

539.184.2:546.11(048)

Ю. Л. Соколов, В. П. Яковлев. Измерение лэмбовского сдвига в атоме водорода. Измерение лэмбовского сдвига в атоме водорода является одной из важных проверок квантовой электродинамики. Хотя измерения δ ведутся более четверти века, начиная с классической работы ¹, следует, пожалуй, признать, что прогресс в увеличении точности оказался весьма скромным. В настоящее время известны следующие экспериментальные и теоретические значения δ (МГц):

$$\delta_{\text{эксп}} = 1057,862 \pm 0,020^2, \quad \delta_{\text{теор}} = 1057,912 \pm 0,011^4,$$

$$\delta_{\text{эксп}} = 1057,845 \pm 0,009^3, \quad \delta_{\text{теор}} = 1057,864 \pm 0,014^5.$$

Как видим, разброс этих величин выходит за пределы случайных ошибок, а точность не превышает 0,01 МГц. Вследствие этого нельзя, по-видимому, говорить о существовании какого-либо расхождения (или соответствия) между теоретическими и экспериментальными значениями. Необходимо повышение точности измерения δ .

В настоящей работе проведено измерение лэмбовского сдвига на установке «Памир» с помощью атомного интерферометра, который позволяет наблюдать стационарную картину интерференции двух сдвинутых по фазе компонент $2p$ (или $2s$)-состояния атома водорода ⁶. Интерферометр представляет собой два плоских конденсатора с продольным электрическим полем, разделенных переменным промежутком l . Атом в метастабильном $2s$ -состоянии (из пучка предварительно удалялись компоненты с полным моментом $F = 1$), пролетающий со скоростью v через такую систему, подвергается действию неадиабатических полей в каждом конденсаторе, которые приводят к перемешиванию состояний ($2s_{1/2}$, $F = 0$), ($2p_{1/2}$, $F = 1$) и ($2p_{3/2}$, $F = 1$). Зависимость вероятности выхода $2p$ -атомов после пролета через интерферометр от длины l (или собственного времени пролета $T = (l/v) \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$) определяется свободной эволюцией $2s$ - и $2p$ -состояний в промежутке между конденсаторами, где поле отсутствует. Наиболее простой вид имеет разность вероятностей для двух противоположных значений поля во втором конденсаторе ^{7,8}:

$$F(T) = \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right) [A \cos(2\pi\nu T + \varphi) + B \cos(2\pi\nu_1 T + \varphi_1)];$$

здесь τ — время жизни $2p$ -состояния, ν — частота перехода ($2s_{1/2}$, $F = 0$) — ($2p_{1/2}$, $F = 1$), ν_1 — частота тонкого расщепления. Параметры A , B , φ_1 и φ_2 определяются действием полей в конденсаторах и не зависят от l .

Теоретическая кривая $F(T)$ совмещалась с экспериментальными точками подбором параметров, в том числе и величины ν/ν , которая содержит интересующую нас частоту перехода, методом наименьших квадратов. В том случае, когда скорость атомов оставалась постоянной, обработка исходных данных позволяла найти значение ν/ν с точностью не ниже 5 ppm. При дрейфе скорости интерференционная кривая деформируется и не соответствует зависимости $F(T)$, так что обработка ее становится невозможной.

Стабилизация и измерение скорости оказываются наиболее сложной частью эксперимента и являются источником основных ограничений метода. Пучок нейтральных атомов получался перезарядкой протонов с энергией ~ 20 кэВ, пропущенных через анализирующий магнит, на молекулярном водороде. Жесткие условия коллимации обеспечивали высокую однородность скоростей атомов, попадающих в интерферометр ($\Delta v/v \sim 2 \cdot 10^{-6}$). Скорость определялась из экспериментально найденной длины распада $l_0 = v\tau$ $2p$ -атомов и рассчитанного теоретически времени жизни $2p_{1/2}$ состояния $\tau = 1,596185 \cdot 10^{-9}$ с ^{7,8}. Погрешность в τ составляет, по оценкам, величину порядка нескольких ppm.

Методика исключения систематических ошибок состояла в многократном изменении установки и сравнении получаемых при этом интерференционных кривых. Путем незначительной вариации скорости протонов была определена разрешающая способность установки, по отношению как к скорости, так и к частоте ν . Порог чувствительности находится ниже случайных ошибок измерения ν .

Было выполнено более 200 измерений зависимости $F(T)$ с интерферометрами трех различных модификаций. Значения ν , найденные из обработки данных, отвечающих критерию отбора по постоянству скорости (42 случая), образуют компактную группу со средней величиной

$$\nu = 909,9014 \pm 0,0019^8$$

(ошибка принята равной одному стандартному отклонению). Соответствующее значение лэмбовского сдвига

$$\delta = 1057,8594 \pm 0,0019.$$

Полученные данные позволяют надеяться на дальнейшее повышение точности. Необходимо существенно улучшить статистику. Кроме того, нужен более точный расчет времени жизни $2p$ -состояния.

Теоретическое значение δ , по-видимому, также может быть уточнено^{9,10,11}. Поэтому повышение точности измерения представляется чрезвычайно существенным, поскольку сравнение с теорией позволит сделать ряд принципиально важных заключений, касающихся, в частности, размеров протона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Triebwasser S., Dayhoff E. S., Lamb W. E.— Jr. Phys. Rev., 1953, v. 89, p. 98.
2. Newton G., Andrews D. A., Unworth P. J.,— Phil. Trans. Roy. Soc., 1979, v. 290, p. 373.
3. Lundeen S. R., Pipkin F. M., Phys. Rev. Lett., 1981, v. 46, p. 232.
4. Erickson G. W.— J. Phys. Chem. Ref. Date, 1977, v. 6, p. 831.
5. Mohr P. J.— Phys. Rev. Lett., 1975, v. 34, p. 1050.
6. Соколов Ю. Л.— ЖЭТФ, 1972, т. 63, с. 461; in: Proc. of 6th Intern. Conference of Atomic. Physics. Riga, 1978.— P. 207.
7. Sokolov Yu. L.— In: Proc. of PMFC-II.— Washington, 1981.
8. Соколов Ю. Л., Яковлев В. П.— ЖЭТФ, 1982, т. 83, вып. 7.
9. Erickson G. W.— Цит. в⁷ сб.
10. Borie E.— Phys. Rev. Lett., 1981, v. 47, p. 568.
11. Sapirstein J.— Ibid., p. 1723.