

## ИЗМЕРЕНИЕ КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ОРИЕНТАЦИИ В СИСТЕМЕ $H(1^2S_{1/2}) - He(2^3S_1)$ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ СПИНОВОГО ОБМЕНА

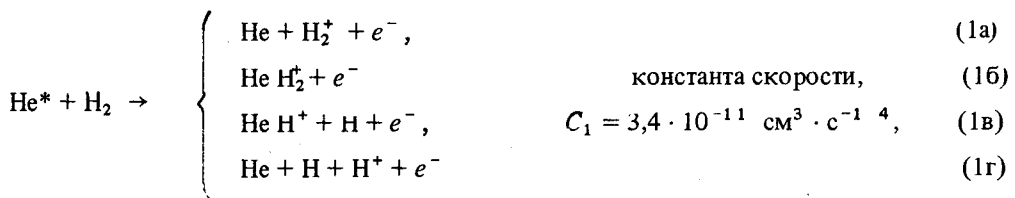
В.А.Картошкин, Г.В.Клементьев, В.Д.Мельников

Используя оптическое детектирование магнитного резонанса поляризованных в гелий-водородной плазме атомов H, определена константа скорости передачи электронной ориентации от атомов H атомам  $He^*(2^3S_1)$ , что впервые позволило получить экспериментальное значение константы скорости спинового обмена при столкновении атомов  $He^*$  и H.

При столкновении атомов гелия в метастабильном  $2^3S_1$  состоянии с атомами водорода в основном  $1^2S_{1/2}$  состоянии возможны процессы спинового обмена и хемоионизации, называемой часто пеннингговской ионизацией. В то время как хемоионизация исследована весьма хорошо<sup>1,2</sup>, никаких данных нет о константе скорости спинового обмена, что объясняется трудностью разделения этих двух процессов. В настоящей работе используется возможность определения константы скорости спинового обмена, возникающая при поляризации атомов  $He^*$  и H в гелий-водородной плазме<sup>3</sup>. Сущность применяемого метода заключается в анализе наблюдаемых при одинаковых условиях эксперимента сигналов магнитного резонанса поляризованных атомов H и  $He^*$ .

В камере поглощения, заполненной смесью  $He^4$  (0,36 торр при 300 К) и  $H_2$  (0,01 ÷ 0,02 торр), возбуждался газовый разряд и осуществлялась оптическая ориентация метастабильных атомов  $He^*$  (спин  $S = 1$ ) в продольном магнитном поле  $H_0$  с помощью циркулярно поляризованного резонансного излучения (переход  $2^3S_1 \rightarrow 2^3P_{0,1,2}$ ,  $\lambda = 1,08$  мкм).

Ориентация  $2^3S_1$  атомов гелия  $\langle S_{He} \rangle = Tr(S_{He} \rho_{He})$  ( $\rho_{He}$  – матрица плотности атомов  $He^*$  ( $3 \times 3$ ),  $Tr \rho_{He} = 1$ ) зависела от условий накачки и релаксации, определяемой в основном процессом



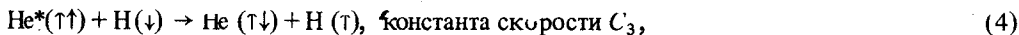
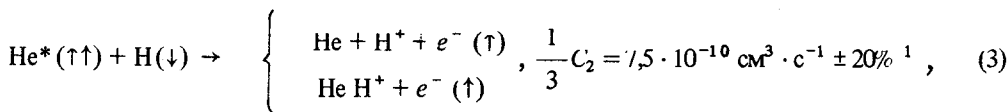
В результате этого процесса, в основном благодаря реакции хемодиссоциации (1в), происходит передача углового момента от поляризованных атомов  $He^*$  атомам H. Передаваемый в единицу времени момент количества движения

$$q = \frac{1}{2} \alpha N_{He^*} N_{H_2} C_1 \langle S_{He} \rangle, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – доля передаваемой атомам H ориентации, составляющая 0,2 согласно<sup>3</sup>,  $N_i$  – концентрации соответствующих частиц.

Электронная ориентация атомов водорода  $\langle S_H \rangle = Tr(S_H \rho_H)$  ( $\rho_H$  – электронная часть матрицы плотности атомов H ( $2 \times 2$ ),  $Tr \rho_H = 1$ ) возникает главным образом за счет процесса (1)<sup>3</sup> и определяется величиной  $q$  и релаксационными процессами, основным из которых является диффузия атомов водорода к стенкам камеры поглощения.

В эксперименте наблюдалось изменение поглощения атомами  $\text{He}^*$  света накачки  $1,08 \text{ мкм}$  при включении резонансного магнитного поля  $H_1 \cos \omega t$ . Оптическая регистрация магнитного резонанса атомов  $\text{H}$  возможна благодаря связи ориентаций  $\langle S_{\text{H}} \rangle$  и  $\langle S_{\text{He}} \rangle$  за счет процессов



где стрелками указаны ориентации электронных спинов.

Наблюдаемые резонансные сигналы пропорциональны изменениям ориентации  $\langle S_{\text{He}} \rangle$  при магнитном резонансе атомов  $\text{He}^*$  или  $\text{H}$  и в условиях стационарной плазмы ( $N_{\text{He}^*} = \text{const}$ ,  $N_{\text{H}} = \text{const}$ ), согласно формулам (20) и (21) работы <sup>3</sup>, определяются выражениями:

$$A^{\text{H}} = |\Delta \langle S_{\text{He}} \rangle^{\text{H}}| = \frac{\phi_p r_1 r_2}{p_1 d} \omega_1^2 \frac{p_1 p_2 / d}{p_2^2 + \Delta \omega^2 + \omega_1^2 p_1 p_2 / d}, \quad (5)$$

$$A^{\text{He}} = |\Delta \langle S_{\text{He}} \rangle^{\text{He}}| = \frac{\phi_p p_2}{d} (2\omega_1)^2 \frac{p_1 p_2 / d}{p_1^2 + \Delta \omega^2 + (2\omega_1)^2 p_1 p_2 / d}, \quad (6)$$

где  $\phi_p$  определяется условиями накачки,  $p_1$  и  $p_2$  — гибелью ориентаций  $\text{He}^*$  и  $\text{H}$ ,  $r_1$  и  $r_2$  — передачей электронной ориентации от атомов  $\text{H}$  атомам  $\text{He}^*$  и обратно,  $d = p_1 p_2 - r_1 r_2$ ,  $\Delta \omega = \omega - \omega_0$ ,  $\omega_0 = \gamma H_0$ ,  $\omega_1 = \gamma H_1$ ,  $\gamma$  — гиромагнитное отношение для атомов  $\text{He}^*$ .

В рассматриваемом случае  $p_1 = N_{\text{H}_2} C_1 + \pi \Delta f_{\text{He}^4}$ ,  $p_2 = \pi \Delta f_{\text{H}}$ ,  $r_1 = 4/9 N_{\text{H}} C_2 + 4/3 N_{\text{H}} C_3$ ,  $r_2 = \alpha N_{\text{He}^*} N_{\text{H}_2} C_1 / 2N_{\text{H}}$ , где  $\Delta f_{\text{H}}$ ,  $\Delta f_{\text{He}^4}$  — экстраполированные к нулевому значению  $H_1$  ширины резонансных линий атомов  $\text{H}$  (в смеси  $\text{He}^4 - \text{H}_2$ ) и  $\text{He}^*$  (в чистом изотопе  $\text{He}^4$ ). Подстановка этих выражений в (5), (6) дает при  $\omega_1^2 \rightarrow \infty$  отношение амплитуд сигналов

$$\frac{A_{\text{max}}^{\text{H}}}{A_{\text{max}}^{\text{He}}} = \frac{r_1 r_2}{p_1 p_2} = \frac{\alpha N_{\text{He}^*} C_{\text{H} - \text{He}^*}}{2\pi \Delta f_{\text{H}} (1 + \pi \Delta f_{\text{He}^4} / N_{\text{H}_2} C_1)}, \quad (7)$$

где  $C_{\text{H} - \text{He}^*} = \frac{4}{9} C_2 + \frac{4}{3} C_3$ .

Отсутствие в (7) концентрации атомов водорода объясняется тем, что накапливаемый ансамблем атомов угловой момент не зависит, согласно (2), от  $N_{\text{H}}$ . Именно эта независимость и позволяет весьма простым образом найти константу скорости  $C_{\text{H} - \text{He}^*}$ . Для этого нужно измерить в режиме, близком к радиочастотному насыщению, величины  $A_{\text{max}}^{\text{H}}$  и  $A_{\text{max}}^{\text{He}}$  (при одинаковой интенсивности света накачки, разряда и одном и том же коэффициенте усиления регистрирующего тракта), а также  $\Delta f_{\text{H}}$ ,  $\Delta f_{\text{He}^4}$  и  $N_{\text{He}^*}$ . Концентрация метастабильных атомов гелия определялась по поглощению гелиевой линии  $3888 \text{ \AA}$  (переход  $2^3 S_1 \rightarrow 3^3 P$ ). Эта величина была всегда больше  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ , что обеспечивало малый вклад в резонансный сигнал атомов  $\text{H}$  от изменения концентрации атомов  $\text{He}^*$  в момент резонанса.

В эксперименте анализировалась производная сигнала поглощения. Поэтому следовало учитывать возможность различия ширин двух резонансных линий. Соответствующая поправка не нужна в случае одинаковых ширин, что легко достигалось путем изменения амплитуды радиочастотного магнитного поля. Необходимо было также учесть и то, что в случае

резонанса в системе зеемановских подуровней атомов Н происходит два перехода между подуровнями с разными значениями квантового числа  $m_F$  ( $\Delta m_F = 1$ ,  $\Delta F = 0$ ).

Измерения проводились при разных значениях концентраций  $\text{He}^*$  и  $\text{H}_2$ . В результате была определена константа скорости передачи электронной ориентации от атомов Н ( $1^2S_{1/2}$ ) атомам  $\text{He}^*$  ( $2^3S_1$ ) при  $T = 295 \text{ K}$  —  $C_{\text{H} - \text{He}^*} = (2,35 \pm 0,45) \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ .

Из этой величины можно выделить часть, связанную со спиновым обменом, используя приведенное выше значение константы скорости пеннингговского процесса (3) из <sup>1</sup>, которое совпадает с рассчитанным нами на основании потенциалов взаимодействия <sup>5</sup> и согласуется с экспериментальными данными <sup>2</sup>. Это дает для константы скорости спинового обмена в системе  $\text{He}^* - \text{H}$  при  $T = 295 \text{ K}$  величину  $C_3 = (1,01 \pm 0,37) \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ .

#### Литература

1. *Bell K.L.* J. Phys., 1970, В3, 1308.
2. *Shaw M.J., Bolden R.S., Hemsworth R.S., Twiddy N.D.* Chem. Phys. Lett., 1971, 8, 148.
3. *Дмитриев С.П., Житников Р.А., Картошкин В.А., Клементьев Г.В., Мельников В.Д.* ЖЭТФ, 1983, 85, 840.
4. *Житников Р.А., Картошкин В.А., Клементьев Г.В.* Письма в ЖЭТФ, 1977, 26, 651.
5. *Hickman A.P., Isaacson A.D., Miller W.H.* J. Chem. Phys., 1977, 66, 1483.

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
19 декабря 1983 г.