах $\mu_{\text{Б}}$) химических элементов в зависимости от их порядкового номера Z в таблице Менделеева.

$e < 0$, векторы S и L, μ_S и μ_L антипараллельны, μ и J составляют угол $\neq 180^\circ$. Эффективный магн. момент оболочки определяет слагающая μ_J :

$$\mu_J = \mu_L \cos(L, J) + \mu_S \cos(S, J). \quad (4) \quad 637$$