

ВРЕМЯ ЖИЗНИ $2p$ -СОСТОЯНИЯ И ЛЭМБОВСКИЙ СДВИГ В АТОМЕ ВОДОРОДА

В.Г.Пальчиков, Ю.Л.Соколов, В.П.Яковлев

В эксперименте ^{1,2} было измерено отношение частоты ν -перехода ($2s_{1/2}, F=0$) – ($2p_{1/2}, F=1$) к константе γ распада $2p_{1/2}$ -состояния атома водорода. Константа γ вычислена с точностью $\sim 0,3$ ppm. Соответствующие значения ν и лэмбовского сдвига оказались равными: $\nu = 909,8934(19)$ МГц, $\delta(H, n=2) = 1057,8514(19)$ МГц.

При измерении лэмбовского сдвига в атоме водорода методом атомного интерферометра ^{1,2} удалось довести погрешность экспериментального результата до 1,9 кГц. Это в несколько раз меньше оценок погрешностей наиболее точных известных в настоящее время экспериментальных ^{3,4} и теоретических ^{5,6} значений лэмбовского сдвига.

В данном методе измерялась интерференция сдвинутых по фазе $2p_{1/2}$ -состояний (с проекцией полного момента сверхтонкой структуры $F=1$) атома водорода, который первоначально находился в метастабильном состоянии $2s_{1/2}(F=0)$ и пролетал с постоянной скоростью v через два плоских конденсатора с продольным электрическим полем, разделенных свободным от полей промежутком переменной длины l .

Интерференционный эффект, как показано в ², описывается функцией

$$\cos \frac{2\pi\nu}{v} (1 - v^2/c^2)^{1/2} l, \quad (1)$$

которая содержит интересующую нас частоту ν перехода ($2s_{1/2}, F=0$) – ($2p_{1/2}, F=1$). Скорость частиц измерялась по распадной кривой атома в $2p$ -состоянии

$$\exp \left\{ -\gamma \frac{l}{v} (1 - v^2/c^2)^{1/2} \right\} \quad (2)$$

и выражалась через константу распада $\gamma = 1/\tau$ этого состояния. Далее из сравнения экспериментальной и теоретической (1) интерференционных кривых определялась частота перехода ν . Таким образом, фактически в эксперименте ^{1,2} было измерено отношение ν/γ с точностью ~ 2 ppm.

Поэтому для определения величины ν с высокой точностью (~ 1 ppm = 10^{-6}) необходимо знать константу распада γ , по крайней мере, с той же точностью. Заметим, что при извлечении частоты ν из указанного эксперимента ошибка в величине γ выступает как систематическая ошибка для ν .

Экспериментальные данные о константе распада с требуемой точностью отсутствуют. Поэтому эта величина рассчитывалась теоретически. В работе ² при вычислении γ были учтены только ведущие релятивистские поправки $\sim \alpha^2$ и получено следующее выражение для

вероятности распада $2p_{1/2}$ -состояния

$$\gamma_{\text{рел}} = W_0 \left(1 + \alpha^2 \ln \frac{9}{8} \right), \quad W_0 = 4\pi c \frac{2^8}{3^8} R_H \alpha^3. \quad (3)$$

Для дальнейшего уточнения значения γ одним из авторов был произведен последовательный учет ведущих радиационных поправок $\sim \alpha^3$ и $\sim \alpha^3 \ln \alpha$, т. е. поправок типа собственного-энергетического сдвига и поляризации вакуума к амплитуде перехода $2p_{1/2} - 1s_{1/2}$ ⁷.

Суммарный вклад этих поправок в вероятность перехода имеет вид

$$\delta\gamma_{\text{рад}} = W_0 \frac{32}{3\pi} \alpha^3 \left[L(2,1) \frac{1}{8} - L(1,0) - \ln \frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{64} - \frac{19}{30} \right], \quad (4)$$

где $L(n, l)$ — логарифм Бете. В результате, объединяя (3) и (4), получаем следующее численное значение для константы распада

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_{\text{рел}} + \delta\gamma_{\text{рад}} = 0,62648812 (20) \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}, \\ \tau &= 0.159619946 (48) \cdot 10^{-8} \text{ с} \end{aligned} \quad (5)$$

При вычислении γ были использованы значения фундаментальных констант α и R_H , приведенные в работах^{8,9}. Относительная погрешность величины γ составляет $\sim 0,3\text{ppm}$ и определяется погрешностью в постоянной тонкой структуры. Учет конечных размеров протона приводит к поправке на два порядка меньшей.

Тогда из эксперимента^{1,2} с новым значением (5) константы распада γ получаем следующие величины для частоты ν

$$\nu = 909,8934 \pm 0,0019 \text{ МГц} \quad (6)$$

и лэмбовского сдвига

$$\delta(H, n=2) = 1067,8514 \pm 0,0019 \text{ МГц} \quad (7)$$

Погрешность в теоретическом значении γ на порядок меньше экспериментальной погрешности в (6) и (7).

Еще раз подчеркнем, что величина лэмбовского сдвига определялась по теоретическому значению γ . Отношение этих величин ν/γ порядка единицы. Однако, расчет γ с точностью $\lesssim 1\text{ppm}$ существенно проще, чем последовательный квантовоэлектродинамический расчет величины ν с той же точностью. Так, известные в настоящее время теоретическое значения для лэмбовского сдвига^{5,6} получены с погрешностью 10ppm ($\sim 10 \text{ кГц}$).

Значение лэмбовского сдвига (7) оказалось очень близким к среднему значению $\bar{\delta}(H, n=2) = 1057,8535 \text{ МГц}$ экспериментальных результатов^{3,4}.

В заключение отметим, что достигнутая точность в измерении лэмбовского сдвига ($\sim 2 \text{ кГц}$) позволяет, в принципе, извлечь из нашего эксперимента по интерференции атомных состояний радиус протона с погрешностью $0,007 \text{ Ф}$, что примерно в два раза точнее, чем в настоящее время получается из экспериментов по рассеянию электронов¹⁰. Для этого, конечно, нужно располагать теоретическим квантовоэлектродинамическим расчетом лэмбовского сдвига с соответствующей точностью.

Литература

1. Sokolov Yu.L. Proc. 2-th Int. Conf. on Precision Meas. and Fund. Constants., Gaithsburg, USA, 1981.
2. Соколов Ю.Л., Яковлев В.П. ЖЭТФ, 1982, 83, 15.
3. Newton G., Andrews D.A., Unworth O.J. Phil. Trans. Roy. Soc., London, 1979, 290, 373.
4. Lundeen S.R., Pipkin F.M. Phys. Rev. Lett., 1981, 46, 232.
5. Erickson G.W. Phys. Rev. Lett., 1971, 27, 780; Phys. Chem. Ref. Data., 1977, 6, 831.

6. *Mohr P.J.* Phys. Rev. Lett., 1975, **34**, 1050.
7. *Пальчиков В.Г.* Тезисы док. Всесоюз. конф. по теор. ат. и ат. спектров. Минск, 1983.
8. *Kinoshita T., Lindquist W.B.* Phys. Rev. Lett., 1981, **47**, 1573.
9. *Amin S.R., Caldwell C.D., Liechten W.* Phys. Rev. Lett., 1981, **47**, 1234.
10. *Simon G.G., Schmitt Ch., Borkowski F., Walther V.W.*, Nucl. Phys., 1980, **A 333**, 381.

Всесоюзный
научно-исследовательский
физико-технических и
радиотехнических измерений

Поступила в редакцию
18 августа 1983г.

