

01;02

Сечения спинового обмена при столкновении метастабильных атомов гелия с атомами лития в основном состоянии

© В.А. Картошкин

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

Поступило в Редакцию 21 мая 2007 г.

Проводится расчет сечений спинового обмена и хемоионизации для системы метастабильный атом гелия–атом лития в основном состоянии. На основании полученных в настоящей работе данных по потенциалам взаимодействия впервые рассчитаны сечения спинового обмена для системы $\text{He}(2^3\text{S}_1)\text{--Li}(2^2\text{S}_{1/2})$. Расчет сечений проведен в интервале энергий столкновения от $5 \cdot 10^{-3}$ до 16 eV.

PACS: 32.80.Cy, 34.20.Gj

При столкновении возбужденных метастабильных атомов гелия в 2^2S_1 -состоянии с атомами щелочных металлов в основном состоянии одновременно протекают два процесса — хемоионизация (ионизация щелочного атома за счет внутренней энергии возбуждения метастабильного атома гелия, которая равна 19.82 eV) и спиновой обмен (обмен валентными электронами между щелочным атомом и метастабильным атомом гелия). Разделить эти процессы оказывается достаточно сложно, так как в традиционных экспериментах по исследованию взаимодействия возбужденных атомов и атомов в основном состоянии регистрируется убыль возбужденных атомов при столкновении, в то время как в процессе спинового обмена этого не происходит, поскольку этот процесс по определению является упругим процессом. К настоящему времени имеется всего одна экспериментальная работа [1], в которой было измерено сечение спинового обмена между метастабильным атомом гелия и атомом Cs в основном состоянии. В [2] были рассчитаны сечения спинового обмена и хемоионизации для систем $\text{He}(2^3\text{S}_1)\text{--Na}(3^2\text{S}_{1/2})$.

Спин-обменные процессы с участием атомов инертных газов и атомов щелочных металлов достаточно активно исследуются. Кроме того, эти процессы находят широкое практическое применение начиная от поиска электрического дипольного момента [3] и до использования в ядерной томографии [4] и квантовой магнитометрии. Всплеск интереса к подобному рода процессам в последнее время вызван тем, что при столкновении имеет место перенос поляризации, т.е. возможна непрямая поляризация одного из участников столкновения, если другой был предварительно поляризован. Причем перенос поляризации возможен как между электронными системами, так и между электронными и ядерными системами [5] сталкивающихся частиц.

Знание величин сечений в таких процессах необходимо, в частности, для создания приборов квантовой электроники, в работе которых используется непрямая поляризация частиц.

Как известно, спин-обменный процесс определяется для ансамбля атомов интерференцией амплитуд упругого рассеяния на термах образующейся в процессе столкновения квазимолекулы. В данном случае это квазимолекула $(\text{HeLi})^*$. Вместе с тем, как показано в [2], наличие одновременно протекающего неупругого процесса — хемоионизации делает непригодными для расчета хорошо известные формулы для сечений спинового обмена [6].

Для расчета искомых сечений необходимо знать параметры потенциалов взаимодействия квазимолекулы $(\text{HeLi})^*$, образующейся в процессе столкновения. При взаимодействии метастабильных атомов гелия, обладающих электронным спином $S_1 = 1$, с атомом лития в основном состоянии (электронный спин $S_2 = 1/2$) образуется квазимолекула, которая может быть описана двумя термами, причем один из них действительный, а другой — комплексный. В хемоионизацию вносит вклад только терм низшей мультиплетности (поперечное сечение процесса — σ^{abs}). Это обусловлено тем, что при хемоионизации на терме высшей мультиплетности не сохраняется полный спин системы, т.е. не выполняется правило Вигнера [7]. В результате этого хемоионизация на квартетном терме запрещена. Наличие неупругого процесса можно учесть введением комплексного потенциала взаимодействия, мнимая часть которого, автоионизационная ширина $(\Gamma(R))$, отвечает за убыль частиц в процессе ионизации [8].

Таким образом, рассматриваемая система может быть описана с помощью двух потенциалов: квартетного $(V_q(R))$, соответству-

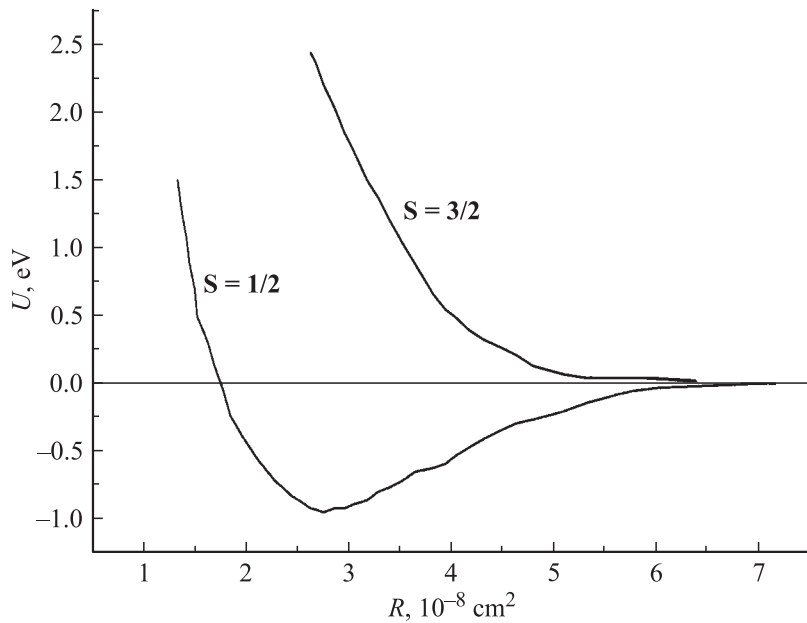


Рис. 1. Потенциалы взаимодействия для системы $\text{He}(2^3S_1)\text{-Li}(2^2S_{1/2})$. Квартетный терм — $V_q(R)$, соответствующий полному спину системы $S = 3/2$, и действительная часть дублетного термина, соответствующего полному спину $S = 1/2$.

ющего полному спину системы $S = 3/2$, и дублетного ($V_d(R) = U(R) - (i/2)\Gamma(R)$), который соответствует полному спину $S = 1/2$. Параметры дублетного термина и автоионизационная ширина были рассчитаны в [9].

Поскольку квартетный $V_q(R)$ и дублетный $V_d(R)$ термы отличаются на величину обменного взаимодействия, то для определения квартетного термина необходимо рассчитать величину обменного взаимодействия $V_{\text{ex}}(R)$. Расчет обменного взаимодействия проводился в соответствии с процедурой, предложенной в [10].

Рассчитанный таким образом в [9] квартетный потенциал и полученный в настоящей работе дублетный потенциал представлены на рис. 1. Приведенные потенциалы взаимодействия вместе с автоионизационной

шириной позволяют полностью описать упругий и неупругий процессы, происходящие при взаимодействии метастабильного атома гелия с атомом лития в основном состоянии и рассчитать интересующие нас поперечные сечения.

В предположении отсутствия переходов между дублетным и квартетным термами сечение „поглощения“, в данном случае сечение хемоионизации, определяется известным соотношением [8]

$$\sigma^{abs} = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) [1 - \exp(-4\lambda_l^d)]. \quad (1)$$

Здесь k — волновой вектор, l — орбитальный момент, λ_l^d — действительная часть фазы рассеяния на дублетном терме.

Для случая, когда спиновый обмен сопровождается хемоионизацией, выражение для сечения спинового обмена имеет вид (случай полных спинов системы $S = 1/2$ и $S = 3/2$) [2]:

$$\sigma^{tr} = \frac{2\pi}{9k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) [1 - \exp(-2\lambda_l^d) \cos 2(\chi_l^d - \eta_l^q) + \exp(-4\lambda_l^d)]. \quad (2)$$

Здесь k — волновой вектор, l — орбитальный момент, λ_l^d — действительная часть фазы рассеяния на дублетном терме, χ_l^d — мнимая часть фазы рассеяния на дублетном терме, η_l^q — фаза рассеяния на квартетном терме.

Расчет фаз рассеяния проводился в квазиклассическом приближении.

Рассчитанные на основании формул (1) и (2) с использованием потенциалов взаимодействия (рис. 1) сечения спинового обмена и хемоионизации приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, по мере роста энергии столкновения от $5 \cdot 10^{-3}$ до 0.16 eV сечение спинового обмена слабо изменяется по величине в интервале от $0.3 \cdot 10^{-14}$ – $0.4 \cdot 10^{-14}$ см², а сечение ионизации находится в интервале от 1.25 до $1.40 \cdot 10^{-14}$ см².

Сравнение полученных в настоящей работе данных с имеющимися в литературе можно провести только в части сечений хемоионизации. К сожалению, в традиционных экспериментах по определению сечений хемоионизации, как правило, не разделяются каналы ионизации, свя-

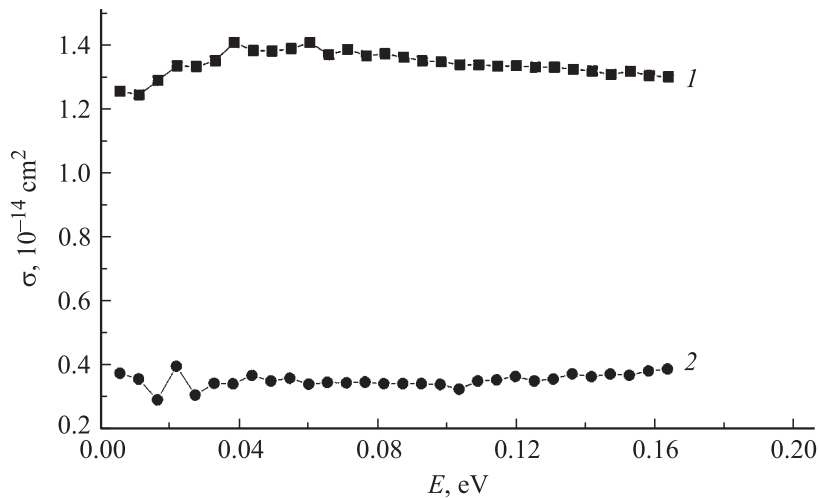


Рис. 2. Зависимости сечений спинного обмена (2) и хемоионизации (1) от энергии сталкивающихся частиц для системы $\text{He}(2^3S_1)\text{-Li}(2^2S_{1/2})$.

занные с триплетным 2^3S_1 и синглетным 2^1S_0 состояниями, которые одновременно присутствуют в газовом разряде. Соотношение триплетного и синглетного состояний в газовом разряде гелия примерно 87 и 13% соответственно (по данным [11]). В [11] приводятся значения для сечения хемоионизации, которое уменьшается от $0.7 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$ при энергии столкновения 0.03 eV до $0.4 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$ при энергии столкновения 0.2 eV. При сравнении экспериментальных и расчетных значений сечений спинного обмена и хемоионизации необходимо учитывать, что при столкновении частиц разрушение поляризации происходит в каждом акте столкновения не полностью, а в соответствии со статфакторами, которые в нашем случае равны 1/3 для хемоионизации. С учетом этого сечение хемоионизации, рассчитанное в настоящей работе, находится в пределах $0.3 \cdot 10^{-14}\text{--}0.4 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$ (см. рис. 1 с учетом статфактора для сечения хемоионизации 1/3). Таким образом, наблюдается достаточно хорошее совпадение результатов [11] с учетом вклада в сечение от синглетного состояния с полученными в настоящей работе данными по сечению хемоионизации.

Список литературы

- [1] *Дмитриев С.П., Доватор Н.А., Картошкин В.А.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 9. С. 36.
- [2] *Картошкин В.А.* // Опт. и спектр. 1998. Т. 85. В. 2. С. 196.
- [3] *Rosenberry M.A., Cupp T.E.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. N 1. P. 22.
- [4] *Middlton H. Magn.* // Reson. Med. 1995. V. 95. N 1. P. 271.
- [5] *Kornack T.W., Romalis M.V.* // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. N 25. P. 25 002.
- [6] *Happer W.* // Rev. Mod. Phys. 1972. V. 44. N 1. P. 169–249.
- [7] *Wigner E.* // Gotting. Nachr. 1927. Bd. 4. S. 375.
- [8] *Garrison B.J., Miller W.H., Schaefer H.F.* // J. Chem. Phys. 1973. V. 59. N 10. P. 3139.
- [9] *Kimura M., Lane N.F.* // Phys. Rev. A. 1990. V. 41. N 11. P. 5938.
- [10] *Смирнов Б.М.* Асимптотические методы в теории атомных столкновений. М.: Атомиздат, 1973. 291 с.
- [11] *Wang D.P., Tang S.N., Neynaber R.H.* // J. Phys. B: Atom. Mol. Phys. 1987. V. 20. N 7. P. 1527.