

О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СЛАБОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
В ПЕРЕХОДАХ СТС АТОМОВ

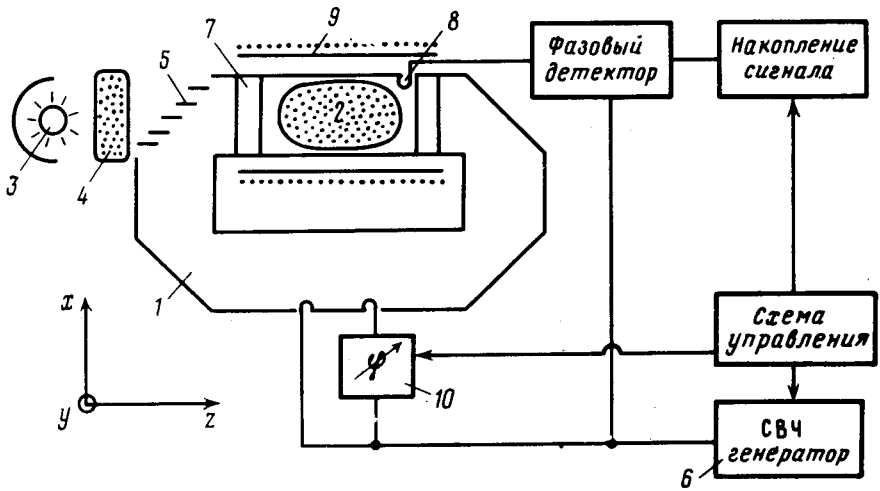
В.Е.Балакин, С.И.Кожемяченко

Предложена схема эксперимента по изучению эффектов слабого взаимодействия в переходах между компонентами СТС атомов на основе когерентных осцилляций населенности в двухуровневой системе, помещенной в мощное резонансное поле.

В данной работе предлагается постановка эксперимента для измерения эффектов слабого взаимодействия (СВ) атомных электронов с ядром в переходах между компонентами сверхтонкой структуры (СТС) атомов. Интерес к этой проблеме вызван работой [1], в которой указано, что осуществление такого эксперимента позволит измерить не известную до сих пор константу СВ, зависящего от спина нуклона. Прямое измерение эффекта по вращению плоскости поляризации радиоволны в парах вещества [1] осложнено малостью угла поворота плоскости поляризации, связанной как с малостью самой константы СВ, так и с малой разностью населенностей исследуемых уровней СТС. Предлагается схема эксперимента на основе когерентных осцилляций населенности в двухуровневой системе, помещенной в поле мощной резонансной бегущей волны [2, 3].

Идею эксперимента демонстрирует схема на рис.1. В кольцевом СВЧ резонаторе 1 помещена термостатированная ячейка 2 с парами Rb^{87} при температуре $50^\circ C$. С помощью лампы накачки 3 и фильтрующей ячейки 4 через окно 5 производим оптическую накачку верхнего уровня двухуровневой системы $5s_{1/2} F = 1, 2$ основного состояния атома Rb^{87} так, как сделано в рубидиевом стандарте частоты [4]. Это позволит увеличить разность населенностей $\Delta N = N_2 - N_1$ на два порядка по сравнению с равновесной. Затем с помощью СВЧ генератора 6 возбуждаем в кольцевом резонаторе бегущую линейнополяризованную

вдоль оси x волну с частотой перехода $F=1 \leftrightarrow F=2 \nu_0 = 6835 \text{ МГц}$ (назовем ее опорной волной). Если мощность волны такова, что G -вероятность индуцированного перехода много больше ударной ширины линии Γ , то в двухуровневой системе возникнут когерентные осцилляции населенности с момента включения поля, экспоненциально затухающие за время $1/\Gamma$. Линейнополяризованная волна есть сумма право- и левополяризованных волн равной амплитуды. Если до включения поля газ атомов был неполяризован, то половина атомов будет взаимодействовать только с правополяризованной, а другая — с левополяризованной компонентами опорной волны. Частота осцилляций населенности пропорциональна матричному элементу взаимодействия. Но СВ электронов с ядром приводит к тому, что матричные элементы взаимодействия атома с внешними право- и левополяризованными фотонами различаются на величину, пропорциональную константе СВ $\hbar [1] M_{\pm} = M_0 (1 \pm \frac{P}{2})$.



(По результатам работы [1] для рубидия примем $P \approx -2 \cdot 10^{-10} \text{ h}$). Поэтому осцилляции населенностей у одной половины атомов будут иметь частоту Ω_+ , у другой Ω_- , где $\Omega_{\pm} = \sqrt{G_{\pm}^2 + \Delta^2}$, [3], $\Delta = \nu - \nu_0$ — отстройка от резонанса, $G_{\pm} = G_0 (1 \pm \frac{P}{2})$, $G_0 = (\sqrt{15/2})(\mu_0 H_0 / \hbar)$, H_0 — амплитуда опорной волны. Опорная волна частично переизлучается средой в виде когерентных импульсов с частотами $(\nu_0 \pm G_0)$. Если бы $G_+ = G_-$, то переизлученные средой волны в сумме давали бы линейнополяризованную вдоль x волну, но так как из-за СВ $G_+ \neq G_-$, то переизлученные средой право- и левополяризованные волны расходятся по фазе и в сумме дают уже циркулярнополяризованную волну. Оценка решения уравнений Максвелла для поля в среде с осциллирующим магнитным дипольным моментом дает полное поле в резонаторе: ($0 < t < 1/\Gamma$).

$$H = X H_0 \cos(\omega t - kz) + X 2\pi \left(\frac{\hbar \omega_0 \Delta N}{H_0^2} \right) H_0 \cos 2\pi G_0 t \cos(\omega t - kz) \exp(-\Gamma t) -$$

$$- Y 2\pi^2 \left(\frac{\hbar \omega_0 \Delta N}{H_0^2} \right) H_0 P G_0 t \sin 2\pi G_0 t \sin(\omega t - kz) \exp(-\Gamma t).$$

XУ — нормальные моды резонатора, поляризованные вдоль x, y .

Первое слагаемое — поле опорной волны, второе и третье — поле волны, переизлучаемой средой. Полезным сигналом является третье слагаемое, пропорциональное константе СВ, тогда как первое и второе необходимо подавить, используя то, что полезный сигнал отличается от второго слагаемого по поляризации и фазе, а от опорной волны по поляризации, фазе и частоте. Интенсивности волн соответствующие этим трем слагаемым обозначим W_1, W_2, W_3 . Выделение по поляризации полезного сигнала W_3 осуществляется в проходном резонаторе 7, торцевые стенки которого сделаны из четвертьволновых пластин, параллельных оси y , которые опорная волна проходит без отражения, и отражающих для излучения с y поляризацией. Для когерентности макроскопических осцилляций населенностей нужно, чтобы частота осцилляций населенностей была одинаковой для всех атомов газа. Для опорной волны типа H_{10} нетрудно найти размер кольцевого резонатора по x , при котором амплитуда опорной волны, а значит и частота осцилляций населенности постоянна в объеме проходного резонатора $a_0 = \lambda_0 / \sqrt{2}$; если Δa — неточность изготовления резонатора, то связанное с этим неоднородное уширение линии перехода равно $\Delta G \approx G_0 \frac{\Delta a}{a_0} \equiv \Gamma$. Далее ясно, что размер резонатора по x должен равняться $b \approx a_0$ для сохранения когерентности между x и y поляризованными модами. Опорный сигнал включается прямоугольными импульсами длительностью $1/\Gamma$. В перерывах между импульсами лампа накачки восстанавливает разность населенностей уровней ΔN . В проходном резонаторе сигнал W_3 , содержащий информацию о СВ, вместе с ослабленными по поляризации сигналами W_1 и W_2 , которые частично проникают сюда из-за паразитной связи между x и y модами, усиливаются в Q_n раз за счет добротности проходного резонатора. Далее смесь трех сигналов регулируемой петлей связи 8 отводится на умножитель, где перемножается с опорным сигналом от генератора, сдвинутым по фазе на $\pi/2$ относительно опорного сигнала в резонаторе. Легко видеть, что с помощью такого фазового детектирования можно ослабить фон сигналов W_1 и W_2 на три — четыре порядка. После этого оставшийся опорный сигнал W_3 подавляется избирательным приемником по частоте. Приведем ориентировочные цифры для данного эксперимента: если мощность СВЧ генератора равна 2 Вт, то $G_0 \approx 10^6$ Гц, тогда для $\Delta a \approx 3 \cdot 10^{-3}$ см, $\Gamma \approx 10^3$ Гц (что на порядок больше ударной ширины линии [4]). Объемы и добротности кольцевого и проходного резонаторов взяты соответственно:

$$V_k \approx 5 \cdot 10^2 \text{ см}^3, Q_k \approx 10^3, V_n \approx 10^2 \text{ см}^3, Q_n \approx 10^3, \Delta N \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3},$$

$$W_1 = \frac{H_0^2 V_k \nu_0}{4\pi} \approx 2 \cdot 10^3 \text{ Вт}, W_2 \approx \pi^2 \left(\frac{\hbar \omega_0 \Delta N}{H_0^2} \right)^2 \left(\frac{V_n}{V_k} \right) W_1 \approx 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ Вт},$$

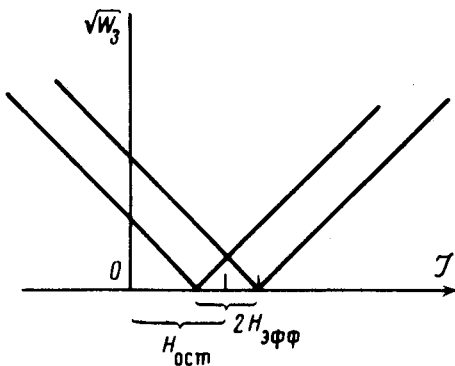
$$W_3 \approx \pi^4 \left(\frac{\hbar \omega_0 \Delta N}{H_0^2} \right)^2 \left(\frac{P G_0}{\Gamma} \right)^2 \left(\frac{V_n}{V_k} \right) W_1 \approx 2,2 \cdot 10^{-19} \text{ вт.}$$

Если полоса приемника равна 10^4 Гц, то нужно стабилизировать мощность опорного сигнала от генератора с точностью 10^{-2} . Видно, что мы должны зарегистрировать $W_3 Q_n \approx 2 \cdot 10^{-16} \text{ вт}$ на фоне $2 \cdot 10^3 \text{ вт}$ опорного сигнала, однако развязка по частоте, поляризации и фазе позволяет в принципе подавить фон сигналов W_1 и W_2 . Кольцевой резонатор помещен в магнитный экран, уменьшающий внешнее магнитное поле до $H_{\text{ост}} \sim 10^{-4}$ гс. Ячейка с газом находится внутри катушки ϑ , пропуская по которой ток, мы можем создавать слабое продольное магнитное поле внутри экрана. Действие магнитного поля H на атомы газа эквивалентно СВ, где вместо параметра P нужно поставить параметр

$$P_H \approx \frac{\mu_0 H}{3 \hbar \omega_0} \quad [1].$$

Если с помощью фазовращателя 10 периодически

менять направление распространения опорной волны на обратное, то амплитуда сигнала W_3 , пропорциональная константе СВ будет неизменной, а амплитуда сигнала W_3 , пропорциональная магнитному полю H будет менять знак. Накапливая сигналы отдельно для двух разных направлений распространения опорной волны, получаем две кривые зависимости амплитуды сигнала W_3 от тока в катушке (рис.2).



Таким образом, пропуская по катушке ток, мы сможем измерить знак константы СВ и откалибровать эффект СВ по магнитному полю, представляя эффект СВ как действие эффективного магнитного поля $H_{\text{эфф}} \approx \frac{3 \hbar \omega_0}{2 \mu_0} P$. Отметим недопустимость циркулярной поляризации света

лампы накачки, которая может производиться магнитным полем, а также напряжениями в стекле ячейки и лампы. Дополнительный контроль правильности эксперимента — совпадение формы сигнала W_3 с ожидаемой, результаты работ по поляризационному подавлению сигналов [5], а также чувствительность современных приемников и техника выделения сигналов из шумов накоплением находятся на уровне достаточном для проведения эксперимента. Если достичь чувствительности по-

лученной в работе [6] и подавить фон до необходимого уровня с использованием накопления сигнала, то можно обнаружить отличие от нуля константы СВ равное 10^{-2} .

Институт ядерной физики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
6 января 1980 г.

Литература

- [1] В.Н.Новиков, И.Б.Хрипович. Письма в ЖЭТФ, 22, 162, 1975.
 - [2] Л.Д.Ландау, Е.М.Лившиц. Квантовая механика. 1974, стр.176.
 - [3] В.С.Бутылкин и др. Резонансное взаимодействие света с веществом. М., 1975.
 - [4] П.Давидовиц, Р.Новик, ТИИЭР, №2, 1966.
 - [5] В.В.Исаев-Иванов, В.Н.Фомичев. ПТЭ, №3, 172, 1976.
 - [6] А.Б.Берлин, Д.В.Корольков, Г.М.Тимофеева. ПТЭ, №3, 146, 1969.
-