

02;12

Экспериментальное определение констант скорости спинового обмена и хемоионизации при столкновении поляризованных метастабильных 2^3S_1 -атомов гелия с $3^2S_{1/2}$ -атомами натрия

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: victor.kart@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 17 марта 2009 г.)

Впервые приводятся экспериментальные данные по константам скорости спинового обмена для системы $\text{He}(2^3S_1)\text{--Na}(3^2S_{1/2})$. Проведенные в работе измерения показали, что константа скорости спинового обмена равна $C_{se} = (23 \pm 11) \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, а константа скорости хемоионизации — $C_{ci} = (29 \pm 14) \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ при температуре 420 К. Проводится сравнение полученных результатов с расчетными данными по константам скорости.

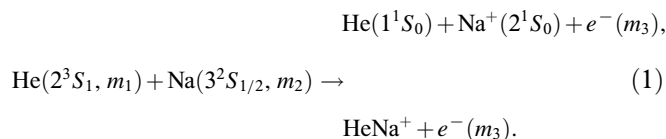
PACS: 34.50.-s, 82.40.Dm

При взаимодействии метастабильных спин-поляризованных атомов с атомами щелочных металлов одновременно протекают два процесса — упругий и неупругий. Неупругий процесс обусловлен ионизацией щелочного атома за счет внутренней энергии возбуждения метастабильного гелия (19.82 eV), одновременно с ионизацией протекает и упругий процесс — спиновый обмен, т.е. имеет место обмен валентными электронами между сталкивающимися частицами. В экспериментах по оптической ориентации атомов оба процесса приводят к изменению ширины линии магнитного резонанса атомов, поскольку вызывают изменение времени релаксации поляризованных атомов. Можно показать, что значения времени релаксации ориентированных и выстроенных атомов существенным образом различаются для упругого и неупругого процессов.

До настоящего времени константы скорости спин-обменного процесса и хемоионизации были измерены при столкновениях метастабильных атомов гелия в триплетном состоянии с атомами Rb и Cs в основном состоянии [1,2]. Ранее в [3] для системы метастабильный гелий—атом Na в основном состоянии были проведены расчеты интересующих сечений с использованием комплексных потенциалов взаимодействия [4]. Таким образом, в настоящей работе не только впервые определена константа скорости спинового обмена, но и появилась возможность сравнить экспериментальные и расчетные значения.

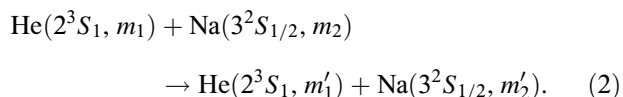
При столкновении возбужденных атомов гелия в 2^3S_1 -состоянии с атомами натрия в основном $3^2S_{1/2}$ -состоянии происходит ионизация атомов натрия за счет высокой внутренней энергии возбуждения метастабильных атомов гелия ($E = 19.82 \text{ eV}$). При этом если один из партнеров столкновения предварительно был поляризован тем или иным образом, то эта поляризация может быть передана другому партнеру столкновения, если в процессе столкновения сохраняется полный спин

системы. В случае хемоионизации имеем



Процесс (1) происходит со скоростью $1/\tau_1^i = C_{ci}N_i$, где C_{ci} — константа скорости хемоионизации, N_i — концентрация метастабильных атомов гелия или атомов натрия в основном состоянии. Реакция (1) разрешена, когда сумма проекций электронных спинов на входе реакции ($m_1 + m_2$) равна сумме проекций на выходе реакции — m_3 (здесь m_i — проекция электронного спина соответствующей частицы).

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 $1/\tau_2^j = C_{se}N_i$, где C_{se} — константа скорости спинового обмена, N_i — концентрация метастабильных атомов гелия или атомов натрия в основном состоянии.

В работе рассматривается взаимодействие атомов Na 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 могут быть созданы как выстраивание ($\langle Q_{\text{He}} \rangle$), так и ориентация ($\langle S_{\text{He}} \rangle$).

Следуя [1], 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:

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

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

Здесь δf_{or} и δf_{al} — ширины линий магнитного резонанса ориентированных и выстроенных метастабильных атомов, N_{Na} — концентрация атомов натрия в камере поглощения. Как видно из (3), разрушение продольных компонент ориентации и выстраивания при спиновых обменных и ионизационных столкновениях происходит пропорционально коэффициентам, стоящим перед соответствующими константами скорости в выражениях (3). Таким образом, выделив из ширины линии магнитного резонанса вклады, связанные с процессами (1) и (2), и используя соотношения (3), оказывается возможным определить интересующие нас константы скорости.

В эксперименте использовалась стандартная установка по оптической ориентации атомов. 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 от толщины оптического слоя в камере поглощения. В нашем эксперименте эта величина не превышала 10%.

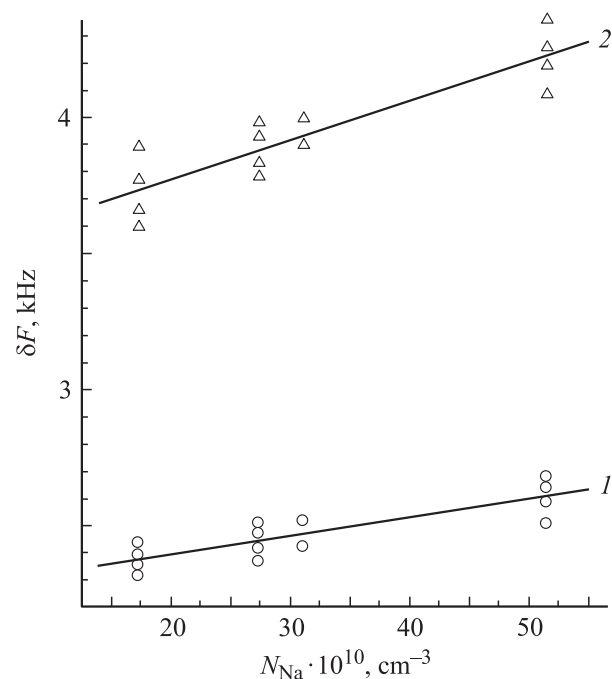
Оценка величины примеси выстраивания в сигнал магнитного резонанса производилась на основании анализа формы линии сигнала магнитного резонанса метастабильных атомов гелия в соответствии с [5]. В качестве источника накачки использовалась гелиевая капиллярная лампа, в которой возбуждался высокочастотный разряд. Заселение метастабильного состояния осуществлялось путем возбуждения ВЧ-разряда в объеме камеры поглощения, содержащей газ ^4He ($P = 0.5 \text{ Torr}$ при $T = 300 \text{ K}$) и металлический натрий. Газоразрядная камера помещалась в термостат. Рабочая температура определялась с помощью терморезистора, наклеенного на камеру поглощения в наиболее холодной ее части.

Измерения проводились в диапазоне значений температуры от 300 до 450 K, что позволяло изменять концентрацию атомов натрия \sim от 10^6 до 10^{11} cm^{-3} . При температуре ниже 400 K уширения линий гелия практически не наблюдалось, при температуре выше 440 K в ширине сигнала при накачке циркулярно поляризованным светом становится существенным вклад выстраивания, создаваемого этим светом. В связи с этим рабочим интервалом для проведения исследований был выбран интервал температур \sim от 420 до 440 K. Изменение температуры в этом диапазоне позволяло изменять концентрацию атомов цезия от $1.7 \cdot 10^{11}$ до $5.1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$.

Для построения зависимостей ширины линий магнитного резонанса от концентрации атомов натрия (N_{Na}) температура пересчитывалась в значениях N_{Na} в соответствии с данными работы [6].

Для возбуждения магнитного резонанса в системе зеемановских подуровней 2^3S_1 -атомов гелия перпендикулярно магнитному полю H_z прикладывалось амплитудно-модулированное радиочастотное магнитное поле $H_1 = h \sin \Omega t \sin \omega t$, 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 Ω) интенсивности света накачки, прошедшего через камеру поглощения, при сканировании частоты ω в области магнитного резонанса $\omega_o = \gamma H_z$ ($\gamma/2\pi = 2.8 \text{ MHz/Oe}$ — гиромагнитное отношение для метастабильного 2^3S_1 -состояния гелия). При малых значениях амплитуды радиополя $h \leq 0.1 \text{ mOe}$ (см. [5]) 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.

На рисунке представлена зависимость ширины линии магнитного резонанса ориентированных и выстроенных атомов гелия в зависимости от концентрации щелочных атомов в камере поглощения. Из наклона представленных на рисунке прямых можно получить интересующие нас зависимости ширины линии δf_{or}



Зависимости ширины линий магнитного резонанса ориентированных (1) и выстроенных (2) метастабильных атомов гелия от концентрации атомов натрия в основном состоянии.

Константы скорости хемоионизации C_{ci} и спинового обмена C_{se} для системы $\text{He}(2^3S_1)\text{--Na}(3^2S_{1/2})$. Константы скорости приведены в единицах $10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

| T , К | C_{se} | C_{ci} |
|-------------------|-------------|--------------|
| 440 ¹⁾ | — | 15.3 ± 3 |
| 420 ²⁾ | 23 ± 11 | 29 ± 14 |
| 400 ³⁾ | 8.8 | 16 |

Примечание: ¹⁾ — эксперимент [7], ²⁾ — настоящая работа, ³⁾ — расчет [3].

и δf_{al} от концентрации атомов натрия в камере поглощения (N_{Na}). Используя выражение (3), получим: $C_{se} = \pi(\delta f_{al} - \delta f_{or})/N_{\text{Na}} = 23 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ и $C_{ci} = \pi(3\delta f_{or} - \delta f_{al})1.5/N_{\text{Na}} = 29 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Погрешность определения констант скорости составляет $\sim 50\%$.

Как уже отмечалось выше, константы скорости хемоионизации определялись ранее другими авторами, причем, как видно из выражений (3), в экспериментах определяется величина, равная $1/3 C_{ci}$. Измеренная в [7] величина оказалась равной $1/3 C_{ci} = (5.1 \pm 1.0) \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ при температуре 440 К. Как видно, эта величина достаточно хорошо согласуется с определенной в настоящей работе константой скорости. Экспериментальных данных по константе скорости спинового обмена для исследуемой системы до настоящей работы не было.

Ранее в [3] были рассчитаны константы скорости хемоионизации и спинового обмена с использованием данных по потенциалам взаимодействия квазимолекулы HeNa^* . Было установлено, что $C_{ci} = 16 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, а $C_{se} = 8.8 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ при температуре 400 К. В таблице приведены данные по константам скорости хемоионизации и спинового обмена для системы $\text{He}(2^3S_1)\text{--Na}(3^2S_{1/2})$.

Список литературы

- [1] Дмитриев С.П., Доватор Н.А., Картошкин В.А. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66. № 3. С. 145.
- [2] Дмитриев С.П., Доватор Н.А., Картошкин В.А. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 16. С. 30.
- [3] Картошкин В.А. // Опт. и спектр. 1998. Т. 85. № 2. С. 196.
- [4] Hotoz H., Niehaus A. // Z. Phys. 1970. Bd. 238. S. 452.
- [5] Картошкин В.А., Клементьев Г.В., Мельников В.Д. // Опт. и спектр. 1988. Т. 65. № 4. С. 792.
- [6] Несмеянов А.Н. Давление пара химических элементов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 396.
- [7] Johnson C.E., Tipton C.A., Robinson P.G. // J. Phys. B. 1978. Vol. 11, N 5. P. 927.