

Эффекты нарушения СРТ- и лоренц-инвариантности в водородоподобных атомах¹

Харланов Олег Георгиевич²

аспирант

Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: okharl@mail.ru

Введение

Несмотря на то, что стандартная модель подтверждена многочисленными экспериментами, она существенно не включает в себя описание гравитационного взаимодействия на квантовом уровне. В то же время, теории, претендующие на такое описание (напр., теория суперструн), пока не имеют экспериментальных подтверждений, поскольку новые эффекты проявляются на планковских масштабах энергий (10^{19} ГэВ). Для исследования таких эффектов при *достижимых* в обозримом будущем энергиях в начале 1990-х годов была предложена *расширенная* стандартная модель [1], формулируемая в виде набора низкоэнергетических поправок к лагранжиану стандартной модели, параметризуемых тензорными константами. Пока что их величины лишь *ограничены сверху*. Наименее слабые ограничения имеет компонента b_0 аксиального вектора b_μ , добавляющего в лагранжиан электродинамики слагаемое $(-b_\mu \bar{\Psi} \gamma^\mu \gamma_5 \Psi)$. При $b_0 \neq 0$ наличие такой поправки приводит к нарушению пространственной четности. Кроме того, при ненулевом b_μ нарушаются лоренц-инвариантность и СРТ-четность.

Предметом нашего исследования являлся атом водорода (а также аналогичные ему с квантовомеханической точки зрения водородоподобные ионы) на фоне аксиального вектора b_μ . Ключевой задачей здесь является построение собственных функций электрона в кулоновском потенциале. Эта задача до сих пор не обсуждалась в публикациях; вместо этого исследования касались, в основном, спектроскопических предсказаний с использованием теории возмущений. Нахождение же собственных функций электрона позволяет еще и исследовать радиационные свойства атома водорода, т.е. взаимодействие с фотонами.

Методы

Мы ограничились наличием *малой* b_μ -поправки к электродинамике, приближением неподвижного ядра и одночастичным приближением (т.е. квантовой механикой). Кроме того, считалось, что ядро создает чисто кулоновский потенциал. В нашем исследовании мы использовали метод разложения в ряд по b_μ , вплоть до второго порядка. Основным интересом представляет константа b_0 , т.к. именно она нарушает Р-четность в атоме и имеет наименее слабые экспериментальные ограничения, $|b_0| \leq 10^{-2}$ эВ. В то же время, Р-четность в атомах может нарушаться и за счет слабого взаимодействия [4, 5, 6, 7].

Волновые функции собственных состояний электрона в центральном потенциале мы получили, разлагая решение уравнения Дирака в ряд по b_0 , а также с использованием выведенного нами квазирелятивистского волнового уравнения (т.н. $1/c^2$ -приближение [2, 3]). Кроме того, унитарное преобразование позволяет приближенно свести поведение электрона во внешнем *электромагнитном* поле при $b_\mu \neq 0$ к поведению при $b_\mu = 0$

¹ Тезисы доклада основаны на результатах одноименной дипломной работы, написанной автором под руководством д.ф.-м.н., профессора Жуковского В.Ч.

² Автор выражает признательность д.ф.-м.н., профессору Жуковскому В.Ч. за помощь в подготовке тезисов.

электрона, обладающего недираковскими электрическим и магнитным моментами, а также выразить собственные функции электрона при $b_\mu \neq 0$ через их вид при $b_\mu = 0$, даже если он неизвестен. Последнее позволяет, например, неявно решить уравнение Дирака в произвольном центральном потенциале в случае ненулевого b_0 .

Результаты

Нами были найдены решения уравнения Дирака для электрона в центральном поле в квадратичном приближении по b_0 , выражающиеся через решения при $b_0 = 0$. В кулоновском поле решения могут быть записаны явно. Из-за нарушения четности снимается вырождение энергии по квантовому числу $l = j \pm 1/2$, специфичное для кулоновского поля:

$$\Delta E(j) \equiv E(n, l = j + 1/2, j) - E(n, l = j - 1/2, j) = (2j + 1)b_0^2 / m_e c^2,$$

где m_e — масса электрона. Полученное расщепление для состояний $2s_{1/2}$ и $2p_{1/2}$ в атоме водорода имеет величину $|\Delta E(1/2)| \leq 10^5$ Гц, что на четыре порядка меньше лэмбовского сдвига, однако, в отличие от последнего, существующего лишь для состояний с $j = 1/2$, расщепление, связанное с нарушением четности, растет с увеличением j , поэтому, в принципе, доступно для экспериментального исследования.

Рассматривая более общую задачу о взаимодействии с внешним электромагнитным полем электрона, находящегося в сферически-симметричной потенциальной яме, можно явно указать калибровочно-инвариантное унитарное преобразование, сводящее линейные и квадратичные по b_0 эффекты к расщеплению энергии $\Delta E(j)$, поправкам к электрическому и магнитному дипольным моментам электрона и специфическому нелинейному по внешнему полю и b_0 взаимодействию. Наличие недираковских дипольных моментов приводит к появлению у электронной оболочки ненулевого *анепольного* момента [4], отсутствующего у систем с ненарушенной пространственной четностью.

Наконец, при ненулевом b_0 наблюдается нарушение симметрии диаграммы направленности спонтанного $E1$ -излучения *поляризованного* по магнитному квантовому числу атома водорода. Степень асимметрии имеет порядок $|b_0| / m_e c^2 \leq 2 \cdot 10^{-8}$. Это *линейное* по b_0 отклонение от центральной симметрии исчезает для *неполяризованных* атомов, что является следствием ненарушенной при $b_0 \neq 0$ $SO(3)$ -инвариантности.

Литература

1. Colladay D., Kostelecký V.A. // Phys. Rev. 1998, **D58**, p.116002; *hep-ph/9809521*.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, т.4, М.: Наука, 1989.
3. Соколов А.А., Тернов И.М., Жуковский В.Ч. Квантовая механика, М.: Наука, 1979.
4. Зельдович Я.Б. // ЖЭТФ 1957, **33**, стр.1531.
5. Curtis Michel F. // Phys.Rev. 1965, **138B**, p.408.
6. Bouchiat M.A., Bouchiat M.A. // Phys. Lett. 1974, **48B**, p.111.
7. Хриплович И.Б. // УФН 1988, том **155**, вып.2, стр.325.
8. Kostelecký V.A., Lane C.D. // J.Math.Phys. 1999, **40**, p.6245; *hep-ph/9909542*.
9. Ferreira Jr. M.M., Moucherek F.M.O. // J.Math.Phys. 1999, **40**, p.6245; *hep-ph/9909542*.