

02.2; 04

Спиновая поляризация атомов ^{85}Rb при столкновениях с оптически ориентированными метастабильными атомами ^4He в щелочно-гелиевой плазме

© 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

Поступило в Редакцию 14 августа 2015 г.

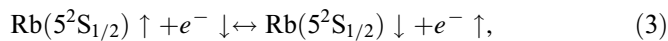
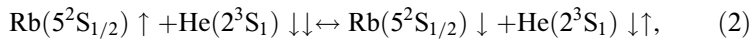
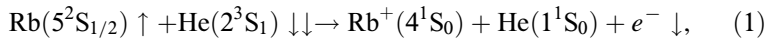
В эксперименте обнаружен сигнал магнитного резонанса $5^2S_{1/2}$ атомов ^{85}Rb по поглощению света гелиевой лампы, осуществлявшей оптическую ориентацию метастабильных 2^3S_1 атомов ^4He в ячейке, содержащей пары щелочного металла и газ гелий при давлении 1 Torr. При этом соотношение сигналов магнитного резонанса для рубидиевых и гелиевых атомов не превышало величину 10^{-2} . Обсуждаются особенности создания и наблюдения столкновительной поляризации атомов рубидия в условиях щелочно-гелиевой плазмы.

Метод непрямой оптической поляризации атомов (благодаря спин-зависимым столкновениям атомов одного сорта с оптически ориентированными атомами другого сорта) не только нашел достаточно широкое применение в экспериментах по исследованию столкновительных процессов с участием атомных частиц, но также оказался полезным при разработке новых приборов квантовой электроники, например при создании щелочно-гелиевых квантовых магнитометров [1], а впоследствии и эталона тока на их основе [2]. В предыдущих экспериментах по непрямой оптической ориентации атомов в щелочно-гелиевой плазме был обнаружен и исследован сигнал магнитного резонанса (МР) метастабильных атомов гелия, приобретающих спиновую поляризацию в результате их столкновений с атомами различных щелочных металлов (Cs, Rb, K, Na), подвергающихся прямой оптической накачке [3,4]. В [5,6] представлены результаты работ, основанные в частности на использовании щелочно-гелиевого магнитометра с оптической накачкой щелочных атомов и непрямой оптической накачкой метастабильных атомов гелия.

В [7] были проведены теоретические исследования и рассчитаны сечения для одновременно протекающих процессов спинового обмена и хемоионизации при столкновении щелочных атомов и метастабильных атомов гелия в условиях эксперимента по оптической ориентации атомов. В то же время в литературе отсутствовали данные об обратной ситуации, а именно об экспериментальном наблюдении поляризации щелочных атомов при их столкновениях с оптически ориентированными атомами гелия. Впервые о наблюдении сигнала МР щелочных атомов (в случае ^{133}Cs) при оптической накачке атомов гелия было сообщено в работе [8]. При этом оказалось, что наблюдаемый сигнал МР (^{133}Cs) почти на три порядка слабее сигнала МР (^4He) метастабильных атомов гелия.

В данной работе был предпринят эксперимент по наблюдению непрямо́й оптической поляризации атомов изотопа рубидия (^{85}Rb) в результате их взаимодействия с 2^3S_1 -атомами ^4He , подвергающихся прямой оптической накачке с помощью излучения от гелиевой лампы.

При столкновениях атомов рубидия с оптически ориентированными атомами гелия в Rb-He газоразрядной плазме перенос поляризации между частицами возможен в следующих случаях:



здесь стрелкой условно обозначено направление электронного спина частицы.

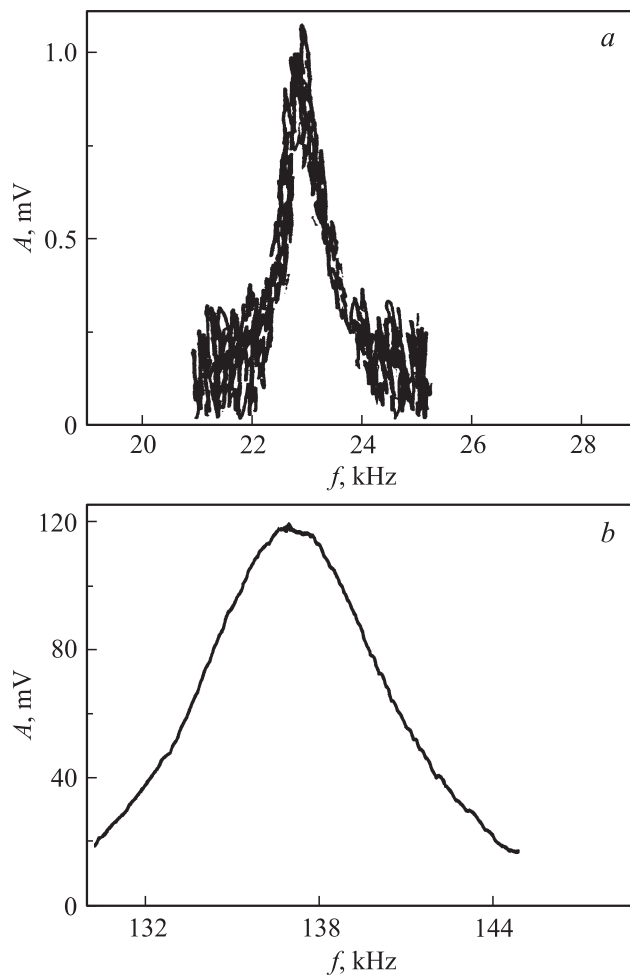
Как следует из приведенных выше реакций, образование в атомном ансамбле атомов рубидия с преимущественной поляризацией валентного электрона \downarrow (совпадающей по направлению с электронной поляризацией атомов гелия) обусловлено, во-первых, неупругим столкновительным процессом (1) (процесс пеннинговской ионизации) и, во-вторых, упругим столкновительным процессом (2), (3) (процесс спинового обмена). В первом случае, из-за того что реакция идет лишь когда сталкивающиеся атомы имеют противоположные направления электронных спинов, в рубидиевом атомном ансамбле будут преобладать атомы со спином \downarrow , так как атомы с противоположно направленным спином будут подвергаться ионизации и уходить из ансамбля нейтральных атомов.

Во втором случае также начнут преобладать атомы с таким же направлением спина, поскольку в процессе спинового обмена происходит передача электронной поляризации от гелия. В результате в полностью неполяризованном рубидиевом атомном ансамбле (первоначально имеющем одинаковое число атомов с валентным электроном со спином \uparrow и спином \downarrow) начнут преобладать атомы с электронным спином \downarrow .

Экспериментальная установка, используемая в описываемом эксперименте, была аналогична той, которая использовалась ранее в эксперименте для пары $^{133}\text{Cs}-^4\text{He}$ [8]. Как и ранее, оптическая ориентация метастабильных атомов гелия осуществлялась в условиях импульсного газового разряда в камере поглощения, содержащей смесь паров щелочного металла (^{85}Rb) и газа гелия (^4He при давлении $P_{\text{He}} \sim 1 \text{ Torr}$). Камера поглощения (с температурой стенок $\sim 44^\circ\text{C}$) размещалась в магнитном экране, который позволял уменьшить вариации лабораторного магнитного поля до уровня $\sim 0.2 \text{ nT}$ при величине постоянного магнитного поля, создаваемого с помощью соленоида, $B = 4.9 \mu\text{T}$. В эксперименте регистрировались как сигнал МР атомов гелия, так и искомый сигнал МР атомов рубидия. Регистрация сигналов МР атомов гелия (в метастабильном 2^3S_1 -состоянии) и атомов рубидия (в основном $5^2\text{S}_{1/2}$ -состоянии) осуществлялась по изменению поглощения света накачки рабочей кюветой при воздействии на атомы резонансным переменным магнитным полем, создаваемым с помощью пары радиочастотных катушек. Источником света накачки служила гелиевая капиллярная лампа, в которой возбуждался ВЧ-разряд. Прежде чем попасть в ячейку, излучение проходило через конденсор и циркулярный поляризатор.

Регистрация сигнала МР при непрямой оптической накачке атомов рубидия была возможна в силу спиновой зависимости процессов (1)–(3). Действительно, разрушение спиновой поляризации атомов рубидия должно приводить к увеличению поглощения света гелиевой лампы, так как открывается канал передачи спиновой поляризации от атомов гелия к атомам рубидия в результате реакций (1)–(3).

На рисунке, *a* представлен сигнал МР атомов рубидия, полученный путем регистрации изменения интенсивности излучения гелиевой лампы на выходе из ячейки. Для сравнения на рисунке, *b* представлен сигнал МР метастабильных атомов гелия. Как и в предыдущем эксперименте (для пары $\text{Cs}-\text{He}$) [8], была зарегистрирована относительно малая величина сигнала МР щелочных атомов. Так соотношение



Сигналы магнитного резонанса атомов рубидия ($A^{\text{He}}(^{85}\text{Rb})$) и гелия ($A^{\text{He}}(^4\text{He})$) в зависимости от частоты, зарегистрированные по изменению поглощения циркулярно-поляризованного излучения гелиевой лампы: a — сигнал магнитного резонанса атомов рубидия (при 8-кратном сканировании частоты радиочастотного генератора через резонанс), b — сигнал магнитного резонанса атомов гелия.

амплитуд резонансных сигналов для гелия и рубидия составило величину: $A_{res}^{\text{He}}(^{85}\text{Rb})/A_{res}^{\text{He}}(^4\text{He}) \sim 10^{-2}$.

Мы полагаем, что основной причиной относительной малости наблюдаемого сигнала является влияние ядерного спина щелочного атома на процесс передачи электронной поляризации от атомов гелия к атомам щелочного металла. Действительно, возникновение электронной поляризации у атомов рубидия в условиях газоразрядной плазмы схематично можно представить следующим образом. Благодаря спин-зависимым процессам (1), (2) происходит передача электронной поляризации от ансамбля поляризованных атомов гелия ансамблю атомов цезия. Поскольку время столкновения атомов порядка 10^{-12} s, что много меньше времени сверхтонкого взаимодействия в Rb ($\sim 10^{-10}$ s), то имеет место обмен только электронной поляризацией. Затем, в интервале между столкновениями из-за сверхтонкой связи между ядерным и электронным спинами атома рубидия происходит перераспределение поляризации между электронной и ядерной системами. Величины ядерного ($I = 5/2$) и электронного ($S = 1/2$) спинов атома рубидия отличаются в пять раз. В процессе столкновения с метастабильным гелием ($S = 1$) атом рубидия получает от поляризованного атома гелия лишь $1/3$ момента, полученного гелием благодаря оптической ориентации. Далее из-за перераспределения поляризации между электронной и ядерной системами рубидия величина электронной поляризации рубидия становится существенно меньше первоначально переданной при столкновении. Электронный момент, полученный атомами рубидия при столкновении с оптически ориентированными метастабильными атомами гелия, делится в промежутке между столкновениями как $5/6$ к $1/6$ в пользу ядерной системы. Таким образом, электронный момент, приобретенный атомом рубидия, оказывается равным $1/18$ от первоначального электронного момента гелия. При возбуждении магнитного резонанса в системе атомов Rb происходит разрушение электронной поляризации атомов рубидия и метастабильный атом гелия при этом „видит“ изменение лишь на $1/27$ от первоначально приобретенного электронного момента атома рубидия.

Таким образом, в результате двух процессов — передачи поляризации от гелия к рубидию и изменения электронной поляризации рубидия при магнитном резонансе — влияние изменения переданной рубидию поляризации на гелий будет существенно меньше по сравнению со случаем отсутствия ядерного спина у рубидия.

В настоящем эксперименте впервые наблюдался сигнал магнитного резонанса $5^2S_{1/2}$ атомов ^{85}Rb по поглощению света гелиевой лампы, осуществлявшей оптическую ориентацию метастабильных 2^3S_1 атомов ^4He . Амплитуда этого сигнала оказалась на два порядка меньше амплитуды сигнала резонанса в 2^3S_1 атомов ^4He . Предполагается, что такое соотношение является результатом взаимодействия электронного и ядерного спинов рубидия в процессе передачи электронной поляризации от гелия к рубидию.

Список литературы

- [1] Блинов Е.В., Житников Р.А., Кулешов П.П. // Оптическая ориентация атомов и молекул. Сб. науч. тр. Л.: ВСООАМ, 1987. С. 12–16.
- [2] Блинов Е.В., Кулешов П.П., Хорев В.Н., Шилов А.Е., Шифрин В.Я. Мера постоянного тока. А.с. (RU 1409993), 1978.
- [3] Keiser G.M., Robinson H.G., Jonson C.E. // Phys. Lett. A. 1975. V. 51. N 1. P. 5.
- [4] Shifrin V.Ya., Khorev V.N., Kalabin V.N. et al. // Phys. Earth Planetary Interiors. 2008. V. 166. Iss. 3–4. P. 147–152.
- [5] Park P.G., Kim Y.G., Kim M.S., Kim W.S. et al. // J. Korean Phys. Soc. 2005. V. 47. Iss. 4. P. 583–585.
- [6] Shifrin V.Y., Park P.G., Khorev V.N. et al. // Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2000). Eds Hunter J., Johnson L. Location: SYDNEY, AUSTRALIA, MAY 14–19, 2000.
- [7] Kartoshkin V.A., Klementiev G.V. // Helium: Characteristics, Compounds, and Applications. N.Y.: NOVA SCIENCE PUBLISHERS, 2011. 232 p.
- [8] Дмитриев С.П., Доватор Н.А., Картошкин В.А., Окуневич А.И. // Опт. и спектр. 2014. Т. 116. В. 2. С. 234.