

02;07

## Константа скорости спин-обменного взаимодействия метастабильных атомов гелия с атомами рубидия

© С.П. Дмитриев, Н.А. Доватор, В.А. Картошкин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: victor, kart@mail.ioffe.ru

В окончательной редакции 20 февраля 2008 г.

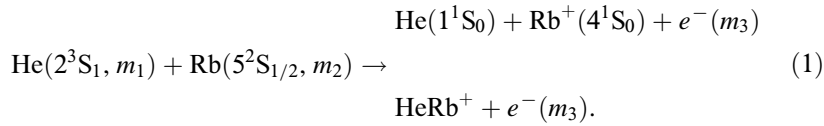
В экспериментах по оптической ориентации метастабильных атомов гелия в присутствии атомов рубидия впервые измерена константа скорости спинового обмена в системе  $\text{He}(2^3\text{S}_1)\text{--Rb}(5^2\text{S}_{1/2})$ . Установлено, что для интервала температур  $T = (293 \div 348)$  К константа скорости спинового обмена  $C_{se} = (1.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Одновременно была измерена константа скорости хемоионизации  $C_{ci}$  при столкновении этих же частиц, которая оказалась равной  $(3.1 \pm 0.6) \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

PACS: 52.20.-j, 52.20.Hv

Исследования атомных столкновений, происходящих в щелочно-гелиевой плазме, представляют интерес как для атомной физики, так и для практических применений, например, при разработке квантовых магнитометров [1]. При столкновении метастабильных атомов гелия со щелочными атомами, находящимися в основном состоянии, одновременно протекают два типа процессов — неупругий (хемоионизация) и упругий (спиновый обмен). Если константа скорости первого из этих процессов в настоящее время является достаточно хорошо известной величиной как из экспериментальных [2], так и из теоретических работ [3,4], то константы скорости спинового обмена в столкновениях  $2^3\text{S}_1$ -метастабильных атомов гелия с  $n^2\text{S}_{1/2}$ -щелочными атомами до сих пор были определены только теоретически [5,6]. Экспериментально константа скорости спинового обмена была определена только для системы  $\text{He}(2^3\text{S}_1)\text{--Cs}(6^2\text{S}_{1/2})$  [7]. Это связано с тем, что в экспериментах с поляризованными частицами, которые традиционно применяются для измерения константы скорости спинового обмена [8], трудно разделить два одновременно протекающих спин-зависимых процесса.

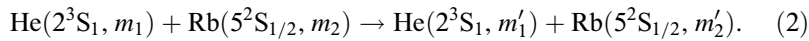
В настоящей работе впервые экспериментально определена константа скорости спинового обмена при столкновении поляризованного метастабильного атома гелия с атомом рубидия в основном состоянии.

При столкновении возбужденных метастабильных атомов гелия в  $2^3S_1$ -состоянии с атомами рубидия в основном  $5^2S_{1/2}$ -состоянии происходит ионизация атомов рубидия за счет высокой внутренней энергии возбуждения метастабильных атомов гелия ( $E = 19.82 \text{ eV}$ ), т. е. имеет место следующая реакция:



Процесс (1) происходит со скоростью  $1/\tau_{ci}$  (для метастабильных атомов гелия  $1/\tau_{ci} = N_{\text{Rb}}C_{ci}$ , где  $N_{\text{Rb}}$  — концентрация атомов рубидия,  $C_{ci}$  — константа скорости хемоионизации). Реакция (1) разрешена, когда полный спин системы на входе реакции равен полному спину на выходе реакции (здесь  $m_i$  — проекция электронного спина соответствующей частицы на выделенное направление).

Вторым процессом, который протекает одновременно с хемоионизацией, является спиновый обмен:



Причем  $m_1 + m_2 = m'_1 + m'_2$  при сохранении полного спина системы. Процесс (2) происходит со скоростью  $1/\tau_{se}$  (для метастабильных атомов гелия  $1/\tau_{se} = N_{\text{Rb}}C_{se}$ , где  $C_{se}$  — константа скорости спинового обмена).

В настоящей работе рассматривается взаимодействие атомов  $^{87}\text{Rb}$  с оптически поляризованными атомами гелия, находящимися в  $2^3S_1$ -состоянии. В зависимости от того, линейно или циркулярно поляризованное излучение используется для поляризации метастабильных атомов гелия, в системе зеемановских подуровней этих атомов может быть создано как выстраивание ( $\langle Q_{\text{He}} \rangle$ ), так и ориентация ( $\langle S_{\text{He}} \rangle$ ).

Следуя [7], можно показать, что скорости разрушения продольных компонент ориентации  $\langle S_{\text{He}} \rangle^z$  и выстраивания  $\langle Q_{\text{He}} \rangle^{zz}$  метастабильных атомов гелия зависят от столкновительных процессов типа (1) и (2)

следующим образом:

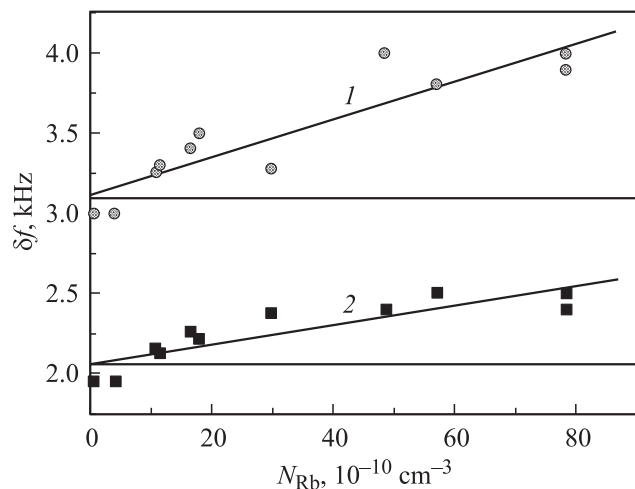
$$1/\tau_{or} = \pi \delta f_{or} = N_{Rb}(1/3C_{ci} + 1/2C_{se}), \quad (3)$$

$$1/\tau_{al} = \pi \delta f_{al} = N_{Rb}(1/3C_{ci} + 3/2C_{se}). \quad (4)$$

Здесь  $\delta f_{or,al}$  — вклад в ширину линии магнитного резонанса для продольных компонент ориентации и выстраивания атомов гелия, обусловленный процессами (1) и (2).

Как видно из (3) и (4), вклады в ширину линии магнитного резонанса для выстроенных и ориентированных атомов гелия должны отличаться друг от друга. Такое различие и позволяет определить константы скорости двух одновременно протекающих процессов.

В эксперименте использовалась стандартная установка по оптической ориентации атомов. Оптическая ориентация спиновых моментов метастабильных атомов гелия производилась циркулярно-поляризованным, а выстраивание — линейно-поляризованным светом накачки ( $\lambda = 1.08 \mu\text{m}$ ), распространявшимся вдоль магнитного поля  $H_z \cong 35 \text{ mOe}$ , создаваемого кольцами Гельмгольца внутри магнитного экрана. При накачке циркулярно-поляризованным излучением возможно возникновение как ориентации, так и выстраивания. Относительная величина выстраивания в сигнале магнитного резонанса зависит от спектра излучения лампы и толщины оптического слоя в камере поглощения. В нашем эксперименте эта величина не превышала 10%. Оценка величины примеси выстраивания в сигнал магнитного резонанса производилась на основании анализа формы линии сигнала магнитного резонанса метастабильных атомов гелия в соответствии с [9]. В качестве источника накачки использовалась гелиевая капиллярная лампа, в которой возбуждался высокочастотный разряд. Заселение метастабильного состояния осуществлялось путем возбуждения ВЧ-разряда в объеме камеры поглощения, содержащей газ  $^4\text{He}$  ( $P = 1 \text{ Torr}$  при  $T = 300 \text{ K}$ ) и металлический рубидий. Газоразрядная камера помещалась в термостат. Рабочая температура определялась с помощью терморезистора, наклеенного на камеру поглощения в наиболее холодной ее части. Изменение температуры в диапазоне 293–348 K позволяло изменять концентрацию атомов рубидия от  $1 \cdot 10^{10}$  до  $7.8 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ . Для возбуждения магнитного резонанса в системе зеемановских подуровней  $2^3\text{S}_1$ -атомов гелия перпендикулярно магнитному полю  $H_z$  прикладывалось амплитудно-модулированное радиочастотное магнитное поле



Зависимость ширины линии магнитного резонанса выстроенных (1) и ориентированных (2) метастабильных атомов гелия в  $2^3\text{S}_1$  от концентрации атомов рубидия в камере поглощения.

$H_1 = h \sin \Omega t \sin \omega t$ , где  $\Omega/2\pi = 250 \text{ Hz}$ , а  $\omega/2\pi$  — частота радиополя была  $\sim 100 \text{ kHz}$ . В эксперименте регистрировалось изменение (на частоте модуляции  $\Omega$ ) интенсивности света накачки, прошедшего через камеру поглощения, при сканировании частоты  $\omega$  в области магнитного резонанса  $\omega_0 = \gamma H_z$  ( $\gamma/2\pi = 2.8 \text{ MHz/Oe}$  — гиромагнитное отношение для метастабильного  $2^3\text{S}_1$ -состояния гелия). При малых значениях амплитуды радиополя  $h \leq 0.1 \text{ mOe}$  (см. [9]) форма линии магнитного резонанса (как для ориентации, так и для выстраивания атомов гелия) была близка к лоренцевой, а ширина линии магнитного резонанса зависела в основном от релаксационных столкновительных процессов в камере поглощения. Ширина линии определялась на уровне 0.5 от максимальной амплитуды сигнала магнитного резонанса.

Для нахождения искомой константы скорости спинового обмена в эксперименте определялось приращение ширины линии магнитного резонанса (как для ориентированных, так и для выстроенных атомов гелия)  $\delta f_{or,al}$  с увеличением концентрации атомов рубидия при нагреве камеры поглощения:  $\delta f_{or,al} = \Delta f_{or,al}(T) - \Delta f_{or,al}(T_0)$ , где  $\Delta f_{or,al}(T_0)$  — ширина линии при  $T = 300 \text{ K}$  ( $\sim 2 \div 3 \text{ kHz}$ ). Для построения за-

висимостей  $\delta f_{or,al}$  от концентрации атомов Rb ( $N_{Rb}$ ) температура пересчитывалась в значение  $N_{Rb}$  в соответствии с данными работы [10].

В эксперименте было проведено несколько серий измерений по определению зависимости  $\delta f(N_{Rb})$  как для ориентации, так и для выстраивания. Усреднение полученных данных проводилось как внутри каждой серии, так и по всему массиву серий. Пример зависимостей  $\delta f_{or,al}(N_{Rb})$ , полученных для одной из серий экспериментальных измерений, представлен на рисунке.

Как видно из рисунка, вклады в ширины линий магнитного резонанса для ориентированных (2) и выстроенных (1) атомов существенно различаются. Следует заметить, что ширина линии магнитного резонанса поляризованных атомов гелия зависит также от скорости диффузии, спинового обмена с электронами и т.д. В настоящем эксперименте изменение (с увеличением температуры) ширины линии магнитного резонанса, обусловленное этими процессами, не превышало погрешности измерений. Действительно, из (3) и (4) следует, что

$$\pi(\delta f_{al} - \delta f_{or}) = N_{Rb} C_{se}. \quad (5)$$

Величина  $C_{se}$ , определенная из (5), составила  $(1.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . С учетом полученного значения  $C_{se}$  из (3) и (4) была определена также константа скорости хемоионизации  $C_{ci} = (3.1 \pm 0.6) \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Основная погрешность в настоящих измерениях была обусловлена ошибкой, связанной с определением концентрации щелочных атомов.

В заключение необходимо отметить, что если константа скорости спинового обмена определена в настоящей работе впервые, то константа скорости хемоионизации без учета статистического множителя (1/3) уже определялась ранее  $(1.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  [2]. Как видно из приведенных результатов, наблюдается удовлетворительное соответствие наших результатов с полученными в работе [2].

## Список литературы

- [1] Блинов Е.В., Гинзбург Б.И., Житников Р.А. // ЖТФ. 1984. Т. 54. С. 287.
- [2] Johnson C.E., Tipton C.A., Robinson P.G. // J. Phys. B. 1978. V. 11. N 5. P. 927.
- [3] Kimura M., Lane N.F. // Phys. Rev. A. 1990. V. 41. N 11. P. 2633.
- [4] Scheibner K.F., Cohen J.S., Martin R.L., Lane N.F. // Phys. Rev. A. 1987. V. 36. N 6. P. 2633.

- [5] Картошкин В.А., Клементьев Г.В. // Опт. и спектр. 2007. Т. 102. № 3. С. 360.
- [6] Картошкин В.А. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 24. С. 32.
- [7] Дмитриев С.П., Доватор Н.А., Картошкин В.А. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 6. С. 36.
- [8] Harper W. // Ann. Phys. (Paris). 1985. V. 10. P. 645.
- [9] Картошкин В.А., Клементьев Г.В., Мельников В.Д. // Опт. и спектр. 1988. Т. 65. В. 4. С. 792.
- [10] Несмеянов А.Н. Давление пара химических элементов. М.: Изд. АН СССР, 1961. С. 396.