

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СМЕШАННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ В ПОЛЕ БЕГУЩЕЙ РАДИОВОЛНЫ

Б.Д. Агапьев, Б.Г. Матисов

Предлагается механизм, обеспечивающий пространственный перенос когерентности в газах, взаимодействующих с радиочастотным полем, и приводящий к пространственному разделению некогерентной смеси состояний на две когерентные компоненты.

В работах ^{1, 2} указывалось на возможность пространственного разделения "чистых" состояний атомов (молекул) газа, взаимодействующих с полем бегущей радиоволны. В настоящей статье сообщается о новом физическом явлении, имеющем место в такой системе – переносе когерентности вдоль направления распространения радиоволны, или – пространственном разделении смешанных состояний квантовой системы.

Сущность явления может быть качественно описана следующим образом. Рассмотрим разреженные пары активного вещества, имеющего спектральные переходы в радиочастотной (РЧ) области спектра ($\omega \sim 10^6 - 10^{13}$ рад/с). Такие переходы отвечают зеемановским уровням, достаточно разрешенным постоянным магнитным полем, уровням сверхтонкой и тонкой структуры и переходам между уровнями вращательной структуры молекул, лежащим в миллиметровом и сантиметровом диапазоне. Будем предполагать различие в заселенностях нижнего и верхнего уровней, созданное накачкой или связанное с больцмановским фактором ($\exp(-\frac{\hbar\omega_{21}}{T})$). При помещении системы в когерентное РЧ-поле максвелловское распределение частиц на уровнях $|1\rangle$ и $|2\rangle$ по скоростям (рис. 1) деформируется, приобретает беннетовскую структуру (рис. 1, пунктир).

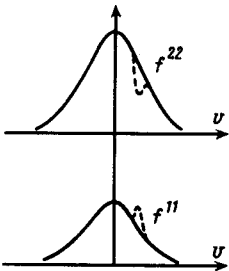


Рис. 1

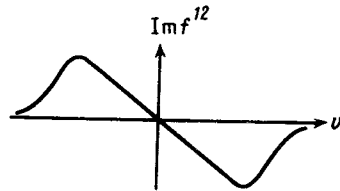


Рис. 2

Возникновение беннетовских провалов (пиков) связано с селективным по скоростям (из-за эффекта Доплера) взаимодействием атомов с РЧ-полем. Асимметрия распределения приводит ^{1, 2} к возникновению встречных потоков частиц в состояниях $|1\rangle$ и $|2\rangle$, т. е. к переносу инверсии (вымороженности) – к пространственному разделению состояний $|1\rangle$ и $|2\rangle$. Основным условием для возможности разделения состояний на макроскопические расстояния является достаточно большое их время жизни, характерное для рассматриваемой области спектра.

В отличие от населенностей зависимость когерентности от скорости имеет не доплеровский вид с беннетовскими провалами, а вид дисперсионной кривой (рис. 2). Поэтому пространственный перенос когерентности имеет место даже в резонансе – в отсутствие потоков частиц в каждом из состояний. Наглядная интерпретация легко может быть дана в случае переходов между уровнями зеемановской структуры. Во вращающейся системе отсчета происходит преимущественная ориентация поперечных магнитных моментов атомов вдоль вектора напряженности магнитного поля волны. В резонансе число атомов, движущихся в направлении распространения волны, равно числу атомов в обратном направлении. Однако, атомы в первом потоке обладают большим временем когерентного взаимодействия с полем волны, и, следовательно, переносят больший поперечный магнитный момент. Существование этого макро-

скопического потока намагниченности означает перенос когерентности, связанный с пространственным разделением первоначально некогерентной смеси состояний $|1\rangle$ и $|2\rangle$ на две когерентные компоненты, находящиеся в противофазе друг по отношению к другу. Экспериментально разделение смешанных состояний может наблюдаться известными методами³. Подчеркнем, что в³ требовалось наличие первоначально создаваемого пучка молекул. Здесь же потоки возникают сами в процессе взаимодействия с РЧ-полем.

Соответствующие расчеты дают для отличных от нуля компонент плотности потока намагниченности

$$j_{ik} = \int v_i m_k(\mathbf{v}) d^3 v$$

следующие выражения

$$\begin{aligned} j_{zz} &= -n\mu_B \frac{4w(\Gamma+w)}{(w+\gamma)^2} J_1 |u|^2, \\ j_{zx} &= -n\mu_B \frac{2w(\Gamma+w)}{w+\gamma} |u| J_1, \\ j_{zy} &= -n\mu_B \frac{2w|u|}{w+\gamma} (\Omega J_1 - kJ_2), \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь w – скорость накачки, γ и Γ – скорости продольной и поперечной релаксации, $U_{21} = \hbar u$ – матричный элемент взаимодействия с РЧ-полем, μ_B – магнетон Бора,

$$J_n = J_n(\Gamma_s, \Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{v^n M(v)}{\Gamma_s^2 + \Delta^2} dv, \quad (2)$$

$$\Gamma_s^2 = (\Gamma + w)^2 + 4 \frac{\Gamma + w}{\gamma + w} |u|^2, \quad \Delta = \Omega - kv,$$

и предполагается, что ось z параллельна волновому вектору \mathbf{k} , а ось y направлена вдоль вращающейся компоненты напряженности магнитного поля радиоволны.

Выражения (1) получены на основе решения квантовых кинетических уравнений для матрицы плотности^{1,4}. В резонансе ($\Omega = 0$) единственной отличной от нуля компонентой является

$$j_{zy} = n\mu_B \frac{2kw|u|}{w+\gamma} J_2(\Gamma_s, 0). \quad (3)$$

При наличии в кювете буферного газа в пределе частых столкновений выражение для этой компоненты принимает простую форму

$$j_{zy} = v_T n\mu_B \frac{kv_T}{v} \frac{w|u|}{(w+\gamma)(w+\Gamma) + 4|u|^2}, \quad (4)$$

где v – частота упругих столкновений.

Величину потока поперечной намагниченности удобно характеризовать значением потоковой скорости: $\dot{V} = j_{zy}/n\mu_B$. Для значений параметров, характерных для экспериментов с оптической накачкой $w \sim |u| \sim 10^4 \text{ с}^{-1}$, $\gamma \sim \Gamma \sim 10^2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{21} \sim 10^{10} \text{ рад/с}$ имеем $\Gamma_s \sim 10^4 \text{ с}^{-1}$, так что $J_2(\Gamma_s, 0) \approx 0,242 k^{-2}$, и потоковая скорость – порядка тепловой $V \sim 0,4 v_T$. Таким образом мы имеем дело не только с качественно новым явлением, но и с количественной точки зрения весьма существенным эффектом. Перенос намагниченности может играть значительную роль в современной физике атомных систем и как средство исследования тонких деталей взаимодействия атомов и молекул, и как объект возможных приложений.

Авторы признательны В.И.Перелю за полезные обсуждения настоящей работы.

Литература

1. *Агапьев Б.Д., Матисов Б.Г.*, Письма в ЖТФ, 1986, 12, 123.
2. *Агапьев Б.Д., Матисов Б.Г.* Всесоюзный семинар по оптической ориентации атомов и молекул: тезисы доклада – Л.: 1986, 95.
3. *Ораевский А.Н.* Молекулярные генераторы. М.: 1964, с. 295.
4. *Батыгин В.В., Гужва Ю.Г., Матисов Б.Г., Топтыгин И.Н.* ЖЭТФ, 1977, 73, 2107.

Ленинградский политехнический институт
им. М.И.Калинина

Поступила в редакцию
5 июня 1986 г.
