

Кислицын А.А.
Физика атома, атомного
ядра и элементарных
частиц

15 (1). Спин и магнитный момент
электрона.

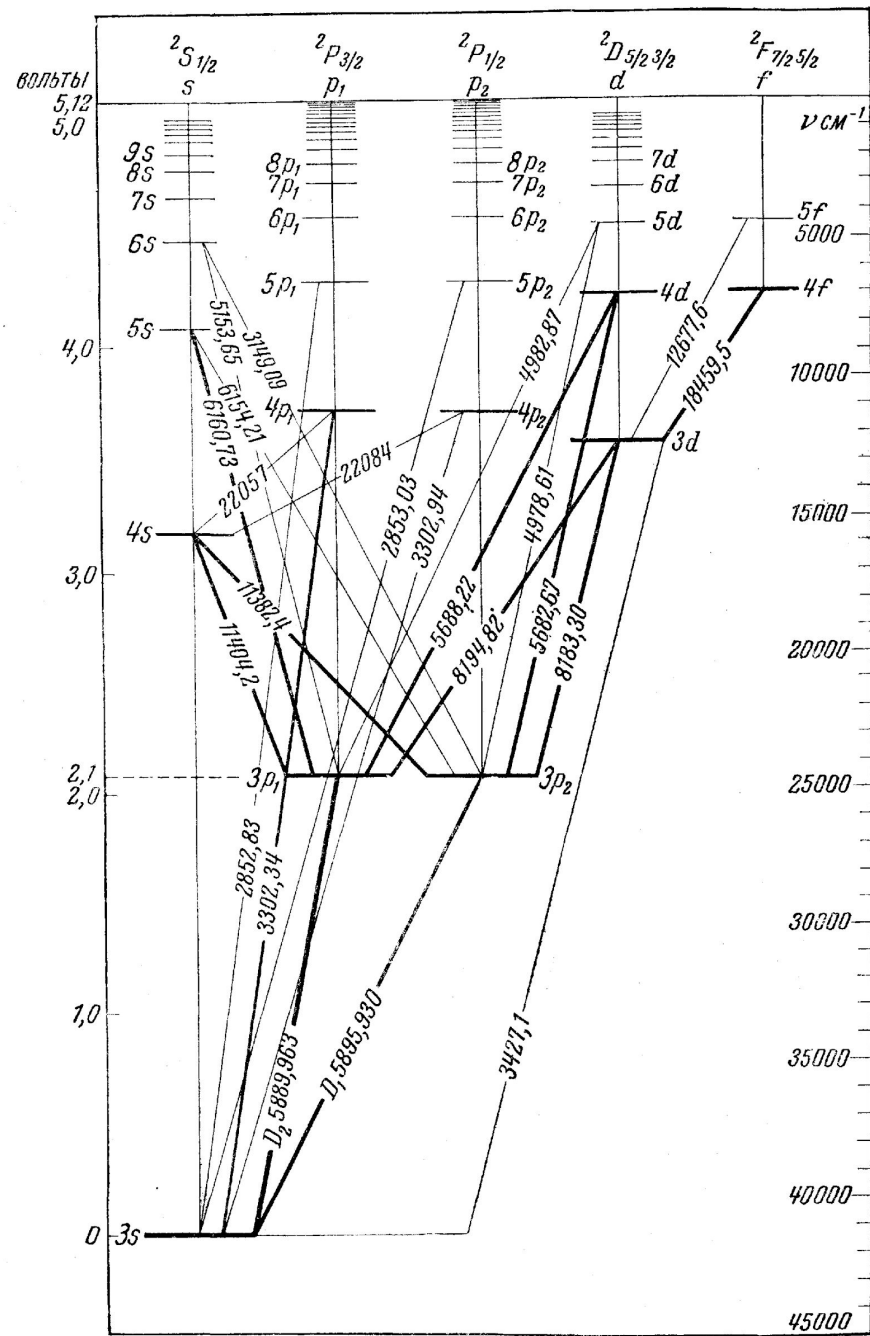
Спектры атомов щелочных металлов

Спектры атомов щелочных металлов схожи со спектрами водорода: они также состоят из серий, причем линии в серии закономерно сгущаются к границе серии. Общий вид термов щелочных атомов имеет вид

$$T = \frac{R}{(n + \sigma)^2} \quad (15.1)$$

где σ – некоторая поправка, различная для различных серий.

На рисунке изображены уровни энергии и переходы в атоме натрия. Видно качественное сходство с атомом водорода. Однако изучение структуры спектральных линий указывает на то, что уровни p, d, f, \dots , - т.е. все, кроме s – уровней – расщеплены на два (т.е. являются двойными).



Дублетная структура термов, а также некоторые другие экспериментальные факты, например аномальный эффект Зеемана, который мы рассмотрим позднее, вызвали в свое время (20-е годы прошлого столетия) большие затруднения у физиков. Эти факты в конце концов привели к гипотезе о том, что у электрона существует собственный механический момент (**спин**) и связанный с ним магнитный момент. Эта гипотеза была выдвинута Уленбеком и Гаудсмитом (Uhlenbeck G., Goudsmit S., 1925 г).

Величина механического момента – спина – может быть определена из факта дублетности термов атомов щелочных металлов. Как всякий момент спин электрона должен быть квантованным. Его величину принято обозначать буквой S (не путать с обозначением s -термов), и выражать с помощью соответствующего спинового квантового числа s :

(15.2)

Эта формула аналогична формуле (14.4) для величины (т.е. для модуля) орбитального момента импульса L при движении электрона вокруг ядра:

$$L = \hbar \sqrt{l(l+1)}$$

Далее число возможных проекций спина на выбранное направление равно $2s+1$. С другой стороны опыт показывает, что термы дублетны, поэтому спин имеет только две возможных ориентации. Следовательно

$$2s+1 = 2,$$

отсюда спиновое квантовое число s равно:

$$s = 1/2,$$

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

Кроме механического момента, электрон имеет и магнитный момент. Орбитальному движению электрона соответствует орбитальный магнитный момент, а спину – собственный магнитный момент.

Определим в рамках теории Бора величину орбитального магнитного момента. “Сила тока” на орбите электрона $i = ev$. Магнитный момент

$$\mu_l = iS$$

где “площадь орбиты” $S = \pi r^2$

Поэтому

$$\begin{aligned}\mu_l &= ev\pi r^2 = \frac{ev \cdot 2\pi r^2 \cdot m_e}{2m_e} = \\ &= \frac{e}{2m_e} (2\pi v r m_e r) = \frac{e\hbar}{2m_e} \sqrt{l(l+1)}\end{aligned}$$

Итак,

$$|\boldsymbol{\mu}_l| = \frac{e}{2m_e} |\mathbf{L}| = \frac{e\hbar}{2m_e} \sqrt{l(l+1)} \quad (15.3)$$

Величина

$$e\hbar / 2m_e = \mu_0 \quad (15.4)$$

называется **магнетоном Бора** и применяется для измерения магнитных моментов атомов и молекул:

$$|\mu_l| = \mu_0 \sqrt{l(l+1)}. \quad (15.5)$$

Проекция магнитного момента на некоторое направление Z , так же, как и проекция момента импульса, может принимать $2l+1$ значений:

$$\mu_{lz} = \mu_0 \cdot m, \quad (15.6)$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm l$.

Отношение величины магнитного момента к моменту импульса называется гиромагнитным отношением. Для орбитального момента

$$g_l = \frac{\mu_l}{L} = \frac{\mu_0 \sqrt{l(l+1)}}{\hbar \sqrt{l(l+1)}} = \frac{\mu_0}{\hbar} = \frac{e}{2m_e} \quad (15.7)$$

Собственному моменту импульса электрона – спину – соответствует и собственный магнитный момент μ_s , причем вся совокупность экспериментальных фактов указывает на то, что этот собственный магнитный момент электрона равен:

$$|\boldsymbol{\mu}_s| = 2 \cdot \frac{e}{2m_e} |\boldsymbol{S}| = 2\mu_0 \sqrt{s(s+1)}. \quad (13.8)$$

Таким образом, гиромагнитное отношение для собственных моментов электрона

$$g_s = \frac{|\boldsymbol{\mu}_s|}{|S|} = \frac{2\mu_0 \sqrt{s(s+1)}}{\hbar \sqrt{s(s+1)}} = \frac{2\mu_0}{\hbar} = \frac{e}{m_e} \quad (15.9)$$

вдвое больше, чем для орбитальных моментов. Проекция собственного магнитного момента на некоторое направление Z , так же как и проекция спина, может принимать всего 2 значения:

$$\mu_{sz} = 2\mu_0 \cdot \left(\pm \frac{1}{2} \right) = \pm \mu_0 \quad (15.10)$$

Наличие спина и магнитного момента электрона объясняет многие экспериментальные факты. Например, дублетную структуру термов щелочных атомов можно объяснить следующим образом. В состояниях $l \neq 0$ (p, d, f, \dots - термы) атом обладает орбитальным магнитным моментом, с которым взаимодействует собственный магнитный момент электрона, причем он может ориентироваться относительно орбитального момента так, что его проекция равна либо $+\hbar/2$, либо $-\hbar/2$. Поэтому вместо одного уровня возникает два уровня, и p -, d -, f -, ... термы являются двойными.