

УДК 539.186

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОЙ АНОМАЛИИ В РАССЕЯНИИ АТОМОВ НАТРИЯ СИЛЬНЫМ ПОЛЕМ ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. А. Гринчук, И. А. Гришина, Е. Ф. Кузин, М. Л. Нагаева,
Г. А. Рябенко, В. П. Яковлев

Исследуется вынужденное световое давление методом рассеяния нейтральных атомов натрия сильным полем двух встречных (падающего и отраженного от зеркала) коротких лазерных импульсов. Выясняется физический механизм осциллирующей зависимости вероятности рассеяния от расстройки резонанса. Показано, что период осцилляций зависит от положения отражающего зеркала.

В эксперименте [1] по рассеянию пучка атомов натрия коротким импульсом сильного неоднородного светового поля обнаружена аномальная зависимость вероятности рассеяния от расстройки резонанса.

В неоднородном поле резонансного лазерного излучения рассеяние атомов связано с действием силы светового давления на атом и определяется скоростью рассеяния фотонов поля при спонтанных и вынужденных переходах [2]. При достаточно малой длительности τ светового импульса, когда $\gamma\tau < 1$, где γ – ширина резонансного уровня атома, спонтанные переходы вносят малый вклад, и сила светового давления определяется в основном вынужденными процессами – силой вынужденного светового давления (ВСД).

Исследование ВСД проводилось методом рассеяния атомов натрия из атомного пучка, пересекающего под прямым углом область импульсного светового поля, образованного двумя встречными пучками лазерного излучения – падающим и отраженным от зеркала [3].

В рамках стандартного подхода, основанного на взаимодействии двухуровневого атома с градиентным полем стоячей световой волны $E_0 \cos kx \exp(-i\Delta t)$, где Δ – отстройка частоты от резонанса, картина рассеяния представляется достаточно простой. Рассеяние атомов из пучка должно происходить симметрично в обе стороны от его центра (вдоль оси x – направления распространения падающей и отраженной волн). Это связано с тем, что в адиабатических условиях эффективный потенциал атома $U(x)$ в световом поле зависит только от $\cos^2 kx$, т.е. $U(x) = \varphi(\cos^2 kx)$. Если отвлечься от тонких эффектов, обусловленных квантовыми флуктуациями [4] эффективного потенциала двухуровневого атома в световом поле, то зависимость силы ВСД от расстройки резонанса Δ имеет один характерный частотный масштаб – полевою ширину $2dE_0/\hbar$ (d – дипольный момент резонансного перехода). При этом в пределах полевого уширения частотная зависимость, например, вероятности рассеяния на данный угол является плавной функцией Δ .

В работе [1] была экспериментально обнаружена немонотонная осциллирующая зависимость вероятности рассеяния от расстройки резонанса. Диаграмма рассеяния оказалась асимметричной относительно центра атомного пучка, причем величина и знак асимметрии также немонотонным образом менялись в зависимости от величины Δ . Эта аномальная частотная структура находилась внутри полевого уширения ~ 40 ГГц. Характерный частотный масштаб – расстояние $\Delta_0/2\pi$ между ближайшими минимумом и максимумом частотной зависимости был приблизительно 10 ГГц.

В настоящей работе представлен ряд новых экспериментальных результатов, связанных с дальнейшим исследованием обнаруженной частотной аномалии, физический механизм которой нам, к сожалению, пока не ясен. В частности, оставалось совершенно непонятным, каково происхождение довольно большой характерной расстройки Δ_0 . Поэтому основной целью работы было выяснение тех факторов, которые влияют на наблюдаемую частотную зависимость и, прежде всего, на характерный период осцилляций.

Схема эксперимента подробно описана в [4]. Ленточный пучок (сечением 0.2×12 мм²) атомов натрия облучался перпендикулярно его плоскости двумя встречными – падающим и отраженным от зеркала – пучками излучения одночастотного (с шириной линии ~ 0.4 ГГц) лазера на красителе Родамин С. Длительность импульса составляла 10^{-8} с. Напряженность поля в максимуме гауссовского пространственного распределения интенсивности излучения в сечении лазерного луча была порядка $4 \cdot 10^3$ В/см. Частота лазера перестраивалась вблизи резонансной D_2 -линии натрия в диапазоне ± 40 ГГц, ко-

торый по порядку величины соответствовал полевому уширению. Отражающее зеркало располагалось на небольшом (по сравнению с протяженностью области когерентности двух встречных волн) расстоянии от центра атомного пучка. В двух сериях экспериментов это расстояние было 7 и 13 мм. На расстоянии 25 см от области облучения детектор измерял распределение атомов, рассеянных в направлении, перпендикулярном плоскости атомного пучка. Хотя пучок состоял из частиц с широким максвелловским распределением по продольным скоростям, метод обработки результатов позволял следить за группой атомов с определенной продольной скоростью.

В работе было исследовано влияние поляризации и напряженности поля, а также расстояния между атомным пучком и отражающим зеркалом на характер осциллирующей зависимости силы ВСД от расстройки резонанса.

Сравнивались результаты двух измерений частотной зависимости, проведенных в полях с эллиптической и линейной поляризациями импульсного лазерного излучения. Оказалось, что тип поляризации рассеивающего поля не влияет не только на общий вид осциллирующей частотной зависимости и асимметрии, но и не меняет характерный период этих осцилляций.

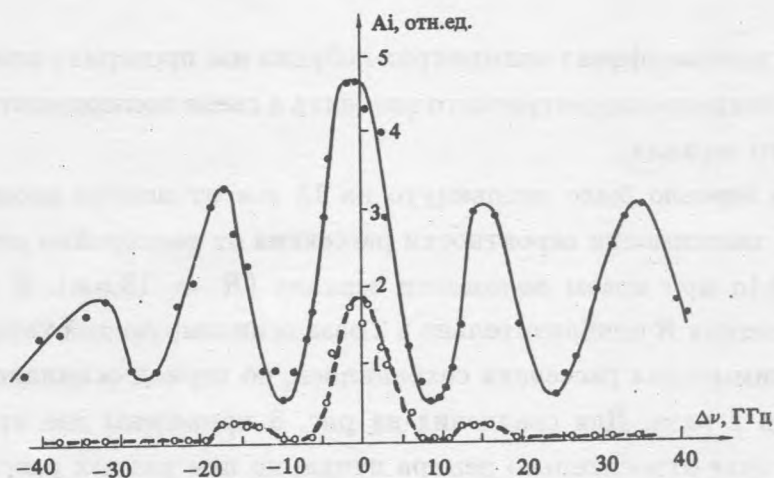


Рис. 1. Зависимости вероятности рассеяния атомов от расстройки резонанса, измеренные для двух значений напряженности поля лазерного излучения: $E = 4300$ В/см, — — — $E = 1400$ В/см.

Рис. 1 иллюстрирует результаты исследования влияния интенсивности излучения на характер рассеяния. Здесь приведены зависимости вероятности рассеяния от расстройки резонанса для двух значений напряженности поля. Указана величина напряженности поля в максимуме распределения интенсивности в сечении лазерного луча. Измерения проводились на расстоянии $4a$ от центра атомного пучка в сторону зеркала, где $a = 2 \cdot 10^{-2}$ см – ширина пучка на полувысоте. Как видно из рисунка, величина напряженности рассеивающего поля практически не влияет на период осцилляций и положение максимумов и минимумов частотной зависимости. Форма кривой, однако, меняется, т.к. амплитуды центрального и боковых пиков совершенно по-разному зависят от интенсивности поля. Если амплитуда центрального пика зависит от поля почти линейно, то амплитуды боковых пиков убывают с уменьшением напряженности поля гораздо быстрее.

Был проведен ряд контрольных экспериментов, в которых менялся угол пересечения атомного и лазерного пучков. Кроме того, вносилась асимметрия в форму начального атомного пучка. Отклонение от нормального угла пересечения на величину вплоть до 10^{-2} рад, а также искажение формы атомного пучка не привело к заметному изменению периода осцилляций. Эти факторы не повлияли также и на эффект асимметрии рассеяния.

В то же время именно эффект асимметрии побудил нас проверить влияние на процесс рассеяния единственного асимметричного элемента в схеме экспериментальной установки – отражающего зеркала.

С этой целью зеркало было отодвинуто на 13 мм от центра атомного пучка. На рис. 2 приведены зависимости вероятности рассеяния от расстройки резонанса, снятые в точках $x = \pm 4a$ при новом положении зеркала ($R = 13$ мм). В результате при увеличении расстояния R приблизительно в 2 раза осциллирующий характер частотной зависимости и асимметрия рассеяния сохранились, но период осцилляций уменьшился приблизительно в 2 раза. Для сравнения на рис. 3 приведены две кривые, снятые в одной и той же точке относительно центра пучка, но при разных расстояниях от него до зеркала. Видно, что увеличение примерно вдвое расстояния от пучка до зеркала вызвало пропорциональное уменьшение периода осцилляций.

Численные значения характерной частоты $\Delta_0/2\pi$ (10 ГГц и 5 ГГц) удивительно хорошо согласуются с обратным временем прохождения светового сигнала от области взаимодействия до зеркала и обратно, т.е. с величиной $c/2R$.

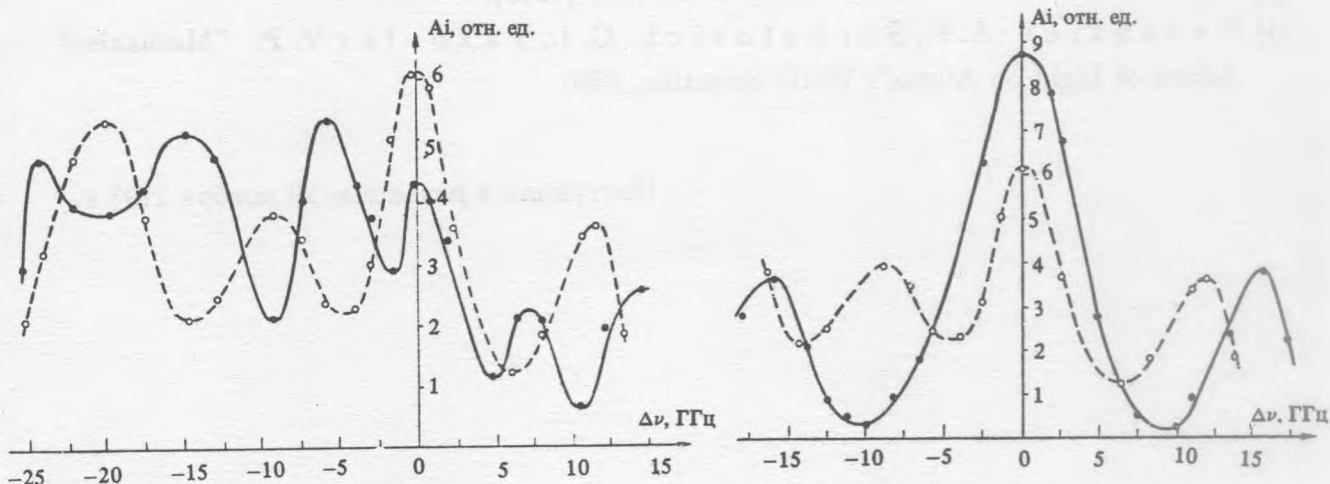


Рис. 2. Зависимости вероятности рассеяния от расстройки резонанса, измеренные на расстояниях $+4a$ от центра атомного пучка (a — ширина атомного пучка на полувысоте) ближе к зеркалу (---) и $-4a$ (—) при положении отражающего зеркала $R = 13$ мм; $E = 4300$ В/см.

Рис. 3. Две зависимости вероятности рассеяния от расстройки резонанса, измеренные на одном и том же расстоянии относительно центра атомного пучка, но при разных расстояниях от него до отражающего зеркала: — $R = 7$ мм, --- $R = 13$ мм; $E = 4300$ В/см.

Не фетишизируя совпадение чисел, мы, тем не менее, можем утверждать, что обнаружен довольно неожиданный "эффект зеркала". Оказалось, что характерный период осцилляций, устойчивый к изменению целого ряда параметров атомного пучка и сильного импульсного лазерного излучения, существенно зависит от положения отражающего зеркала, которое формирует пространственно неоднородное световое поле. Возможно, этот факт поможет сформулировать физический механизм возникновения аномальных частотных свойств процесса рассеяния атомов в поле встречных импульсов сильного лазерного излучения.

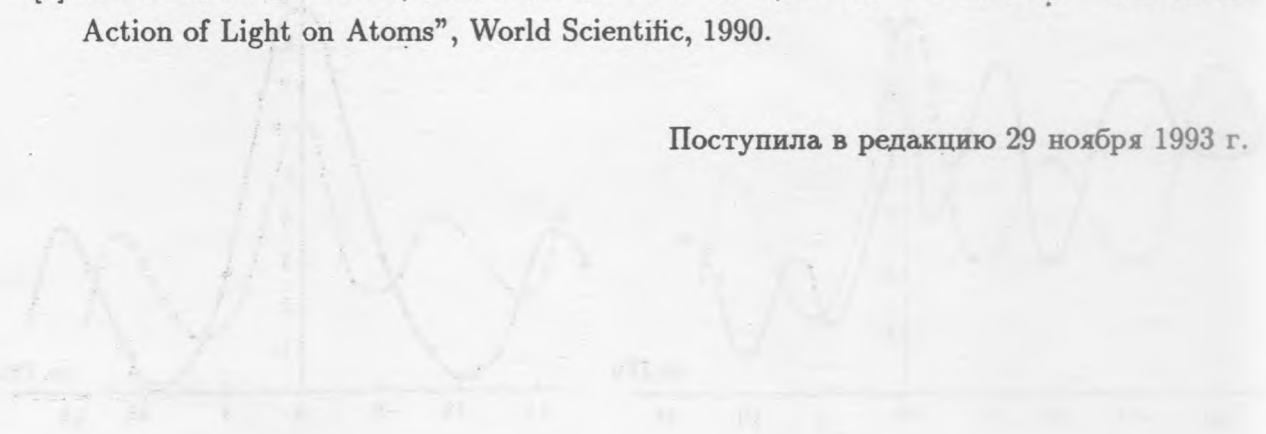
Авторы выражают благодарность С. Е. Гребенщикову за постоянный интерес к работе и ценные замечания при обсуждении результатов экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гринчук В. А. и др. Письма в ЖЭТФ, **57**, 534 (1993).
 [2] Казанцев А. П., УФН, **124**, 113 (1978).

- [3] Grinchuk V. A. et al. JOSA B, 2, 1805 (1985).
- [4] Kazantsev A. P., Surdutovich G. I., Yakovlev V. P. "Mechanical Action of Light on Atoms", World Scientific, 1990.

Поступила в редакцию 29 ноября 1993 г.



В работе рассмотрены вопросы взаимодействия света с атомами в резонансном режиме. Показано, что при определенных условиях световое давление может оказывать механическое воздействие на атомы, приводящее к их перемещению и изменению скорости. Это явление имеет важное значение для современных исследований в области квантовой оптики и атомной физики.

Выводы: Световое давление оказывает механическое воздействие на атомы, что может быть использовано в различных приложениях, связанных с управлением атомными пучками и созданием оптических ловушек.

Литература: 1. Grinchuk V. A. et al. JOSA B, 2, 1805 (1985). 2. Kazantsev A. P., Surdutovich G. I., Yakovlev V. P. "Mechanical Action of Light on Atoms", World Scientific, 1990. 3. ...

Авторы: В. А. Гринчук, Г. И. Сурдатович, В. П. Яковлев.

УДК 537.874.01

© 1993 г. Издательство Физматлит. Москва.