

СОЗДАНИЕ ЯДЕРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ГАЗЕ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА МИКРОВОЛНОВОЙ НАКАЧКОЙ

С.А.Васильев, А.Я.Катунин, Е.Тюканов ¹⁾,
И.И.Лукашевич

Впервые экспериментально доказана возможность использования микроволновой накачки запрещенного $a \rightarrow c$ -перехода для увеличения степени ядерной поляризации в газе атомарного водорода.

1. Ядерная поляризация в газе атомарного водорода ($H \downarrow\uparrow$) резко замедляет кинетику распада системы и создает возможность для стабилизации больших плотностей и продвижения в область бозе-конденсации. Возникновение спонтанной ядерной поляризации, впервые обнаруженное в работе ¹, связано с выгоранием смешанного спинового состояния a (рис. 1) за счет рекомбинации на поверхности гелиевой пленки по обменному механизму. Применение метода ЭПР позволяет не только непосредственно измерить степень поляризации ядерных спинов ², но и решить принципиальный вопрос о ее увеличении путем микроволновой накачки. В настоящей работе впервые доказана возможность увеличения ядерной поляризации путем накачки запрещенного перехода $a \rightarrow c$. Эксперименты проводились при температуре $T \sim 0,5$ К и плотности $n_H \sim 10^{15} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в магнитном поле $B = 5$ Т. Для регистрации заселенностей спиновых состояний a и b использовался ЭПР 2 мм диапазона на малой рабочей мощности $P \approx 10^{-8}$ Вт, которая при накачке перехода $a \rightarrow c$ увеличивалась до $P \approx 5 \cdot 10^{-4}$ Вт.

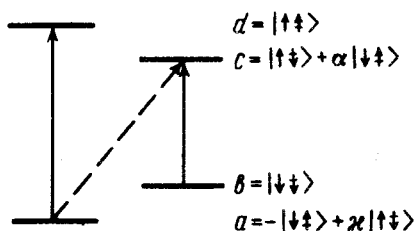


Рис. 1. Схема уровней энергии атома водорода в сильном магнитном поле \downarrow и \uparrow – проекции электронного и ядерного спинов на направление внешнего магнитного поля, $\kappa = A/4\mu_B B$, A – константа СТВ

Попытки создания ядерной поляризации путем накачки разрешенного перехода $a \rightarrow d$ были предприняты в работе ³. Эти эксперименты, однако, не увенчались успехом в силу быстрого ($\sigma = 10^{-15} \text{ см}^2$) процесса спинового обмена $d + b \rightarrow c + a$, эффективно выравнивающего заселенности состояний a и b . В случае накачки запрещенного перехода $a \rightarrow c$ обратный процесс $c + a \rightarrow d + b$, наоборот, дополнительно стимулирует ядерную поляризацию.

2. Создание и стабилизация атомарного водорода производились по хорошо известной методике ⁴ путем диссоциации молекулярного водорода при комнатной температуре и транспортировки пучка атомов по атомопроводу в накопительную камеру, охлаждаемую при помощи рефрижератора гелия-3 до температуры $0,4 \div 0,8$ К. Накопительная камера ($V_0 = 0,8 \text{ см}^3$) сообщается с объемом цилиндрического резонатора ($V_p = 0,02 \text{ см}^3$), являющегося чувствительным элементом ЭПР-спектрометра. Внутренние поверхности стенок накопительной камеры и резонатора были покрыты сверхтекучей пленкой ⁴He с примесью 0,5% ³He. Такая двухкамерная система позволяет существенно в ($V_0/V_p \approx 40$ раз) уменьшить индуцированную рекомбинацию атомов в процессе регистрации линии ЭПР, однако при этом соответственно уменьшается эффективность накачки. Спектрометр ЭПР – гомодинного типа с модуляцией мощности ($f_{\text{мод}} = 10$ кГц) и перестраиваемым генератором (ЛОВ) в диапазоне $\lambda = 1,65 \div 2,55$ мм ⁵. Резонатор спектрометра – сверхразмерный ($\phi = 4,2$ мм, $l =$

¹⁾ Лаборатория Вихури, г. Турку, Финляндия.

$= 3,4 \text{ мм}$), что позволяет работать как на TM_7 , так и на TE -модах, имеющих в спектре его колебаний. Для экспериментов по накачке использовались TE_{113} мода ($f = 138 \text{ ГГц}$), структура которой содержит параллельную постоянному магнитному полю компоненту микроволнового H -поля, необходимую для возбуждения запрещенного $a \rightarrow c$ -перехода.

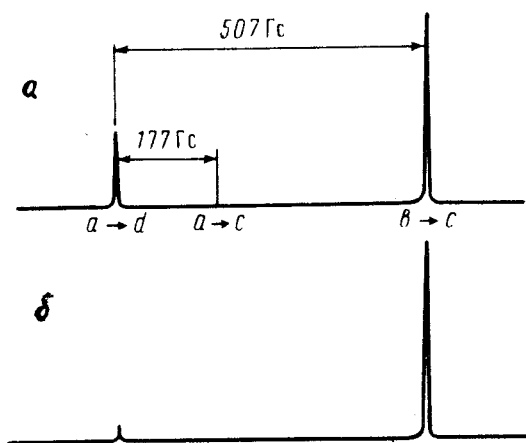


Рис. 2. Спектр ЭПР атомов водорода ($f = 138 \text{ ГГц}$) перед (а) и после (б) накачки перехода $a \rightarrow c$

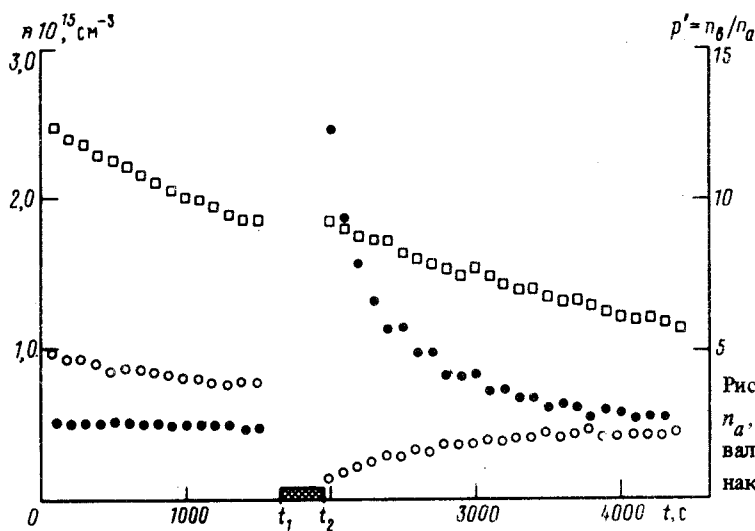


Рис. 3. Кинетика распада газа Н. $\circ - n_a$, $\square - n_b$, $\bullet - p'$. В течение интервала времени $t_1 - t_2$ проводилась накачка перехода $a \rightarrow c$

На рис. 2 представлены типичные спектры атомарного водорода в измерительной камере до и после накачки перехода $a \rightarrow c$. Наблюдаемые линии спектра соответствуют двум разрешенным переходам $a \rightarrow d$, $b \rightarrow c$, измерение площадей под кривыми поглощения которых позволяет вычислить заселенности состояний a и b соответственно. На этом же рисунке указано положение $a \rightarrow c$ -перехода, которое легко найти, используя известные выражения для уровней энергии состояний a, b, c, d в зависимости от величины магнитного поля B_0 ⁶. В момент включения накачки подаваемая в рабочий резонатор СВЧ мощность увеличивается до максимального значения, равного $P_{max} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$. В типичных экспериментах производилось измерение заселенностей состояний a и b в зависимости от времени после накопления образца, а также после накачки перехода $a \rightarrow c$. Результаты одного из таких экспериментов представлены на рис. 3. Как видно, $a \rightarrow c$ накачка увеличивает поляризационное отношение $p' = n_b/n_a$ в 5 раз по сравнению со спонтанно достигаемым значением.

3. Полученные результаты можно объяснить на основе системы уравнений баланса заселенностей состояний a, b, c, d (см., например, ⁷). Обработка имеющихся экспериментальных данных в отсутствие накачки показывает, что величина p' главным образом ограничивается процессом ядерной релаксации первого порядка на магнитных примесях в стенках измерительной камеры. Скорость этого процесса оказалась равной $G_{ab} \sim 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. При плотностях $n_{\text{H}} \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$, воспользовавшись медленностью рекомбинационных процессов, по сравнению с релаксацией на примесях, можно показать, что стационарное значение p' , достигаемое в процессе накачки, определяется выражением

$$p' = \frac{W_{ac}}{G_{ba}} + 1, \quad (1)$$

где W_{ac} — скорость накачки, составляющая в наших условиях $W_{ac} \sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Получаемое из (1) значение p' согласуется с экспериментом.

4. Полученные результаты указывают на реальную возможность использования $a \rightarrow c$ накачки для повышения степени ядерной поляризации в газе $\text{H}\downarrow$. Это представляется особенно привлекательным при создании поляризованных мишеней для ядерно-физических экспериментов.

В частности, в наших экспериментальных условиях ($V_0/V_p \sim 40$) помещение всего объема газа в резонатор позволило бы получить $p' \sim 10^2$. Дальнейшее увеличение p' приблизительно на порядок может быть достигнуто устранением магнитных примесей.

В заключение авторы хотели бы выразить благодарность Кагану Ю.М. и Черноплекову Н.А. за внимание и поддержку работы, Шляпникову Г.В. за плодотворные обсуждения на всех этапах данной работы. Авторы также благодарны Н.И.Филиппову, В.В.Сураеву, В.В.Филиппову и А.И.Сафонову за помощь в подготовке и проведении экспериментов

Литература

1. Cline R.W. et al. Phys. Rev. Lett., 1981, **47**, 1195.
2. Van Yperen G.H. et al. Phys. Rev. Lett., 1983, **50**, 53; Statt B.W. et al. Phys. Rev. B, 1985, **31**, 3169.
3. Mattheij A.P.M. et al. Preprint University of Amsterdam, Netherlands, 1987.
4. Walraven J.T.M., Silvera I.F. Rev. Sci. Instrum. 1982, **53**, 1167.
5. Васильев С.А., Денисенков В.П., Катунин А.Я., и др. В кн.: Физико-химические процессы в преобразователях энергий, М.: МФТИ, с. 51.
6. Рамзей Н. Молекулярные пучки. М.: ИЛ, 1960, с. 72.
7. Silvera I.F., Walraven J.T.M. Progr. in Low Temp. Phys. X ed by D.F.Brewer, Amsterdam; 1986, North Holland.