

На правах рукописи

Крутов Андрей Александрович

СПЕКТРЫ ЭНЕРГИИ ЛЕГКИХ МЮОННЫХ АТОМОВ
В КВАЗИПОТЕНЦИАЛЬНОМ ПОДХОДЕ

01.04.16

Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Самара – 2011

Работа выполнена на кафедре общей и теоретической физики в ФГБОУ ВПО
«Самарский государственный университет»

Научный руководитель

Мартыненко Алексей Петрович
доктор физико–математических наук, доцент
Самарский государственный университет

Официальные оппоненты

Арбузов Борис Андреевич
доктор физико–математических наук, профессор
ОТФВЭ НИИЯФ МГУ, г. Москва

Фаустов Рудольф Николаевич
доктор физико–математических наук, профессор
ВЦ РАН, г. Москва

Ведущая организация

Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова
Объединенного института ядерных исследований

Защита диссертации состоится «____» _____ 2011 г. в ____ на заседании
диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций
Д 501.001.77 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 (“19 корпус НИИЯФ МГУ”) ауд. 2–15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-исследовательского
института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан «____» _____

Ученый секретарь

диссертационного совета

Страхова С. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию тонкой и сверхтонкой структуры уровней энергии легких мюонных атомов. В рамках квазипотенциального метода проведен расчет тонкой структуры P-уровней иона мюонного гелия ($\mu \text{ } ^4_2\text{He}^+$), сверхтонкой структуры основного состояния атомов мюонного гелия ($\mu \text{ } e \text{ } ^4_2\text{He}$), ($\mu \text{ } e \text{ } ^3_2\text{He}$), а также лэмбовского сдвига ($2P_{1/2} - 2S_{1/2}$) в атоме мюонного дейтерия (μd).

Актуальность темы. Квантовая электродинамика (КЭД) является единственной последовательной моделью квантовой теории поля, дающей надежные количественные предсказания с высокой точностью. В силу этого свойства КЭД служит главным объектом для изучения и применимости принципов релятивистской квантовой теории и примером для построения других моделей - калибровочных теорий сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий. Отсюда следует важность проверки самой квантовой электродинамики.

В настоящее время для проверки КЭД используется не только энергетический спектр атома водорода и аномальный магнитный момент электрона, но и структура энергетических уровней дейтерия, гелия, позитрония, мюония и других простейших атомов. В настоящее время расчеты квантовоэлектродинамических эффектов в подобных системах позволяют получать точные значения фундаментальных физических констант, таких как постоянная тонкой структуры α , постоянная Ридберга, масса электрона, зарядовый радиус протона и т.д. Высокий уровень точности теоретических и экспериментальных исследований спектров энергии простейших атомов делает возможным поиск новой физики за рамками Стандартной модели.

Наряду с электронными атомами, в настоящее время, ведется интенсивное изучение мюонных атомов (мюонный водород, мюонный дейтерий, ионы мюонного гелия и др.). Исследования проводятся в направлении мюонного катализа ядерного синтеза, изучения электромагнитной структуры ядра и проверки квантовой электродинамики. Мюонные атомы отличаются от обычных тем, что в них один электрон заменен на отрицательно заряженный мюон. Так как мюон примерно в 200 раз тяжелее электрона, то на энергетическую структуру существенное влияние оказывают такие эффекты, как поляризация вакуума, эффекты структуры ядра и эффекты отдачи. Необходимо отметить, что из спектроскопии мезоатомов можно получить бо-

лее точные значения зарядовых радиусов протона, гелиона, α -частицы и т.д., так как в них эффекты структуры ядра играют более важную роль, чем в обычных атомах.

С экспериментальной стороны, за последние несколько десятилетий был достигнут определенный прогресс в измерении спектров энергии легких атомов. В CERN в 1977 был проведен эксперимент с ионом мюонного гелия ($\mu \text{ } ^4_2\text{He}^+$) [7]. В нем наблюдались резонансные переходы с длинами волн 811.68(15) нм, 897.6(3) нм, которые соответствуют интервалам $(2P_{3/2} - 2S_{1/2})$ и $(2P_{1/2} - 2S_{1/2})$. В более поздних экспериментах обнаружить резонансный переход в области $811.4 \text{ нм} \leq \lambda \leq 812.0 \text{ нм}$ не удалось [10]. Первое успешное измерение лэмбовского сдвига в мюонном водороде μp (49881.88(76) ГГц) [14] привело к новому значению для зарядового радиуса протона $r_p = 0.84184(36)(56)$ фм. Это значение на пять стандартных отклонений отличается от значения зарядового радиуса протона r_p , рекомендованного КОДАТА. Для объяснения этого расхождения проводится новый анализ ранее вычисленных вкладов, а также делаются попытки его объяснения с точки зрения других подходов, лежащих за рамками Стандартной модели.

В настоящее время в институте PSI (Paul Scherrer Institute, Швейцария) коллаборацией CREMA (Charge Radius Experiment with Muonic Atoms) проводятся эксперименты по измерению лэмбовского сдвига в атоме мюонного дейтерия. В 2011-2013 планируется исследование частот переходов $(2S - 2P)$ в ионах мюонного гелия ($\mu \text{ } ^4_2\text{He}^+$), ($\mu \text{ } ^3_2\text{He}^+$). В результате будут получены значения зарядовых радиусов гелиона и α -частицы с точностью до 0.0005 фм.

Цель диссертационной работы.

Целью диссертации является изучение тонкой и сверхтонкой структуры энергетических уровней легких мюонных атомов. В рамках квазипотенциального метода в квантовой электродинамике в диссертации решаются следующие задачи:

1. Исследование тонкой структуры спектра $(2P_{3/2} - 2P_{1/2})$ иона мюонного гелия ($\mu \text{ } ^4_2\text{He}^+$). Вычисление поправок на однопетлевую и двухпетлевую поляризацию вакуума и структуру ядра порядка α^5 , α^6 .
2. Вычисление сверхтонкого расщепления основного состояния атома мюонного гелия ($\mu e \text{ } ^4_2\text{He}$). Учет эффектов однопетлевой поляризации вакуума, структуры ядра и электронных вершинных поправок порядка

α^5 , $\alpha^5 M_e/M_\mu$, α^6 .

3. Расчет интервала сверхтонкой структуры основного состояния атома мюонного гелия ($\mu e \text{ } ^3_2\text{He}$). Вычисление вкладов однопетлевой поляризации вакуума, эффектов структуры ядра и электронных вершинных поправок в первом и втором порядках теории возмущений порядка α^5 , $\alpha^5 M_e/M_\mu$, α^6

4. Вычисление лэмбовского сдвига ($2P_{1/2} - 2S_{1/2}$) в атоме мюонного дейтерия (μd). Расчет релятивистских поправок и вкладов структуры ядра с эффектами однопетлевой и двухпетлевой поляризации вакуума порядка $\alpha(Z\alpha)^4$, $\alpha^2(Z\alpha)^4$. Вычисление вклада эффектов поляризации вакуума и эффектов структуры ядра порядка α^5 , α^6 в интервал тонкой структуры мюонного дейтерия.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. В рамках квазипотенциального метода проведен расчет поправок порядка α^5 , α^6 к интервалу тонкой структуры ($2P_{3/2} - 2P_{1/2}$) иона мюонного гелия ($\mu^4_2\text{He}$)⁺, обусловленных эффектами двухпетлевой поляризации вакуума. Вычислены вклады структуры ядра в первом и втором порядках теории возмущений. Полученная величина тонкого расщепления $\Delta E = 146.181$ мэВ на порядок улучшает предыдущие вычисления [6].

2. Проведен расчет сверхтонкого расщепления основного состояния атома мюонного гелия ($\mu e^4_2\text{He}$). Вычислены поправки на однопетлевую поляризацию вакуума во втором порядке теории возмущений порядка $\alpha^5(M_e/M_\mu)$. Учтены поправки на структуру ядра порядка α^6 . Проведен расчет электронных вершинных поправок в первом и втором порядках теории возмущений порядка α^5 . Итоговая величина сверхтонкого расщепления мюонного гелия $\Delta\nu = 4465.526$ МГц улучшает предыдущие результаты [11, 13].

3. Вычислен интервал сверхтонкой структуры основного состояния атома мюонного гелия ($\mu e^3_2\text{He}$). Проведен расчет поправок на поляризацию вакуума во втором порядке теории возмущений порядка $\alpha^5(M_e/M_\mu)$. Учтены электронные вершинные поправки в первом и втором порядках теории возмущений порядка α^5 . Вычислены вклады структуры ядра в первом и втором порядках теории возмущений порядка α^4 и α^6 . Полученное значение сверхтонкого расщепления $\Delta\nu = 4416.648$ МГц улучшает предыдущие вычисления [12].

4. Проведен расчет лэмбовского сдвига ($2P_{1/2} - 2S_{1/2}$) в атоме мюонного

дейтерия μd . Учтены релятивистские поправки с эффектами однопетлевой и двухпетлевой поляризации вакуума порядка $\alpha(Z\alpha)^4$, $\alpha^2(Z\alpha)^4$. Вычислены вклады структуры ядра с эффектами двухпетлевой поляризации вакуума в первом и втором порядках теории возмущений порядка $\alpha(Z\alpha)^4$, $\alpha^2(Z\alpha)^4$ соответственно. Проведено вычисление эффектов двухпетлевой поляризации вакуума во втором порядке теории возмущений и эффектов структуры ядра в однофотонном взаимодействии в интервале тонкой структуры мюонного дейтерия. Полное значение лэмбовского сдвига $\Delta E = 202.4136$ мэВ улучшает предыдущий расчет [5] и является надежной оценкой для сравнения с экспериментальными результатами.

Научная новизна

При решении поставленных задач в диссертации были получены следующие новые результаты:

1. Получены интегральные представления для поправок к тонкой структуре $(2P_{3/2} - 2P_{1/2})$ иона мюонного гелия $({}^4_2\text{He})^+$, обусловленных эффектами двухпетлевой поляризации вакуума и структуры ядра в первом и втором порядках теории возмущений. Проведен расчет численных значений поправок к интервалу тонкой структуры иона мюонного гелия $(\mu {}^4_2\text{He})^+$ на двухпетлевую поляризацию вакуума и структуру ядра в первом и втором порядках теории возмущений порядка α^5 , α^6 с точностью 0.001 мэВ.
2. Получены аналитические выражения для поправок на однопетлевую поляризацию вакуума и структуру ядра во втором порядке теории возмущений к сверхтонкому расщеплению основного состояния атомов мюонного гелия $(\mu e {}^4_2\text{He})$ и мюонного гелия $(\mu e {}^3_2\text{He})$. Вычислены значения вкладов эффектов поляризации вакуума в интервал сверхтонкого расщепления основного состояния атомов $(\mu e {}^4_2\text{He})$, $(\mu e {}^3_2\text{He})$ во втором порядке теории возмущений порядка $\alpha^5 M_e/M_\mu$.
3. Получены численные значения вкладов эффектов структуры ядра во втором порядке теории возмущений в сверхтонкое расщепление основного состояния атома мюонного гелия $(\mu e {}^4_2\text{He})$ порядка α^6 . Вычислены вклады структуры ядра в первом и во втором порядках теории возмущений в сверхтонкое расщепление основного состояния атома $(\mu e {}^3_2\text{He})$ порядка α^4 и α^6 соответственно.
4. Проведено вычисление электронных вершинных поправок к сверхтонкому

интервалу в атомах мюонного гелия ($\mu e_2^4 He$), ($\mu e_2^3 He$) в первом и втором порядках теории возмущений. Получены соответствующие интегральные выражения и численные значения вкладов порядка α^5 . Показано, что при вычислении вклада электронных вершинных поправок в сверхтонкую структуру атомов ($\mu e_2^4 He$), ($\mu e_2^3 He$) необходимо использовать точные однопетлевые выражения для электромагнитных формфакторов электрона.

5. В рамках квазипотенциального подхода получены интегральные представления для поправок к лэмбовскому сдвигу ($2P_{1/2} - 2S_{1/2}$) в мюонном дейтерии на двухпетлевую поляризацию вакуума с эффектами структуры ядра во втором порядке теории возмущений. Вычислены соответствующие значения порядка $\alpha^2(Z\alpha)^4$.

6. Построены операторы взаимодействия частиц для релятивистских поправок и эффектов однопетлевой и двухпетлевой поляризации вакуума к лэмбовскому сдвигу в атоме мюонного дейтерия. Проведен численный расчет соответствующих вкладов порядка $\alpha(Z\alpha)^4$, $\alpha^2(Z\alpha)^4$.

7. Получены интегральные выражения для эффектов структуры ядра с двухпетлевой поляризацией вакуума в лэмбовском сдвиге в мюонном дейтерии в однофотонном взаимодействии. Проведен численный расчет соответствующих поправок порядка $\alpha^2(Z\alpha)^4$.

Практическая ценность работы.

1. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения величин зарядовых радиусов таких частиц, как протон, дейтрон, гелион и α -частица.
2. Вычисленные частоты переходов можно использовать для сопоставления с экспериментальными данными с целью более точной проверки КЭД.

Апробация результатов. Основные результаты были представлены на следующих научных конференциях: X Международные чтения по квантовой оптике (Самара, 2007); Сессия-конференция РАН "Физика фундаментальных взаимодействий" (Москва, 2007); Сессия-конференция РАН "Физика фундаментальных взаимодействий" (Протвино, 2008); Международная конференция по математической физике и ее приложениям (Самара, 2008); Всероссийское совещание по квантовой метрологии и фундаментальным физическим константам (Санкт-Петербург, 2008); XXIV Съезд по спектроскопии (Москва, Троицк, 2010); Вторая международная конференция по математической физике и ее приложениям (Самара, 2010); Третье всероссийское совещание "Прецизионная физика и фундаментальные физические константы" (Санкт-

Петербург, 2010); XV Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц (Москва, 2011); также результаты докладывались и обсуждались на регулярных семинарах и конференциях в Самарском государственном университете.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе: в журналах из списка рекомендованных ВАК - 4, в сборниках трудов конференций - 4, в других изданиях - 1. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Личный вклад диссертанта в работы [1, 2, 4] является определяющим. В работе [3] диссертантом вычислялись поправки на поляризацию вакуума. Постановка задач и обсуждение результатов выполнялись совместно с соавторами.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии из 123 источника. Она содержит 14 рисунков и 5 таблиц. Общий объем диссертации составляет 130 листов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении обосновывается актуальность исследуемой проблемы, сформулированы основные задачи диссертации.

Первая глава. Квазипотенциальный метод в квантовой электродинамике. Глава состоит из трех параграфов. В §1 кратко излагаются основы квазипотенциального метода в квантовой электродинамике [1] – [4]. В §2 изложены принципы построения кулоновской функции Грина. В §3 решена задача о расчете тонкой структуры иона мюонного гелия (${}^4_2\text{He}^+$).

В первом приближении взаимодействие частиц в ионе (${}^4_2\text{He}^+$) описывается гамильтонианом Брейта. Искомый интервал ($2P_{3/2} - 2P_{1/2}$) для иона (${}^4_2\text{He}^+$) можно записать в виде [8]:

$$\begin{aligned} \Delta E^{fs} = E(2P_{3/2}) - E(2P_{1/2}) = & \frac{\mu^3(Z\alpha)^4}{32m_1^2} \left[1 + \frac{2m_1}{m_2} + 2a_\mu \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right) \right] + \quad (1) \\ & + \frac{5m_1(Z\alpha)^6}{256} - \frac{m_1^2(Z\alpha)^6}{64m_2} + \frac{\alpha(Z\alpha)^6\mu^3}{32\pi m_1^2} \left[\ln \frac{\mu(Z\alpha)^2}{m_1} + \frac{1}{5} \right] + \\ & + \alpha(Z\alpha)^4 A_{VP} + \alpha^2(Z\alpha)^4 B_{VP} + A_{str}(Z\alpha)^6 \mu^2 r_\alpha^2 \end{aligned}$$

Это выражение содержит поправки на отдачу и релятивистские поправки [8, 19]. A_{VP} , B_{VP} - вклады поляризации вакуума в первом и втором порядках

теории возмущений, A_{str} - эффекты структуры ядра. В данном параграфе вычислены вклады A_{VP} , B_{VP} , A_{str} .

Эффекты поляризации вакуума ведут к модификации спин-орбитального и кулоновского взаимодействий. Нами вычислены поправки на однопетлевую и двухпетлевую поляризацию вакуума в первом и втором порядках теории возмущений [15, 16].

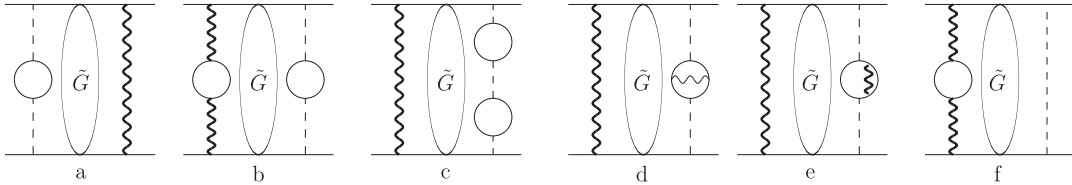


Рис. 1: Эффекты однопетлевой и двухпетлевой поляризации вакуума во втором порядке теории возмущений. \tilde{G} - точная кулоновская функция Грина.

Эффекты двухпетлевой поляризации вакуума во втором порядке теории возмущений дают вклад порядка $\alpha^2(Z\alpha)^4$ (см. Рис 1(a–e)) [17, 18].

Для того, чтобы учесть вклад эффектов структуры ядра, рассмотрим следующий потенциал:

$$\Delta V_{str}^{fs}(\mathbf{k}) = -\frac{\pi Z\alpha}{m_1^2} \frac{[\mathbf{k} \times \mathbf{p}] \boldsymbol{\sigma}_1}{\mathbf{k}^2} F_1(k^2) \left[1 + \frac{2m_1}{m_2} + 2a_\mu \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right) \right]. \quad (2)$$

В (2) использовалась дипольная параметризация для дираковского форм-фактора F_1 . Вклады эффектов структуры ядра во втором порядке теории возмущений будут описываться матричными элементами $2\langle \Delta V^{fs} \cdot \tilde{G} \cdot \Delta V_{str}^C \rangle$ и $2\langle \Delta V^{fs} \cdot \tilde{G} \cdot \Delta V_{str}^{fs} \rangle$. Здесь $\Delta V^{fs}(r)$ - оператор спин-орбитального взаимодействия, а $\Delta V_{str}^C = \frac{Z\alpha}{2r} (\Lambda_\alpha r + 2) e^{-\Lambda_\alpha r}$. Полная величина тонкого расщепления ($2P_{3/2} - 2P_{1/2}$) равна $\Delta E = 146.181$ мэВ.

Вторая глава. Сверхтонкая структура мюонного гелия ${}^4_2\text{He}$. Глава состоит из шести параграфов. В §1 проводится краткий обзор существующих работ по данной тематике, методов расчета и их сравнение. Расчет сверхтонкой структуры основан на квазипотенциальном методе и теории возмущений, сформулированной для данной системы в [11, 13]. В рамках этого подхода вычислены поправки на поляризацию вакуума порядка $\alpha^5 M_e/M_\mu$ и структуру ядра порядка α^6 . Сверхтонкая структура основного состояния мюонного гелия ($\mu e_2^4 \text{He}$) возникает в результате спин-спинового взаимодействия мюона и электрона, которое в однофотонном взаимодействии описывается выраже-

нием:

$$\Delta H^{hfs} = -\frac{8}{3}\pi \frac{\alpha}{m_e m_\mu} (\mathbf{s}_\mu \mathbf{s}_e) \delta(\mathbf{x}_\mu - \mathbf{x}_e). \quad (3)$$

Потенциалы, соответствующие поправкам на поляризацию вакуума и структуру ядра, учитываются в качестве дополнительных слагаемых к (3).

В §2 проводится аналитическое и численное вычисление поправок к сверхтонкой структуре, связанных с однопетлевой поляризацией вакуума. Новые поправки в сверхтонкое расщепление связаны с амплитудами (см. Рис. 1a,f). Вычисленные вклады имеют порядок $\alpha^5 M_e/M_\mu$.

В §3 анализируются эффекты структуры ядра (см. Рис. 2a). Эти поправки описываются зарядовым радиусом α -частицы. Данные эффекты дают вклад порядка α^6 .

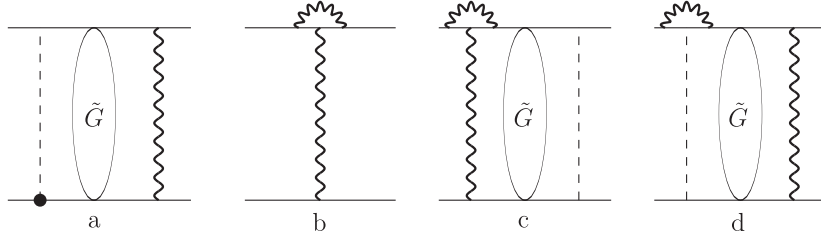


Рис. 2: Эффекты структуры ядра и электронные вершинные поправки. Пунктирная линия обозначает кулоновский фотон. Волнистой линией обозначена сверхтонкая часть потенциала Брейта. \tilde{G} - это кулоновская функция Грина.

В §4 вычислены электронные вершинные поправки. В импульсном представлении соответствующий оператор сверхтонкой структуры имеет вид:

$$\Delta V_{vertex}^{hfs}(k^2) = -\frac{8\alpha^2}{3m_e m_\mu} (\mathbf{s}_e \mathbf{s}_\mu) [G_M^{(e)}(k^2) - 1]. \quad (4)$$

Здесь $G_M^{(e)}$ - магнитный формфактор электрона. Переданный импульс в атоме ($\mu e_2^4 He$) будет порядка массы электрона. Следовательно, для вычисления этих поправок, использование приближения $G_M^{(e)}(k^2) \approx G_M^{(e)}(0) = 1 + \kappa_e$ не будет корректным. В своих вычислениях мы используем известное однопетлевое выражение для электромагнитного формфактора электрона. В первом порядке теории возмущений получаем вклад порядка α^5 (см. Рис.2b).

Во втором порядке теории возмущений вычислены электронные вершинные поправки, связанные со сверхтонкой частью гамильтониана (см. Рис.2c), а также соответствующие поправки к кулоновскому взаимодействию (см. Рис. 2d). Данные вклады имеют порядок α^5 .

В §5 рассмотрен расчет релятивистских поправок к сверхтонкому расщеплению основного состояния мюонного гелия на основе уравнения Дирака [9].

В §6 подводятся итоги вычислений. Полное значение сверхтонкого расщепления основного состояния атома мюонного гелия ($\mu e^4 He$) равно $\Delta\nu = 4465.526$ МГц. Проводится сравнение полученного результата с результатами расчетов других авторов, а также оценивается погрешность проведенных вычислений.

Третья глава. Сверхтонкое расщепление основного состояния атома мюонного гелия 3_2He . Глава состоит из пяти параграфов. В §1 исследована сверхтонкая структура основного состояния атома ($\mu e^3 He$) и вычислены основные вклады порядка α^4 (энергия Ферми с поправками на отдачу). Ядром атома ($\mu e^3 He$) является гелион, спин которого равен $1/2$, поэтому сверхтонкая структура энергетических уровней этого атома обусловлена спин-спиновым взаимодействием всех трех частиц (см. Рис. 3). Мы вычисляем "малое" сверхтонкое расщепление, то есть расстояние между уровнями с $F = 3/2$ и $F = 1/2$.

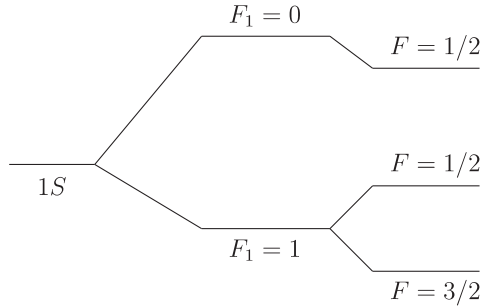


Рис. 3: \vec{F} - полный спин атома, \vec{J} - спин электрона, \vec{F}_1 - спин подсистемы $(\mu {}^3_2He)^+$. $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{J}$

Сверхтонкая часть гамильтониана имеет вид:

$$\delta H = -\frac{8\pi}{3}(\boldsymbol{\mu}_N \cdot \boldsymbol{\mu}_\mu)\delta(\mathbf{x}_\mu) - \frac{8\pi}{3}(\boldsymbol{\mu}_\mu \cdot \boldsymbol{\mu}_e)\delta(\mathbf{x}_\mu - \mathbf{x}_e) - \frac{8\pi}{3}(\boldsymbol{\mu}_e \cdot \boldsymbol{\mu}_N)\delta(\mathbf{x}_e), \quad (5)$$

где магнитные моменты электрона, мюона и гелиона равны

$$\boldsymbol{\mu}_e = -\frac{g_e e}{2m_e} \mathbf{s}_e, \quad \boldsymbol{\mu}_\mu = -\frac{g_\mu e}{2m_\mu} \mathbf{s}_\mu, \quad \boldsymbol{\mu}_N = -\frac{g_N e}{2m_p} \mathbf{I}_N.$$

В §2 проведено вычисление однопетлевых поправок на поляризацию вакуума. Новые поправки определяются диаграммами (см. Рис.1a,f). Вычисленные вклады имеют порядок $\alpha^5 M_e/M_\mu$.

В §3 рассматриваются поправки на структуру ядра [20]. Распределение заряда и магнитного момента гелиона определяется электрическим и магнитным формфакторами G_E и G_M , для которых используются известные параметризации. В однофотонном взаимодействии поправка на структуру ядра определяется амплитудой на Рис. 4. Вычисленная поправка (Рис.4с) име-

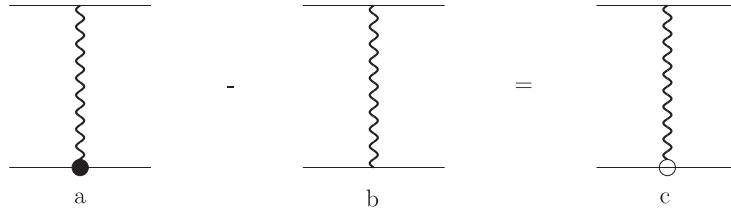


Рис. 4: Вклад эффектов структуры ядра в однофотонном взаимодействии. Черной точкой обозначен вершинный оператор. Диаграмма (Рис.4b) соответствует точечному вкладу от δ -функции. Волнистая линия обозначает сверхтонкую часть потенциала Брейта.

ет порядок α^4 . Во втором порядке теории возмущений новые вклады (см. Рис.2а) имеют порядок α^6 .

В §4 проведен расчет электронных вершинных поправок. Вычислены вклады в первом и втором порядках теории возмущений порядка α^5 .

В §5 подводятся итог вычислений, оценивается теоретическая погрешность расчетов. Полное значение интервала сверхтонкого расщепления основного состояния атома ($\mu e^3 He$) равно $\Delta\nu = 4416.648$ МГц.

Четвертая глава. Лэмбовский сдвиг ($2P_{1/2} - 2S_{1/2}$) в атоме мюонного дейтерия. В §1 производится постановка задачи. При вычислении лэмбовского сдвига ($2P_{1/2} - 2S_{1/2}$) в атоме мюонного дейтерия используем квази-потенциальный метод, в котором основной вклад в оператор взаимодействия частиц дает гамильтониан Брейта.

В §2 вычислены поправки, связанные с эффектами однопетлевой, двухпетлевой и трехпетлевой поляризации вакуума [22, 23]. Основной вклад в лэмбовский сдвиг имеет порядок $\alpha(Z\alpha)^2$. Вычислены вклады мюонной поляризации вакуума.

В §3 проведено вычисление релятивистских поправок и эффектов однопетлевой и двухпетлевой поляризации вакуума порядка $\alpha(Z\alpha)^4$, $\alpha^2(Z\alpha)^4$. Эффекты вакуумной поляризации приводят к изменению членов брейтовского гамильтониана. Однопетлевые поправки к потенциалу Брейта были получены в [15, 21]. Также в этом параграфе вычислены поправки на поляризацию вакуума во втором порядке теории возмущений.

§4 посвящен вычислению вкладов, связанных со структурой ядра. В главном порядке эти эффекты описываются зарядовым радиусом дейтрона. Рассчитаны вклады амплитуд (см. Рис. 5). Новые вычисляемые поправки порядка $\alpha(Z\alpha)^4$, $\alpha^2(Z\alpha)^4$ соответствуют диаграммам (см. Рис.5с–f). Учитывается вклад поляризуемости ядра [24]

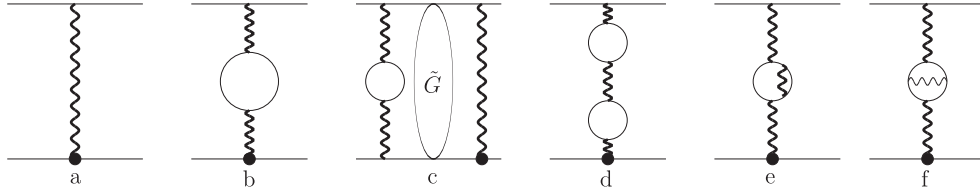


Рис. 5: Эффекты структуры ядра и поляризации вакуума в первом и втором порядках теории возмущений. Черной точкой обозначен вершинный оператор.

В §5 вычислены поправки на отдачу, собственную энергию мюона и эффекты поляризации вакуума. Вычисляются поправки до порядка $O(\alpha^6)$ включительно.

В §6 проведено вычисление тонкого расщепления ($2P_{3/2} - 2P_{1/2}$) в атоме мюонного дейтерия. Вычислены поправки на однопетлевую и двухпетлевую поляризацию вакуума в первом и втором порядке теории возмущений (см. Рис.1а–е). Учтен вклад эффектов структуры в первом порядке теории возмущений.

В §7 подводятся итоги вычислений и оценивается теоретическая погрешность. Полученный результат сравнивается с результатами предыдущих вычислений. Полное значение лэмбовского сдвига в мюонном дейтерии равно $\Delta E = 202.4136$ мэВ.

Заключение. В заключении сформулированы основные результаты, представленные в диссертации.

Диссертация поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № 11-02-00019) и Федеральной целевой программой "Научные и педагогические кадры инновационной России"(грант № НК-20Р/1)

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Крутов А.А., Мартыненко А.П. Сверхтонкая структура основного состояния атома мюонного гелия // Вестник СамГУ. – 2008. – № 8/1(67). – С.550–566.
2. Krutov A.A., Martynenko A.P. Ground-state hyperfine structure of the muonic helium atom. // Physical Review A. – 2008. – V. 78. – P. 032513-1–032513-11.
3. Elekina E.N., Krutov A.A., Martynenko A.P. Fine structure of the muonic ${}^4\text{He}$ ion. // Письма в ЭЧАЯ. – 2011. – Т.8. – №4(167). – С.554–563.
4. Krutov A.A., Martynenko A.P. Hyperfine structure of the ground state muonic ${}^3\text{He}$ atom. // The European Physical Journal D. – 2011. – V.62. – P.163–175.
5. Крутов А.А., Мартыненко А.П. Сверхтонкая структура основного состояния атома мюонного гелия. // Сборник тезисов Всероссийского совещания по Квантовой метрологии и фундаментальным физическим константам, 2008, Санкт-Петербург, Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Метрологии, С. 33.
6. Крутов А.А., Мартыненко А.П. Сверхтонкая структура атома мюонного гелия. // Сборник тезисов второй международной конференции "Математическая физика и ее приложения 2010, Самара, С. 189–191.
7. Крутов А.А., Мартыненко А.П., Салеев А.В. Сверхтонкая структура основного состояния мюонного гелия. // Сборник тезисов XXIV Съезда по спектроскопии, 2010, Москва, Троицк, ФИАН, ИСАН, Т. 2, С. 431–432.
8. Крутов А.А., Мартыненко А.П. Сверхтонкая структура основного состояния мюонного гелия. // Сборник тезисов третьего всероссийского совещания "Прецизионная физика и фундаментальные физические константы 2010, Санкт-Петербург, Физико-технический институт, С. 36.
9. Krutov A.A., Martynenko A.P. Lamb shift in muonic deuterium atom // arXiv:1107.3080v3 [hep-ph].

Литература

- [1] Logunov A.A., Tavkhelidze A.N. Quasi-optical approach in quantum field theory // Nuovo Cimento. – 1963. – V.29. – P.380–399.
- [2] Логунов А.А., Саврин В.И., Тюрин Н.Е., Хрутсалева О.А. Одновременное уравнение для системы двух частиц в квантовой теории поля // ТМФ. – 1971. – Т.6. – С.157–165.
- [3] Garsevanishvili V.R., Matveev V.A., Slepchenko L.A., Tavkhelidze A.N. Quasipotential theory of high- energy hadron scattering // Phys. Rev. D. – 1971. – V.4. – P.849-861.
- [4] Фаустов Р.Н. Уровни энергии и электромагнитные свойства водородоподобных атомов // ЭЧАЯ. – 1972. – Т.3. – С.238–268.
- [5] Borie E. Lamb shift of muonic deuterium. // Phys. Rev. A. – 2005. – V.72. – P.052511-1–052511-7
- [6] Borie E. and Rinker G.A. The energy levels of muonic atoms // Rev. Mod. Phys. – 1982. – V.54. – P.67–118.
- [7] Carboni G. et. al. Precise measurement of the $2S_{1/2} - 2P_{3/2}$ splitting in the $(\mu^4He)^+$ muonic ion // Nucl. Phys. A. – 1977. – V.278. – P.381–386.
- [8] Eides M.I., Grotch H., Shelyuto V.A. Theory of light hydrogenlike atoms // Phys. Rep. – 2001. – V.342. – P.62–261.
- [9] Huang K.-N. ,Hughes V.W. Theoretical hyperfine structure of muonic helium // Phys.Rev. A. – 1979. – V.20. – P.706–717.
- [10] Hauser P. et. al. Search for the 2S-2P energy difference in muonic 4He ions // Phys. Rev. A. – 1992. – V.46. – P.2363–2377.
- [11] Lakdawala S.D., Mohr P.J. Hyperfine structure in muonic helium // Phys. Rev. A. – 1980. – V.22. – P.1572–1575.

- [12] Lakdawala S.D., Mohr P.J. Calculation of the muonic He^3 hyperfine structure // Phys. Rev. A. – 1981. – V.24. – P.2224–2227.
- [13] Lakdawala S.D., Mohr P.J. Perturbation-theory calculation of hyperfine structure in muonic helium // Phys. Rev. A. – 1984. – V.29. – P.1047–1054.
- [14] Pohl R. and Antognini A. et.al. The size of the proton // Nature. – 2010. – V.466. – P.213–217.
- [15] Pachucki K. Theory of the Lamb shift in muonic hydrogen // Phys. Rev. A. – 1996. – V.53. – P.2092–2100.
- [16] Martynenko A.P. Lamb shift in the muonic helium ion // Phys. Rev. A. – 2007. – V.76. – P.012505-1–012505-11; $2S$ Hyperfine splitting of muonic hydrogen // Phys. Rev. A. – 2005. – V.71. – P.022506-1–022506-11.
- [17] Martynenko A.P. and Faustov R.N. Muonic hydrogen ground state hyperfine splitting // JETP. – 2004. – V.98. – P.39–52.
- [18] Martynenko A.P. Theory of muonic hydrogen - muonic deuterium isotope shift // JETP. – 2005. – V.101. – P.1021–1036; Hyperfine Structure of the S Levels of the Muonic Helium Ion // JETP. – 2008. – V.106. – P.690–699.
- [19] Sapirstein J.R. and Yennie D.R., in Quantum Electrodynamics, edited by T. Kinoshita, (World Scientific, Singapore, 1990), p.560.
- [20] Chen M.-K. Hyperfine splitting for the ground-state muonic 3He atom-corrections up to α^2 // J. Phys. B. – 1993. – V.26. – P.2263–2272.
- [21] Jentschura U.D. Relativistic reduced-mass and recoil corrections to vacuum polarization in muonic hydrogen, muonic deuterium, and muonic helium ions // Phys. Rev. A. – 2011. – V.84. – P.012505-1–012505-6.
- [22] Karshenboim, S. G. et.al. Nonrelativistic contributions of order $\alpha^5 m_\mu c^2$ to the Lamb shift in muonic hydrogen and deuterium, and in the muonic helium ion // Phys. Rev. A. – 2010. – V.81. – P.060501-1–060501-6.
- [23] Kinoshita T. and Nio M. Sixth-Order Vacuum-Polarization Contribution to the Lamb Shift of Muonic Hydrogen // Phys. Rev. Lett. – 1999. – V.82. – P.3240–3243.; Erratum: Sixth-Order Vacuum-Polarization Contribution to

the Lamb Shift of Muonic Hydrogen // Phys. Rev. Lett. – 2009. – V.103. – P.079901.

[24] Pachucki K. Nuclear Structure Corrections in Muonic Deuterium // Phys. Rev. Lett. – 2011. – V.106. – P.193007-1–193007-4.

Подписано в печать 28 октября 2011г.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № ____
443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1.
Отпечатано ООО: "Универс-груп"