

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ СПИНОВОГО ОБМЕНА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМОВ ГЕЛИЯ С АТОМАМИ ЦЕЗИЯ В ОСНОВНОМ СОСТОЯНИИ

С.П.Дмитриев, Н.А.Доватор, В.А.Картошкин¹⁾

*Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН
194021 Санкт-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 16 июня 1997 г.

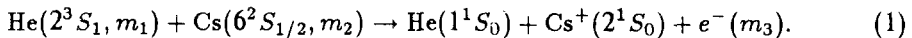
В работе определена константа скорости спинового обмена в системе метастабильный атом гелия – атом щелочного металла. В эксперименте по оптической ориентации атомов экспериментально установлено, что константа скорости спинового обмена при столкновении метастабильного 2^3S_1 -атома гелия с атомом цезия в основном $6^2S_{1/2}$ -состоянии равна $(2.8 \pm 0.8) \cdot 10^9 \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, одновременно определена и константа скорости хемоионизации атомов цезия метастабильными атомами гелия, которая оказалась равной $(1.0 \pm 0.3) \cdot 10^9 \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$.

PACS: 52.20.-j

Исследования атомных столкновений, происходящих в щелочно-гелиевой плазме представляют интерес не только для атомной физики, но и для прикладных применений, например, при разработке новых типов квантовых магнитометров [1]. При столкновениях метастабильных атомов гелия со щелочными атомами одновременно протекают два типа процессов – неупругий (хемоионизация) и упругий процессы (спиновый обмен). Однако, если константа скорости первого из этих процессов в настоящее время является хорошо известной (см. [2,3]), то константа скорости спинового обмена в столкновениях 2^3S_1 -метастабильных атомов гелия с $n^1S_{1/2}$ -щелочными атомами до сих пор не была определена. Это связано с тем, что в экспериментах с поляризованными частицами, которые традиционно применяются для измерения константы скорости спинового обмена [4], трудно разделить два одновременно протекающих спин-зависимых процесса.

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

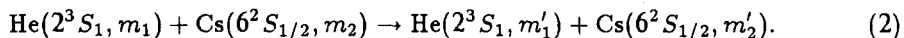
При столкновении возбужденных метастабильных атомов гелия 2^3S_1 -состоянии с атомами цезия в основном $6^2S_{1/2}$ -состоянии происходит ионизация атомов цезия за счет высокой внутренней энергии возбуждения метастабильных атомов гелия ($E = 19.82 \text{ эВ}$). То есть имеет место следующая реакция:



Процесс (1) происходит со скоростью $1/\tau_{ci}$. Реакция (1) разрешена, когда полный спин системы на входе реакции равен полному спину на выходе реакции (здесь m_i – проекция электронного спина составляющей частицы на выделенное направление).

¹⁾ e-mail: victor@kart.ioffe.rssi.ru

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 $1/\tau_{se}$.

В настоящей работе рассматривается взаимодействие атомов ^{133}Cs с оптически поляризованными атомами гелия, находящимися в 2^3S_1 -состоянии. Причем атомы гелия могут быть как выстроенными, так и ориентированными вдоль постоянного магнитного поля H_z . Можно показать [5], что скорости разрушения 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:

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

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

Здесь N_{Cs} – концентрация атомов цезия, C_{ci} и C_{se} – константы скорости хемоионизации и спинового обмена, $\delta f_{or,al}$ – 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. Именно такое различие и позволяет определить константы скорости двух одновременно протекающих процессов.

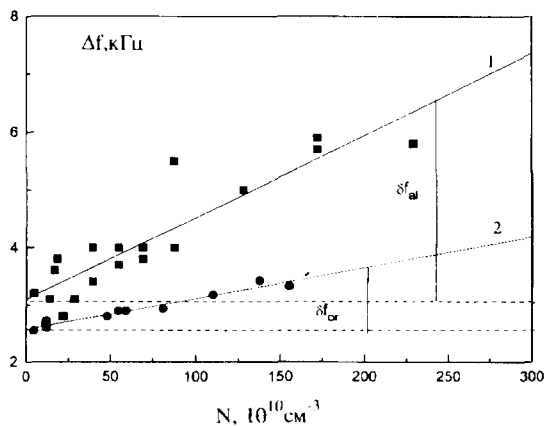
В эксперименте использовалась стандартная установка для исследования оптической ориентации атомов. Оптическая ориентация спиновых моментов метастабильных атомов гелия производилась циркулярно-поляризованным²⁾, а выстраивание – неполяризованным светом накачки ($\lambda = 1.08$ мкм), распространявшимся вдоль магнитного поля $H_z \cong 35$ мЭ, создаваемого кольцами Гельмгольца внутри магнитного экрана. 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 ($P = 1$ торр при $T = 300$ К) и металлический цезий. Газоразрядная камера помещалась в термостат. Рабочая температура определялась с помощью терморезистора, наклеенного на камеру поглощения в наиболее холодной ее части. Изменение температуры в диапазоне 393 – 343 К позволяло регулировать концентрацию атомов цезия от $2.7 \cdot 10^{10}$ до $2.5 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$. Для возбуждения магнитного резонанса в системе зеемановских подуровней 2^3S_1 -атомов гелия перпендикулярно магнитному полю H_z прикладывалось амплитудно-модулированное радиочастотное магнитное поле $H_1 = \hbar \sin \Omega t \sin \omega t$, где $\Omega/2\pi = 250$ Гц, а $\omega/2\pi$ – частота радиополя была ~ 100 кГц. В эксперименте регистрировалось изменение (на частоте модуляции Ω) интенсивности света накачки, прошедшего через камеру поглощения, при сканировании частоты ω в области магнитного резонанса $\omega_0 = \gamma H_z$ ($\gamma/2\pi = 2.8$ МГц/Э). При малых значениях амплитуды радиополя

²⁾ 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%.

$h \leq 0.1 \text{ мЭ}$ (см. [6]) 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 выстроенных атомов гелия) $\delta f_{or,al}$ с увеличением концентрации атомов цезия 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 $T = 300 \text{ К}$ ($\sim 2 \div 2 \text{ кГц}$). Для построения зависимостей $\delta f_{or,al}$ от концентрации атомов Cs (N_{Cs}), температура пересчитывалась в значение N_{Cs} в соответствии с данными работы [7].

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



Зависимость ширины линии магнитного резонанса ориентированных (2) и выстроенных (1) метастабильных атомов гелия от концентрации атомов цезия в основном состоянии (N_{Cs}). $\delta f_{or,al}$ – уширение линии магнитного резонанса обусловленное процессами спинового обмена и хемоионизации для ориентированных и выстроенных атомов

Как видно из рисунка в ширины линий магнитного резонанса для ориентированных (2) и выстроенных (1) атомов существенно различаются³⁾. Действительно, из (3) и (4) следует, что:

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

Величина C_{se} , определенная из (5) составила $(2.8 \pm 0.8) \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$. С учетом полученного значения C_{se} из (3) и (4) была определена также константа скорости хемоионизации $C_{ci} = (1.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$. Следует отметить, что основная погрешность в настоящих измерениях была обусловлена ошибкой, связанной с определением концентрации щелочных атомов. К этой ошибке

³⁾ 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.

приводит как наличие градиентов температуры на поверхности камеры, так и погрешность при измерении ее рабочей температуры.

В заключение необходимо отметить, что если константа скорости спинового обмена определена в настоящей работе впервые, то константа скорости хемоионизации без учета статистического множителя ($1/3 \cdot C_{ci}$) неоднократно определялась ранее ($(0.44 \pm 0.16) \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ [2], $(0.45 \pm 0.09) \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ [3]). Как видно из приведенных результатов, наблюдается удовлетворительное соответствие наших результатов с полученными в работах [2, 3].

В заключение авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку настоящей работы (грант 95-02-04116-а).

-
1. Е.В.Блинов, Б.И.Гинзбург, Р.А.Житников, ЖТФ **54**, 287 (1984).
 2. Ю.А.Толмачев, Д.Фогель, Оптика и спектр. **48**, 818 (1980).
 3. С.Е.Johnson, С.А.Tipton, and P.G.Robinson, J. Phys. B: At. Mol. Phys. **11**, 927 (1978).
 4. W.Happer, Ann. Phys. (Paris) **10**, 645 (1985).
 5. В.А.Картошкин, Г.В.Клементьев, В.Д.Мельников, Письма в ЖЭТФ **39**, 132 (1984).
 6. В.А.Картошкин, Г.В.Клементьев, В.Д.Мельников, Оптика и спектр. **65**, 422 (1988).
 7. I.Langmuir and J.V.Taylor, Phys. Rev. **51**, 753 (1937).