

Новые результаты экспериментов по интерференции состояний атома водорода, обусловленной дальнедействующим взаимодействием с поверхностью металла

Ю. А. Кучеряев⁺, В. Г. Пальчиков*, Ю. А. Пчелин⁺, Ю. Л. Соколов⁺¹⁾, В. П. Яковлев[°]

⁺Российский научный центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

* ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений, 141570 Менделеево, Московская обл., Россия

°Московский инженерно-физический институт, 115409 Москва, Россия

Поступила в редакцию 30 марта 2005 г.

После переработки 25 мая 2005 г.

Методом атомного интерферометра исследована интерференция $2P$ -состояния атома водорода, обусловленная неизвестным дальнедействующим взаимодействием с поверхностью металла (эффект Соколова). В отличие от предшествующих экспериментов, когда пучок атомов пропусклся через щели в металлических пластинах, в описываемых опытах пучок проходит на заданном расстоянии от кромок пластин. Обнаружено, что интерференция отчетливо наблюдается, если две пластины расположены по одну сторону от пучка, но исчезает, если одна из пластин перемещается на противоположную сторону. Этот результат нельзя объяснить существующими сегодня гипотезами о природе исследуемого эффекта.

PACS: 39.10.+j, 39.20.+q

В экспериментах по изучению интерференции $2P$ -состояния атома водорода было обнаружено, что метастабильный атом $2S_{1/2}$, пролетающий над поверхностью металла, каким-то образом взаимодействует с ней. Это приводит к появлению когерентной добавки состояния $2P_{1/2}$ к исходному чистому состоянию $2S$, то есть к переходу последнего в суперпозицию $2S - 2P$ (эффект Соколова) [1, 2]. Удивительным является не сам факт такого взаимодействия, а то, что в пределах чувствительности применявшейся аппаратуры оно наблюдалось вплоть до расстояния 0.6 мм между поверхностью металла и атомом.

На рис. 1а показан один из вариантов эксперимента, в котором отчетливо наблюдается взаимодействие неизвестной природы [3].

Пучок, представляющий собой смесь $1S$ - и $2S$ -атомов водорода с энергией 20 кэВ, проходит через систему, включающую гасящее поле E (для удаления из пучка $2S$ -атомов при контрольных измерениях), коллиматор C , формирующий пучок в виде ленты сечением 0.05×2 мм, щели S_1 и S_2 шириной 0.3 мм и детектор D , регистрирующий L_α -кванты и жестко соединенный со щелью S_2 . Расстояние L между щелями S_1 и S_2 могло плавно изменяться в пределах от 0.2 до 15 мм. Щели вырезаны в бронзовых пластинах толщиной 0.8 мм, покрытых слоем золота (5 мкм) и тщательно заземленных.

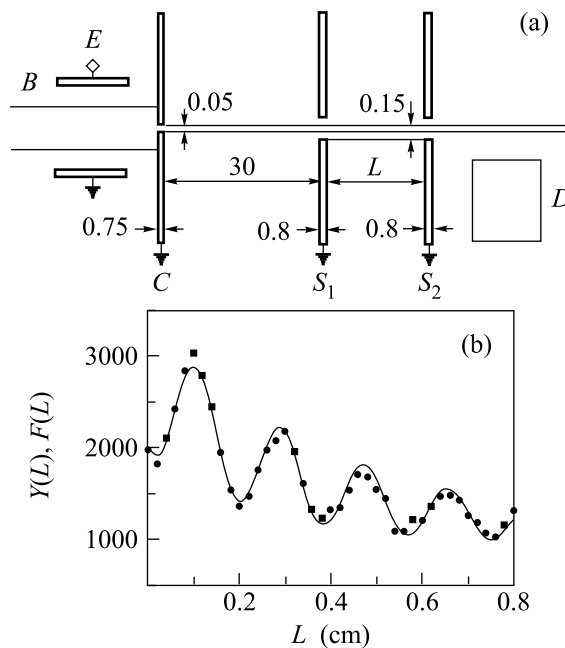


Рис.1. а) Схема эксперимента: B – пучок атомов $H_{1S} + H_{2S}$; E – электрическое поле, гасящее компоненту H_{2S} ; C – коллиматор; S_1 и S_2 – пластины со щелями для прохода пучка; D – детектор L_α – квантов. б) Интерферограмма: точки $Y(L)$ – результат измерений; сплошная кривая – аппроксимация $F(L) = 1645 \exp(-L/0.3276) + 732 \exp(-L/0.6552) \cos((2\pi L)/0.184 + 2.64) + 1060$

При изменении расстояния L наблюдаются отчетливые осцилляции интенсивности потока $2P$ -атомов,

¹⁾e-mail:lukich@nf.kiae.ru

то есть интерференция компонент этого состояния, возникших в зонах возмущения возле щелей S_1 и S_2 (рис.1b).

Впоследствии была развита методика, в которой пучок атомов водорода пропусклся не через щель в пластине, а на заданном расстоянии от ее кромки. Этот подход принес очень существенные результаты: явление предстало в совершенно новом аспекте.

Эксперименты такого рода были многократно выполнены в двух вариантах: металлические пластины, с которыми взаимодействовали атомы, располагались либо по одну сторону пучка, либо по разные стороны от него. На рис.2а приведена схема одно-

тем вычитания аппаратного фона и нормировки на показания монитора пучка, показана на рис.2b. Отчетливо видны осцилляции сигнала, свидетельствующие об интерференции двух $2P$ -компонент, которые образуются при пролете $2S$ -атомов над пластинами P_1 и P_2 . Интерферограмма достаточно хорошо аппроксимируется функцией [4]

$$F(L) = a_1 \exp\left(-\frac{L}{R}\right) + a_2 \exp\left(-\frac{L}{2R}\right) \times \cos\left(\frac{2\pi L}{a_3} + a_4\right) + a_5, \quad (1)$$

где R – длина пробега $2P$ -атома, $a_1 \dots a_5$ – эмпирические параметры. Пробег $R = 0.3276$ см соответствует заданной в этом опыте энергии атома, равной 22.0 кэВ (время жизни состояния $2P_{1/2}$ равно 1.5962 нс). Измеренный период пространственных осцилляций $a_3 = 0.188$ см позволяет найти частоту, которая в данном случае оказывается равной 1092 МГц. Эта величина показывает, что происходит переход $2S_{1/2} - 2P_{1/2}$: поскольку в данном опыте использовалась смесь компонент сверхтонкой структуры $2S$ -состояния с полными моментами $F = 0$ и $F = 1$, возможное значение частоты перехода заключено в диапазоне от 909.9 до 1147 МГц. Основная часть пьедестала интерферограммы a_5 (1305 единиц из 1412) представляет собой дополнительный фон, возникающий при включении $2S$ -компоненты пучка. В целом картина этого опыта воспроизводит многочисленные наблюдения эффекта Соколова, включая и структуру функции (1), сделанные ранее в экспериментах со щелями.

Иная картина наблюдается в опыте, представленном на рис.3. Единственное отличие этой конфигурации от предыдущей состоит в том, что теперь пластины P_1 и P_2 расположены по разные стороны от пучка. Как видно из рис.3b, это приводит к драматическому изменению интерферограммы: в пределах флуктуаций не видно каких-либо регулярных осцилляций сигнала. Экспоненциальный спад сигнала с декрементом, равным $1/R$, несомненно означает, что $2S$ -атомы испытали возмущение от пластины P_1 . Трудно предположить, что возмущение от пластины P_2 , которое отчетливо проявлялось в интерференционной картине предыдущего опыта, теперь исчезло. Однако факт состоит в том, что образовавшиеся в этой конфигурации опыта две компоненты $2P$ -состояния не интерферируют между собой.

Основные черты этой ситуации воспроизводятся и в других опытах, в которых кромки пластин имеют форму остро заточенного клина.

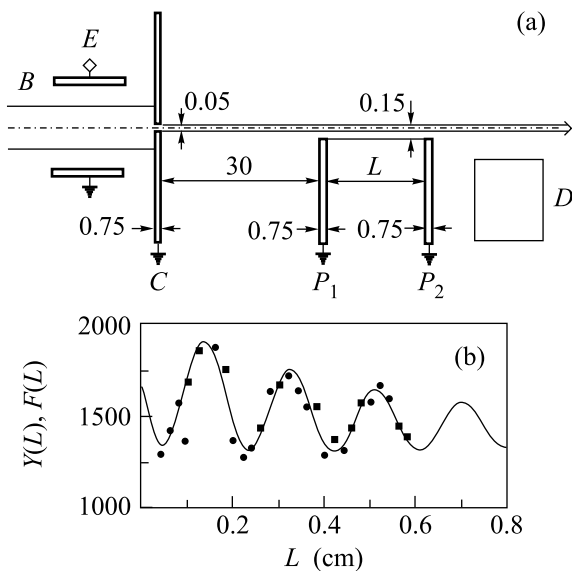


Рис.2. а) Схема эксперимента: B – пучок атомов $H_{1S} + H_{2S}$; E – электрическое поле, гасящее компоненту H_{2S} ; C – коллиматор; P_1 – подвижная пластина; P_2 – неподвижная пластина; D – детектор-квантов. б) Интерферограмма: точки $Y(L)$ – результат измерений; сплошная кривая – аппроксимация $F(L) = 308 \exp(-L/0.3276) + 363 \exp(-L/0.6552) \cos((2\pi L/0.188 + 1.68) + 1412$

го из таких экспериментов. Пластина P_2 и детектор D регистрируемого L_α -излучения неподвижны в лабораторной системе координат. Пластина P_1 и связанный с ней коллиматор C могут перемещаться на заданное расстояние L . Для измерения аппаратного фона детектора, обусловленного основной $1S$ -компонентой пучка ($\approx 98\%$), можно включить достаточно сильное электрическое поле E , гасящее $2S$ -компоненту ($\approx 2\%$). В этом опыте обе пластины расположены по одну сторону от пучка на расстоянии 0.15 мм от его оси. Зависимость сигнала детектора от расстояния L (интерферограмма), полученная пу-

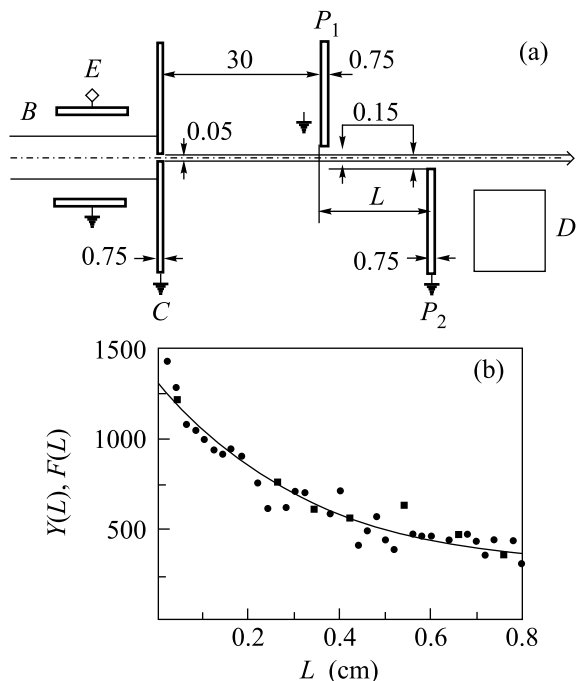


Рис.3. а) Схема эксперимента (обозначения те же, что и на рис.2а). б) Интерферограмма: точки $Y(L)$ – результат измерений; сплошная кривая – аппроксимация $F(L) = 1014 \exp(-L/0.3276) + 284$

Представляется вполне разумным предположить, что взаимодействие атома с двумя одинаково расположенными пластинами приводит к двум сдвинутым по фазе вкладам в амплитуду одного и того же конечного $2P$ -состояния и, тем самым, к эффекту интерференции. При этом отсутствие интерференции в ситуации, когда пластины расположены по разные стороны траектории атомного пучка, можно было бы интерпретировать таким образом, что взаимодействие с ними возбуждает разные подуровни $2P$ -состояния. С этой точки зрения представленные эксперименты дают некоторую новую информацию о структуре взаимодействия, механизм которого мы пока не знаем.

Итак, основной результат описанных выше двух экспериментов состоит в том, что единственное изменение условий опыта – перестановка пластины P_1 на другую сторону от пучка – приводит к исчезновению интерференции $2P$ -компонент суперпозиции. В течение нескольких лет нами подвергались экспериментальной проверке различные альтернативные теоретические объяснения природы обнаруженного взаимодействия между возбужденными атомами водорода и поверхностью металла применительно к кругу задач, рассмотренных выше.

Так, в работе [3] нами анализировались дальнедействующие взаимодействия “атом – поверхность металла” (классический потенциал Ван-Дер-Ваальса, эффект Казимира, резонаторный радиационный сдвиг), интерпретируемые как взаимодействие флуктуирующего дипольного момента атома с его “зеркальным” изображением в металле и (в пределе больших расстояний) как штарковский сдвиг, обусловленный изменениями граничных условий (за счет присутствия проводящей среды) для вакуумных флуктуаций поля [5, 6]. Максимальный сдвиг $2P$ -уровня на расстоянии $r = 1$ мкм равен 500 кГц, сдвиг $2S$ -уровня не превышает значения -2.3 кГц для данного расстояния [7].

Из других публикаций последних лет на эту тему следует отметить работы [8–10], в которых, в частности, рассматривались теоретические и экспериментальные аспекты исследований дальнедействующих взаимодействий для ридберговских состояний атомов.

Приведенные теоретические оценки, однако, дают пренебрежимо малую величину взаимодействия атома водорода с поверхностью металла, когда речь идет о расстояниях $r = 200$ – 700 мкм. Экспериментально наблюдаемый нами на таких расстояниях эффект дальнедействующего взаимодействия оказывается на несколько порядков больше, чем это следует из приведенных выше работ. Гипотезы, предложенные в работах [11–13], также не могут объяснить описанные выше экспериментальные результаты.

Следует заметить, что эксперименты с метастабильными $2S_{1/2}$ -атомами водорода представляют существенный интерес, поскольку это состояние отделено от короткоживущего состояния $2P_{1/2}$ лэмбовским сдвигом, равным $4 \cdot 10^{-6}$ эВ. Вследствие этого весьма малое возмущение состояния $2S$ может индуцировать переход $2S \rightarrow 2P$ с последующим испусканием легко детектируемого кванта L_{α} .

Метастабильные $2S_{1/2}$ -атомы водорода могут оказаться чрезвычайно тонким инструментом для изучения обнаруженных парадоксальных явлений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНЦ “Курчатовский Институт”. Авторы приносят благодарность С. Т. Беляеву за плодотворную дискуссию и ценные советы. Работа В.П.Я. частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (# 04-02-16734)

1. Yu. L. Sokolov, V. P. Yakovlev, and V. G. Pal'chikov, *Physica Scripta* **49**, 86 (1994).
2. Ю. Л. Соколов, УФН **169**, 559 (1999).

3. Yu. L. Sokolov, V. P. Yakovlev, V. G. Pal'chikov, and Yu. A. Pchelin, *Eur. Phys. J. D* **20**, 27 (2002).
4. Yu. A. Kucheryaev and Yu. A. Sokolov, arXiv:physics/0304106.
5. Е. М. Лифшиц, *ЖЭТФ* **29**, 94 (1955).
6. М. Л. Левин, С. М. Рытов, *Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике*, М.: Наука, 1967.
7. E. A. Hinds and V. Sandoghdar, *Phys. Rev. A* **43**, 398 (1991).
8. F. Hasselbach et al. в книге: *Decoherence: Theoretical, Experimental, and Conceptual Problems*, Berlin: Springer, 2001, pp. 201-212.
9. J. Tonomura, *Int. J. Mod. Phys. A* **15**, 3427 (2000).
10. Y. Levinson, *J. of Phys. A: Math. Gen.* **37**, 3003 (2004),
11. В. В. Kadomtsev and М. В. Kadomtsev, *Physica Scripta* **50**, 243 (1994).
12. Б. Б. Кадомцев, *Динамика и информация*, М.: Изд-во Успехи физических наук, 1997.
13. S. T. Beljaev, *Eur. Phys. J. D* **25**, 247 (2003).