

О ПЕРЕДАЧЕ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ МОМЕНТОВ ИМПУЛЬСА ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ МОЛЕКУЛ

*Д.К.Оторбаев, В.Н.Очкин, С.Ю.Савинов,
Н.Н.Соболев, С.Н.Цхай*

На примере молекул H_2 и D_2 экспериментально установлено, что при возбуждении электронно-колебательно-вращательных состояний прямым электронным ударом возможно изменение вращательных моментов молекул вплоть до 5 — 6 \hbar .

Настоящее сообщение посвящено выяснению правильности общепринятого предположения о том, что в низкотемпературной плазме возбуждение электронно-колебательно-вращательных состояний электронным ударом происходит без изменения момента импульса молекулы [1]. Пря-

мое экспериментальное выяснение этого вопроса возможно на примере водорода в плазме газового разряда при охлаждении разрядной трубки жидким азотом. В указанных условиях у водорода заселен практически один вращательный уровень основного состояния $X^1\Sigma_g^+$. Это позволяет по измерениям относительных заселенностей вращательных уровней возбужденных электронных состояний количественно исследовать возможность передачи момента импульса молекуле при ее возбуждении.

Распределение молекул по вращательным уровням в электронно-возбужденном состоянии $d^3\pi_u$ водорода и дейтерия изучалось методом относительных интенсивностей во вращательной структуре электронно-колебательных полос α -системы Фулхера ($d^3\pi_u \rightarrow a^3\Sigma_g^+$). Установка и методика измерений описаны в работах [2 - 4]. Давление газа в разряде не превышало нескольких десятых тор, чтобы вращательное распределение электронно-возбужденных молекул, образуемых при возбуждении из основного состояния электронным ударом [3], не искажалось столкновениями (радиационное время жизни состояния $d^3\pi_u$ меньше времени между газокинетическими соударениями).

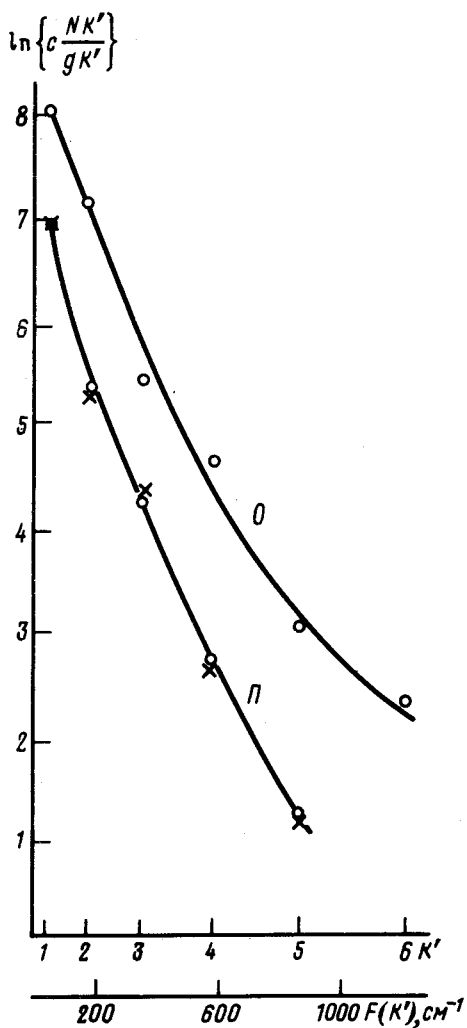


Рис. 1. Зависимость $\ln\left\{c \frac{N_{K'}}{g_{K'}}\right\}$ от энергии вращательных термов $F(K')$ для $H_2(d^3\pi_u, v' = 0)$. Разряд в смеси $H_2 - He$ (1:3) при давлении $P = 0,5$ тор и токе $I = 30$ мА, $T_2 = 160$ К. O — орто-водород; П — пара-водород; ● — экспериментальные значения, × — рассчитанные значения с использованием $a_{K \circ K'}$

На рис. 1 представлены найденные методом относительных интенсивностей зависимости $\ln \left\{ c \frac{N_{K'}}{g_{K'}} \right\}$ ($c = \text{const}$, $N_{K'}$ и $g_{K'}$ — заселенность

и статистический вес вращательного уровня K') от энергии вращательных уровней состояния $\text{H}_2(d^3\pi_u, v' = 0)$. Из рис. 1 видно, что как для орто-, так и для параводорода зависимости нелинейны. Определяя вращательную температуру $T'_{\text{вр}}$ по относительным заселенностям различных пар уровней, можно получить существенно различающиеся результаты. Так для ортоводорода первая пара уровней дает $T'_{\text{вр}} = 200\text{K}$, а пара уровней с $K' = 5$ и $K' = 6$ — 680K . Заметим, что при газовой температуре $T_{\text{г}} = 160\text{K}$ в основном состоянии с точностью до 1% у ортоводорода заселен один, а у параводорода — два вращательных уровня. В спектре же излучения мы видим достаточно развитую вращательную структуру — присутствуют вращательные линии с K' вплоть до 6. Это показывает, что возбуждение происходит со значительным изменением вращательного момента молекулы.

Используя условие стационарной заселенности уровней и результат работы [5]¹⁾ нетрудно получить уравнения для определения относительных скоростей возбуждения $a_{K^0 K'}$ вращательного уровня K' при переходе $K^0 \rightarrow K'$ под действием электронного удара.

$$f'(K') = \sum_{K^0} a_{K^0 K'} f^0(K^0), \quad (1)$$

где $f(K)$ — функция распределения молекул по вращательным уровням, K — вращательное квантовое число, $a_{K^0 K'} = \langle v_e \sigma_e^{K^0 K'} \rangle / (\sum_{K'} \langle v_e \sigma_e^{K^0 K'} \rangle)^{-1}$,

v_e — скорость электронов. Величины отмеченные "0" относятся к состоянию $X^1\Sigma_g^+$, а штрихом — к $d^3\pi_u$. Очевидно, что $\sum_{K'} a_{K^0 K'} = 1$.

В исследуемых условиях у ортоводорода заселен лишь один вращательный уровень $K^0 = 1$, поэтому (1) приобретает простой вид $f(K') = a_{1 K'}$. Измеряя относительные интенсивности $I_{K^0 K'}$ вращательных линий и используя аналитическое выражение для $I_{K^0 K'}$ [6], можно определить все $a_{1 K'}$.

$$a_{1 K'} = \text{const } I_{K^0 K'} \frac{2K' + 1}{S_{K^0 K'}}, \quad (2)$$

const находилась из условия нормировки, факторы Хенля — Лондона $S_{K^0 K'}$ брались из [6, 7].

Полученные нами значения $a_{1 K'}$ усредненные по полосам (0, 0), (2, 2) и (3, 3) составляют $0,528 \pm 0,050$; $0,350 \pm 0,035$; $0,069 \pm 0,014$; $0,042 \pm 0,011$; $0,011 \pm 0,004$ для $K' = 1, 2, 3, 4$ и 5.

¹⁾ Из [5] вытекает, что $\sum_{K'} \sigma_e^{K^0 K'} = \text{const}$, где $\sigma_e^{K^0 K'}$ — сечение возбуждения

уровня K' электронным ударом при переходе $K^0 \rightarrow K'$.

Для расчетов $a_{K^0 K^'}$ при $K^0 \neq 1$ по измеренным $a_{1K^'}$ мы предположили, что $a_{K^0 K^'}$ симметричны (по $\Delta K = K^' - K^0$), т. е. $a_{K^0 K^0 + \Delta K} = a_{K^0 K^0 - \Delta K}$, и подобны, т. е. $\frac{a_{11 + \Delta K_1}}{a_{11 + \Delta K_2}} = \frac{a_{K^0 K^0 + \Delta K_1}}{a_{K^0 K^0 + \Delta K_2}}$.

Сопоставление результатов расчета с экспериментом в интервале температур (160 ÷ 800)К показало, что наблюдается удовлетворительное согласие. Некоторые результаты приведены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что с ростом T_Γ распределение молекул $H_2(d^3\pi_u)$ приобретает больцмановский характер. В частности при $T_\Gamma = 800K$ (рис. 2, б) распределение — практически больцмановское, а $T_{вр}$ и T_Γ связаны известным соотношением [1] (разница менее 3%)

$$T_\Gamma = \frac{B^0}{B'} T_{вр} \quad (3)$$

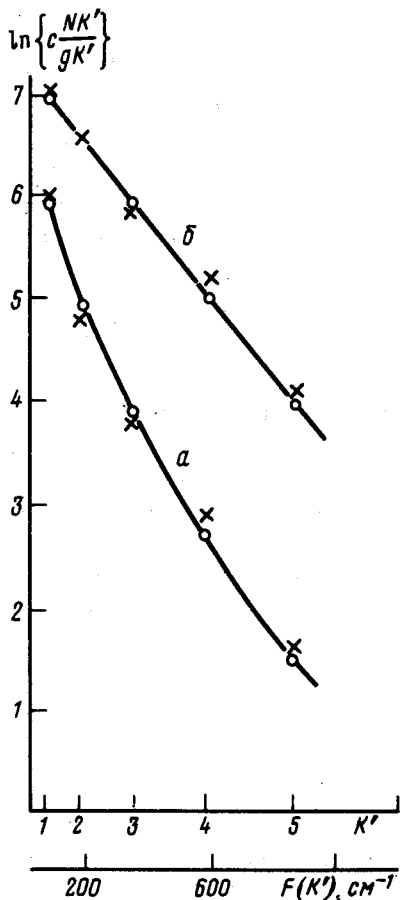


Рис. 2. Зависимость $\ln\left\{c \frac{N_{K'}}{g_{K'}}\right\}$ от $F(K')$ для ортоводорода $H_2(d^3\pi_u, v' = 0)$. Разряд в H_2 при $P = 0,5$ тор и $I = 30$ мА. а — $T_\Gamma = 300K$, б — $T_\Gamma = 800K$, $T_\Gamma = 410K$

Кроме того оказалось, что величины $a_{K^0 K^'}$, полученные по спектру излучения H_2 , вполне пригодны и для расчетов заселенностей вращательных уровней D_2 (см. рис. 3).

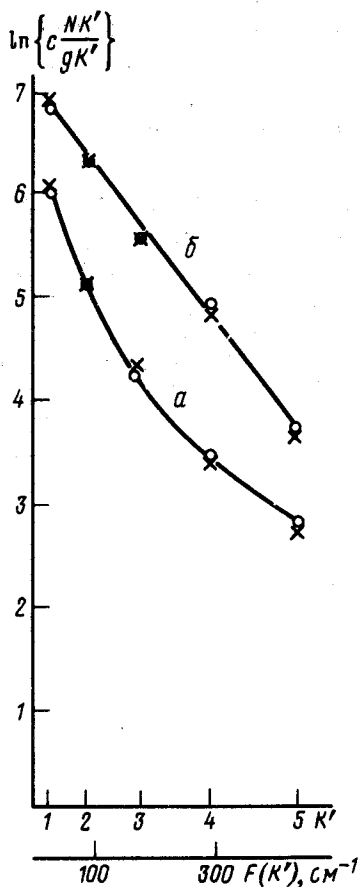


Рис. 3. Зависимость $\ln \left\{ c \frac{N_{K'}}{g_{K'}} \right\}$ от $F(K')$ для

$D_2 (d^3 \pi_u, v' = 0)$. Разреж в смеси $D_2 - He(1:3)$ при $P = 0,5$ тор и $J = 30$ мА: а — $T_{\Gamma} = 170$ К; б — $T_{\Gamma} = 340$ К; $T_{Вр} = 190$ К. ● — экспериментальные значения, × — рассчитанные значения с использованием $\alpha_{K \circ K'}$, полученных по спектру H_2

Резюмируем результаты исследований:

1. Возбуждение может происходить со значительным изменением момента импульса молекулы (вплоть до 5 — 6 \hbar).
2. Сохранение больцмановского характера вращательного распределения и выполнение соотношения (3) при возбуждении молекул из основного состояния имеет место лишь при $kT_{\Gamma} \gg B^{\circ} \hbar c$.
3. Как показывают опыты с D_2 , величина B не влияет на значение относительных скоростей возбуждения $\alpha_{K \circ K'}$.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
17 августа 1978 г.

Литература

- [1] G.Herzberg. Molecular spectra and molecular structure 1. Spectra of diatomic molecules, 2-я ed. D van Nostrand N.Y., 1951.
- [2] В.Н.Очкин, С.Ю.Савинов, Н.Н.Соболев. Препринт ФИАН, №141, 1974.
- [3] Д.К.Оторбаев, В.Н.Очкин, С.Ю.Савинов, Н.Н.Соболев, С.Н.Цхай, Возбуждение вращательных уровней состояний водорода и дейтерия электронным ударом в газовом разряде. Препринт ФИАН, 1978.

- [4] В.Н.Очкин, С.Ю.Савинов, Н.Н.Соболев. Препринт ФИАН, №150, 1977.
- [5] П.Л.Рубин. ЖЭТФ, 65, 1375, 1973.
- [6] I.Kovacs. Rotation structure in the spectra of Diatomic Molecules, Budapest, 1969.
- [7] D.Villarcio, R.Stockbauer, M.G.Inghram. J. Chem. Phys., 50, 1754, 1969.
-