

На правах рукописи

Иванова Виолетта Андреевна

**ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ КВАНТОВО – ПОЛЕВАЯ МОДЕЛЬ
КАОННОГО ВОДОРОДА**

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2006

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего и профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” (ГОУ ВПО “СПбГПУ”)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Бердников Ярослав Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Иванов Вадим Константинович

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Файфман Марк Петрович

Ведущая организация: Физический институт им. П. Н. Лебедева
Российской Академии Наук

Защита состоится «15» ноября 2006 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.05 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по адресу:
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, корпус 2, ауд. 265.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан __ октября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.05
доктор физико-математических наук
профессор

Титовец Ю.Ф.

Актуальность работы

Адронные атомы – это атомоподобные системы, в которых положительно заряженное ядро взаимодействует с отрицательно заряженными адронами за счет кулоновского притяжения. Адронные атомы и молекулы находят много применений – от катализа ядерных реакций до исследования распределения электрического заряда и ядерной материи в ядрах.

Одно из основных приложений адронных атомов в ядерной физике и физике элементарных частиц – это изучение сильных низкоэнергетических взаимодействий адронов путем измерения сдвигов и ширин энергетических уровней основных состояний адронных атомов.

Связь сдвига ϵ_{1s} и ширины Γ_{1s} энергетического уровня основного состояния адронного водородоподобного атома с учетом сильных низкоэнергетических взаимодействий осуществляется с помощью формулы Дезера, Гольдберга, Баумана, Тирринга и Трумана, то есть ДГБТТ формулы:

$$-\epsilon_{1s} + i\frac{\Gamma_{1s}}{2} = \frac{2\pi}{\mu} f_0(0) |\Psi_{1s}(0)|^2, \quad (1)$$

где μ - приведенная масса системы адрон – ядро, а $f_0(0)$ - амплитуда упругого S - волнового адрон – ядро рассеяния, вычисленная при нулевом относительном импульсе взаимодействующих частиц. Для водородоподобных атомов $\Psi_{1s}(0) = 1/\sqrt{\pi a_B^3}$ - волновая функция основного состояния адронного атома в начале координат, где $a_B = 1/\alpha\mu$ - боровский радиус водородоподобного атома, а $\alpha = 1/137,036$ - постоянная тонкой структуры,

Амплитуда $f_0(0)$ упругого адрон – ядро рассеяния определяется сильными низкоэнергетическими взаимодействиями, которые описываются эффективными киральными лагранжианами с киральной $SU(3) \times SU(3)$ симметрией, которые осуществляют лагранжеву форму реализации киральной $SU(3) \times SU(3)$ симметрии квантовой хромодинамики (КХД) при низких энергиях взаимодействия, то есть при относительных энергиях взаимодействия меньше 1 ГэВ.

Константы взаимодействия адронов в эффективных киральных лагранжианах определяют амплитуды низкоэнергетического взаимодействия адронов при нулевых относительных импульсах. В связи с этим исследование квази – стабильных адронных систем с малыми относительными импульсами является актуальной проблемой современной физики адронов. Одной из таких квази – стабильных систем является каонный водород – связанное состояние K^- – мезона и протона. Каонный водород образуется за счёт кулоновского притяжения между K^- – мезоном и протоном. Без учёта сильных низкоэнергетических взаимодействий каонный водород в нерелятивистском приближении обладает свойствами обычного водорода, где электрон замещён K^- – мезоном. Относительный импульс K^- – мезона и протона в основном и возбуждённых состояниях каонного водорода порядка 2 МэВ/с, что делает каонный водород прекрасным объектом для экспериментального и теоретического изучения низкоэнергетических взаимодействий K^- – мезонов с нуклонами.

Время жизни каонного водорода ограничено временем жизни K^- – мезона, которое обусловлено слабыми взаимодействиями и равно $\tau_{K^-} = 1,24 \cdot 10^{-8}$ сек.

Цель работы

Целью работы является развитие феноменологической квантово – полевой модели сильных низкоэнергетических $\bar{K}N$ взаимодействий в S – состоянии, путем: последовательного изучения вклада резонансного барионного фона с квантовыми числами унитарного октета $J^P = \frac{1}{2}^-$, вычисления сечений упругого и неупругого $\bar{K}N$ рассеяния вблизи порога, вычисления поправок к сдвигу и ширине энергетического уровня основного состояния каонного водорода за счет вклада неупругих каналов $\bar{K}N$ рассеяния и взаимодействий нарушающих изотопическую инвариантность, а также расширения этой модели на описание сильных низкоэнергетических $\bar{K}N$ взаимодействий в P – волновом состоянии и в вычислении сдвига и ширины энергетического уровня каонного водорода в возбужденном $2p$ состоянии.

Результаты полученные в работе

В работе получены следующие результаты:

1. вычислены S – волновые амплитуды K^-N рассеяния на пороге и сдвиг и ширина энергетического уровня каонного водорода в основном состоянии. Результат вычисления хорошо согласуется с экспериментальными данными Коллаборации DEAR;
2. вычислена поправка к уровню энергии основного состояния, индуцированная вкладом неупругих каналов K^-p рассеяния: $K^-p \rightarrow \Sigma^\pm \pi^\mp$, $K^-p \rightarrow \Sigma^0 \pi^0$, $K^-p \rightarrow \Lambda^0 \pi^0$;
3. вычислена поправка к сдвигу и ширине энергетического уровня основного состояния за счёт нарушающих изотопическую инвариантность взаимодействий (электромагнитного взаимодействия и КХД взаимодействия обеспечивающего разность масс токовых u и d кварков);
4. выполнена оценка сигма – члена $\bar{K}N$ рассеяния из экспериментальных данных Коллаборации DEAR по сдвигу энергетического уровня основного состояния. Полученная оценка хорошо согласуется с отсутствием составляющих s – кварков в структуре протона;
5. вычислены P– волновые длины упругого и неупругого K^-p рассеяния и сдвиг и ширина энергетического уровня каонного водорода в первом возбуждённом $2p$ состоянии. Результаты вычисления хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными, полученными путем измерения спектров и интенсивностей X – лучей в каонном водороде.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые:

1. получены теоретические значения сдвига и ширины энергетического уровня каонного водорода в основном состоянии в согласии с экспериментальными данными Коллаборации DEAR.

2. вычислена поправка к сдвигу уровня энергии основного состояния каонного водорода, индуцированная вкладом неупругих каналов $K^- p$ рассеяния: $K^- p \rightarrow \Sigma^\pm \pi^\mp$, $K^- p \rightarrow \Sigma^0 \pi^0$, $K^- p \rightarrow \Lambda^0 \pi^0$.
3. вычислены поправки к сдвигу и ширине энергетического уровня каонного водорода в основном состоянии за счёт неупругого канала $K^- p \rightarrow \bar{K}^0 n \rightarrow K^- p$ с парой $\bar{K}^0 n$ на массовой поверхности, с учетом разности масс нейтрального и заряженного антикаонов и протона и нейтрона, обусловленных взаимодействиями, нарушающими изотопическую инвариантность.
4. сделана оценка сигма – члена S – волновой амплитуды $\bar{K}N$ рассеяния из экспериментальных данных Коллаборации DEAR.
5. вычислены сдвиг и ширина энергетического уровня каонного водорода в первом возбуждённом $2p$ состоянии.

Практическая ценность

Полученные результаты могут найти практическое применение в таких разделах физики, как квантовая теория поля, физика атомного ядра и элементарных частиц и при интерпретации экспериментальных данных, получаемых в настоящее время на крупнейших ускорителях мира. Результаты работы необходимы для:

1. проектирования экспериментов по исследованию адронных атомов;
2. экспериментального исследования механизма взаимодействия K^- – мезонов с нуклонами при нулевых и ненулевых относительных импульсах;
3. для планирования экспериментов по измерению сдвигов и ширин энергетических уровней основного состояния каонного водорода и дейтерия Коллаборацией DEAR/SIDDHARTA во Фраскати (Италия);

Основные положения выносимые на защиту

1. Резонансный барионный фон с квантовыми числами унитарного октета $J^P = \frac{1}{2}^-$ играет важную роль для описания сильных низкоэнергетических $\bar{K}N$ взаимодействий вблизи порога.
2. Основными поправками к сдвигу и ширине энергетического уровня основного состояния каонного водорода являются поправки порядка 15% за счет кинематически – разрешенных неупругих каналов K^-p рассеяния, обусловленных сильными низкоэнергетическими взаимодействиями и взаимодействиями, нарушающими изотопическую инвариантность.
3. Экспериментальные данные Коллаборации DEAR согласуются с отсутствием составляющих странных кварков в структуре протона.
4. Барионные резонансы с квантовыми числами унитарного октета и декуплета $J^P = \frac{1}{2}^+$ и $J^P = \frac{3}{2}^+$ доминируют в Р - волновых длинах упругого и неупругого K^-p рассеяния вблизи порога.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Апробация работы

Результаты работы были доложены:

1. на семинарах Института Атомной и Ядерной физики Венского технического Университета 2004 – 2005 г.,
2. на семинарах Института Субатомной физики им. Штефана Майера Австрийской Академии Наук 2004 – 2005 г.,
3. на семинарах Института Ядерной физики и Физики Элементарных Частиц Венгерской Академии Наук (г. Будапешт) 2004 – 2005 г.,
4. на международной конференции по адронным атомам в Институте Теоретической физики Бернского Университета (9 – 10 февраля 2005 г., Берн, Швейцария),

5. на международной конференции по экзотическим атомам ЕХА-05 в Институте Субатомной физики им. Штефана Майера Австрийской Академии Наук (21 – 25 февраля 2005 г., Вена, Австрия).

Содержание и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, 5 глав, заключения и списка используемой литературы. Объем диссертации составляет 108 стр., в том числе 3 рисунка и 3 таблицы. Список литературы включает 75 наименований.

Краткое содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность темы и сформулированы цель, научная новизна и практическая ценность работы. Представлены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание разделов диссертации.

В первой главе приведена волновая функция каонного водорода в импульсном представлении и представлении чисел заполнения. Использование этой волновой функции позволяет получить сдвиг и ширину энергетического уровня основного состояния каонного водорода в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 -\epsilon_{1s} + i\frac{\Gamma_{1s}}{2} = & \frac{1}{4m_K m_p} \frac{1}{2} \sum_{\sigma_p = \pm 1/2} \iint \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} \sqrt{\frac{m_K m_p}{E_K(\vec{k})E_p(\vec{k})}} \sqrt{\frac{m_K m_p}{E_K(\vec{q})E_p(\vec{q})}} \times \\
 & \times \Phi_{1s}^*(\vec{k}) M(K^-(\vec{q})p(-\vec{q}, \sigma_p) \rightarrow K^-(\vec{k})p(-\vec{k}, \sigma_p)) \Phi_{1s}(\vec{q}), \quad (2)
 \end{aligned}$$

где $M(K^- p \rightarrow K^- p)$ - амплитуда S – волнового упругого $K^- p$ рассеяния, Φ_{1s} - волновая функция основного состояния каонного водорода в импульсном представлении. Вследствие быстрого убывания волновых функций $\Phi_{1s}^*(\vec{k})$ и $\Phi_{1s}(\vec{q})$ при $k, q \rightarrow \infty$, основной вклад в интегралы по импульсам \vec{q} и \vec{k} дает область вблизи нуля, то есть $k \sim q \leq 1/a_B = \alpha\mu = 2,36 \text{ МэВ}$. Полагая, что $\vec{k} = \vec{q} = 0$ можно показать, что формула (2) сводится к ДГБТТ формуле (1). Однако в отличие от формулы ДГБТТ формула (2) позволяет учитывать вклады в сдвиг и ширину от промежуточных состояний $K^- p$ рассеяния вдали от порога (см. Глава 2). Поскольку сдвиг и ширина энергетического уровня основного состояния каонного

водорода связаны с S -волновой амплитудой $K^- p$ рассеяния, которая имеет вещественную и мнимую части, то задача вычисления сдвига и ширины сводится к вычислению амплитуды $K^- p$ рассеяния. В диссертации показано, что в мнимой части амплитуды $K^- p$ рассеяния, которая определяется вкладом неупругих каналов реакции $K^- p \rightarrow Y\pi$, где $Y\pi = \Sigma^\pm \pi^\mp$, $\Sigma^0 \pi^0$ и $\Lambda^0 \pi^0$, доминируют барионный резонанс $\Lambda^0(1405)$ с квантовыми числами унитарного синглета $J^P = \frac{1}{2}^-$ и резонансный барионный фон с квантовыми числами унитарного октета $J^P = \frac{1}{2}^-$. С учетом вклада резонансного барионного фона вычислены комплексные S – волновые длины упругого $\bar{K}N$ рассеяния:

$$\begin{aligned}\bar{a}_0^0 &= (-1,50 \pm 0,05) + i(0,66 \pm 0,04) \text{ Фм}, \\ \bar{a}_0^1 &= (+0,50 \pm 0,02) + i(0,04 \pm 0,00) \text{ Фм},\end{aligned}\quad (3)$$

связанные с комплексными S – волновыми длинами $\bar{a}_0^{K^- p}$ и $\bar{a}_0^{K^- n}$ соотношениями:

$$\begin{aligned}\bar{a}_0^{K^- p}(0) &= \frac{1}{2}(\bar{a}_0^0 + \bar{a}_0^1) = (-0,50 \pm 0,05) + i(0,35 \pm 0,02) \text{ Фм}, \\ \bar{a}_0^{K^- n}(0) &= \bar{a}_0^1 = (+0,50 \pm 0,02) + i(0,04 \pm 0,00) \text{ Фм}.\end{aligned}\quad (4)$$

Комплексная S – волновая длина упругого $K^- p$ рассеяния хорошо согласуется с экспериментальными данными Коллаборации DEAR:

$$\bar{a}_0^{K^- p}(0)_{exp} = (-0,47 \pm 0,09) + i(0,30 \pm 0,15) \text{ Фм}.\quad (5)$$

Показано, что вещественные части комплексных S – волновых длин $\bar{K}N$ рассеяния $\bar{a}_0^{K^- p} = (-0,50 \pm 0,05) \text{ Фм}$ и $\bar{a}_0^{K^- n} = (+0,50 \pm 0,02) \text{ Фм}$ удовлетворяют низкоэнергетической теореме $\bar{a}_0^{K^- p} + \bar{a}_0^{K^- n} = 0$, которая может быть выведена по аналогии с теоремой Вайнберга $a_0^{\pi^- p} + a_0^{\pi^- n} = 0$ для S – волновых длин πN рассеяния в ведущем порядке киральной теории возмущений (КТВ).

Теоретические значения сдвига и ширины энергетического уровня основного состояния каонного водорода

$$-\epsilon_{1s}^{(0)} + i \frac{\Gamma_{1s}^{(0)}}{2} = 421,13 \bar{\alpha}_0^{K^- p}(0) = (-205 \pm 21) + i(144 \pm 9) \text{эВ} \quad (6)$$

хорошо согласуются с экспериментальными данными Коллаборации DEAR:

$$-\epsilon_{1s} + i \frac{\Gamma_{1s}}{2} = (-193 \pm 37(\text{стат.}) \pm 6(\text{сист.})) + i(125 \pm 56(\text{стат.}) \pm 15(\text{сист.})) \text{эВ}. \quad (7)$$

Сечения неупругого и упругого $K^- p$ рассеяния, вычисленные с учетом вклада резонансного барионного фона для импульсов начального K^- - мезона в лабораторной системе координат $70 \text{МэВ}/c \leq p_{lab} \leq 150 \text{МэВ}/c$ хорошо согласуются с экспериментальными данными на двух стандартных отклонениях.

Во второй главе вычислены основные поправки к энергетическому уровню основного состояния каонного водорода.

Поправки за счет вклада взаимодействий нарушающих изотопическую инвариантность равны:

$$\frac{\delta \epsilon_{1s}^{\bar{K}^0 n}}{\epsilon_{1s}^{(0)}} = \frac{1}{4} (a_0^1 - a_0^0)^2 q_0^2 = (8,6 \pm 0,9) \%,$$

$$\frac{\delta \Gamma_{1s}^{\bar{K}^0 n}}{\Gamma_{1s}^{(0)}} = \frac{1}{2\pi} \frac{(a_0^1 - a_0^0)^2}{\text{Im} \bar{\alpha}_0^{K^- p}(0) a_B} \ln \left[\frac{2a_B}{|a_0^0 + a_0^1|} \right] = (11,1 \pm 1,2) \%, \quad (8)$$

где $\text{Im} \bar{\alpha}_0^{K^- p}(0) = (0,35 \pm 0,05) \text{Фм}$. Эта поправка обусловлена вкладом неупругого канала $K^- p \rightarrow \bar{K}^0 n \rightarrow K^- p$, где пара $\bar{K}^0 n$ на массовой поверхности, а $q_0 = O\sqrt{\alpha}$ - пороговый импульс $K^- p$ пары в реакции $K^- p \rightarrow \bar{K}^0 n$. Эти поправки могут быть получены только с помощью формулы (2).

Поправка к сдвигу энергетического уровня основного состояния каонного водорода за счет вклада неупругих каналов $K^- p \rightarrow Y\pi$, где $Y\pi = \Sigma^\pm \pi^\mp$, $\Sigma^0 \pi^0$ и $\Lambda^0 \pi^0$:

$$\delta \epsilon_{1s}^{Y\pi} = -2\alpha^3 \mu^2 \delta a_0^{K^- p} = (15 \pm 4) \text{ эВ}, \quad (9)$$

где $\delta a_0^{K^- p}$ определяется выражением

$$\begin{aligned} \delta a_0^{Y\pi} = & \frac{3}{16\pi^3} \frac{\mu}{m_K} \left(A^2 + \frac{1}{6} B^2 \right) \int_{m_\pi}^{m_K + m_p - m_\Sigma} \frac{dE_\pi \sqrt{E_\pi^2 - m_\pi^2}}{E_\pi - m_K} + \\ & + \frac{3}{16\pi^3} \frac{\mu}{m_K} B^2 \int_{m_\pi}^{m_K + m_p - m_{\Lambda^0}} \frac{dE_\pi \sqrt{E_\pi^2 - m_\pi^2}}{E_\pi - m_K} = (-0,037 \pm 0,010) \Phi_M. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $A = -6,02 \Phi_M$ $B = -2,68 \Phi_M$ – вклады резонанса $\Lambda^0(1405)$ и резонансного барионного фона, соответственно, $\pm 0,010 \Phi_M$ - теоретическая точность приближения, которая составляет примерно 27%. С учетом вклада поправок вычисленных в этой главе сдвиг и ширина энергетического уровня основного состояния каонного водорода равны:

$$- \epsilon_{1s}^{(th)} + i \frac{\Gamma_{1s}^{(th)}}{2} = (-238 \pm 21) + i(159 \pm 9) \text{ эВ}. \quad (11)$$

Полученный результат не противоречит экспериментальным данным Коллаборации DEAR (7).

В третьей главе сделана оценка $\sigma_{KN}^{(I=1)}(0)$ - члена

$$\sigma_{KN}^{(I=1)}(0) = \frac{m_{0u} + m_{0s}}{4m_N} \langle p(\vec{0}, \sigma_p) | \bar{u}(0)u(0) + \bar{s}(0)s(0) | p(\vec{0}, \sigma_p) \rangle \quad (12)$$

с использованием формулы (11) и экспериментальных данных Коллаборации DEAR, где m_{0u} и m_{0s} - массы токовых u и s кварков, а $u(0)$ и $s(0)$ - их операторы. Полный сдвиг энергетического уровня основного состояния каонного водорода с учетом $\sigma_{KN}^{(I=1)}(0)$ - члена равен:

$$\begin{aligned} \epsilon_{1s}^{(th)} = & \epsilon_{1s}^{(0)} + \\ & + \frac{\alpha^3 \mu^3}{2\pi m_K F_K^2} \left[\sigma_{KN}^{(I=1)}(0) - \frac{m_K^2}{4m_N} i \int d^4x \langle p(\vec{0}, \sigma_p) | T(J_{50}^{4+i5}(x) J_{50}^{4-i5}(0)) | p(\vec{0}, \sigma_p) \rangle \right], \end{aligned} \quad (13)$$

где $\epsilon_{1s}^{(0)} = (238 \pm 21) \text{ эВ}$. Предполагая, что теоретическое выражение для сдвига энергетического уровня основного состояния каонного водорода (13) определяет

полностью экспериментальную величину $\epsilon_{1s}^{(exp)} = (193 \pm 37) \text{ эВ}$, мы получаем следующую оценку $\sigma_{KN}^{(I=1)}(0)$ - члена:

$$\sigma_{KN}^{(I=1)}(0) = (193 + 260 - 238) \frac{2\pi}{\alpha^3} \frac{m_K}{\mu^3} F_\pi^2 = (433 \pm 132) \text{ МэВ}, \quad (14)$$

где 260 эВ – вклад третьего слагаемого в формуле (13), вычисленный в рамках алгебры токов в ведущем порядке КТВ. Величина $\sigma_{KN}^{(I=1)}(0)$ - члена свидетельствует в пользу гипотезы об отсутствии составляющих s – кварков в структуре протона.

В четвертой главе вычислены P – волновые длины упругого и неупругого K^-p рассеяния и сдвиг и ширина энергетического уровня возбужденного np состояния каонного водорода:

$$\begin{aligned} \epsilon_{np} &= -\frac{2}{3} \frac{\alpha^5}{n^3} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \left(\frac{m_K m_N}{m_K + m_N}\right)^4 (2a_{3/2}^{K^-p} + a_{1/2}^{K^-p}), \\ \Gamma_{np} &= \frac{4}{9} \frac{\alpha^5}{n^3} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \left(\frac{m_K m_N}{m_K + m_N}\right)^4 \sum_{Y\pi} (2a_{3/2}^{Y\pi} + a_{1/2}^{Y\pi})^2 k_{Y\pi}^3. \end{aligned} \quad (15)$$

Показано, что барионные резонансы с квантовыми числами унитарного октета $J^P = \frac{1}{2}^+$ и декуплета $J^P = \frac{3}{2}^+$ дают доминирующий вклад в P – волновые длины $(a_{1/2}^{K^-p}, a_{3/2}^{K^-p})$ и $(a_{1/2}^{Y\pi}, a_{3/2}^{Y\pi})$ упругого и неупругого K^-p рассеяния.

Сдвиг и ширина энергетического уровня возбужденного $2p$ состояния равны:

$$\epsilon_{2p} = -0,6 \text{ мэВ}, \quad \Gamma_{2p} = 2 \text{ мэВ}. \quad (16)$$

Полученный результат хорошо согласуется с экспериментальными данными по относительному выходу X – лучей K_α - серии каонного водорода в пределах одного стандартного отклонения.

В пятой главе вычислены парциальные ширины радиационных переходов $(K^- p)_{np} \rightarrow (K^- p)_{1s} + \gamma$, индуцированных сильными низкоэнергетическими взаимодействиями и усиленными кулоновским взаимодействием:

$$\Gamma((K^- p)_{np} \rightarrow (K^- p)_{1s} \gamma) = \frac{8}{n^3} \frac{\xi_{np}^2}{\xi_{2p}^2} \Gamma((K^- p)_{2p} \rightarrow (K^- p)_{1s} \gamma), \quad (17)$$

где $\xi_{1s} = 1,91$ и $\xi_{2p} = 3,52$, $\xi_{3p} = 2,22$, $\xi_{4p} = 2,85, \dots$ - интегралы перекрытия волновых функций, а $\Gamma((K^- p)_{2p} \rightarrow (K^- p)_{1s} \gamma)$ определена как:

$$\Gamma((K^- p)_{2p} \rightarrow (K^- p)_{1s} \gamma) = \frac{\xi_{1s}^2 \xi_{2p}^2}{36} \frac{\alpha}{\mu} \left(\epsilon_{1s}^2 + \frac{1}{4} \Gamma_{1s}^2 \right) = 4,3 \times 10^4 \left(\epsilon_{1s}^2 + \frac{1}{4} \Gamma_{1s}^2 \right) \text{сек}^{-1}, \quad (18)$$

где ϵ_{1s} и Γ_{1s} измерены в эВ. Для экспериментальных значений ϵ_{1s} и Γ_{1s} парциальная ширина перехода (18) составляет около 0,6% от электрического дипольного перехода $2p \rightarrow 1s + \gamma$. Этот результат будет существенен для теоретической обработки экспериментальных данных по сдвигу и ширине энергетического уровня основного состояния каонного водорода, измеренных с точностью лучше 1%.

В заключении изложены основные результаты и выводы проведенных исследований.

Результаты: В диссертации исследована и развита феноменологическая квантово – полевая модель каонного водорода и сильных низкоэнергетических $\bar{K}N$ взаимодействий в S – и P – волновом состоянии.

Описание комплексных S – волновых длин $\bar{K}N$ рассеяния улучшено путем введения резонансного барионного фона с квантовыми числами унитарного октета $J^P = \frac{1}{2}^-$.

Показано, что S – волновые длины упругого и неупругого $K^- p$ рассеяния хорошо описывают экспериментальные данные по сечениям упругого и неупругого $K^- p$ рассеяния вдали от порога, для лабораторных импульсов K^- мезона до 150 МэВ/с.

Улучшены теоретические численные значения сдвига и ширины энергетического уровня основного состояния каонного водорода, вычисленные без учета вклада от неупругих $\bar{K}N$ взаимодействий и взаимодействий, нарушающих изотопическую инвариантность.

Вычислены поправки к сдвигу и ширине энергетического уровня основного состояния каонного водорода за счет неупругих каналов $K^- p \rightarrow Y\pi$, где $Y\pi = \Sigma^\pm \pi^\mp, \Sigma^0 \pi^0, \Lambda^0 \pi^0$, и взаимодействий нарушающих изотопическую инвариантность за счет неупругого канала $K^- p \rightarrow \bar{K}^0 n$ с $\bar{K}^0 n$ парой на массовой поверхности.

Вычислены полный сдвиг и ширина энергетического уровня основного состояния каонного водорода с учетом всех основных поправок и сделана оценка $\sigma_{KN}^{(I=0)}(0)$ -члена $\bar{K}N$ рассеяния из экспериментальных данных Коллаборации DEAR. Полученная оценка $\sigma_{KN}^{(I=0)}(0)$ -члена свидетельствует в пользу отсутствия составляющих s – кварков ($\bar{s}s$ - компоненты) в кварковой структуре протона.

Предложено расширение феноменологической квантово – полевой модели каонного водорода и сильных низкоэнергетических $\bar{K}N$ взаимодействий в S – волновом состоянии на описание сильных низкоэнергетических $\bar{K}N$ взаимодействий в P – волновом.

Вычислены сдвиг и ширина энергетического уровня возбужденного np состояния каонного водорода за счет сильных низкоэнергетических $\bar{K}N$ взаимодействий в P – волновом состоянии. Показано, что основной вклад в амплитуды упругого и неупругого $\bar{K}N$ взаимодействия в P – волновом состоянии определяется барионными резонансами с квантовыми числами унитарного октета

и декуплета $J^P = \frac{1}{2}^+$ и $J^P = \frac{3}{2}^+$.

Численные значения сдвига и ширины энергетического уровня возбужденного $2p$ состояния хорошо описывают экспериментальные данные по относительному выходу X – лучей K_α - серии каонного водорода.

Вычислены парциальные ширины радиационных переходов $np \rightarrow 1s + \gamma$, индуцированных сильными низкоэнергетическими взаимодействиями и усиленных Кулоновским взаимодействием.

Выводы.

1. Феноменологическая квантово – полевая модель каонного водорода и сильных низкоэнергетических $\bar{K}N$ взаимодействий в S – и P – волновых состояниях хорошо описывает экспериментальные данные Коллаборации DEAR по сдвигу и ширине энергетического уровня основного состояния каонного водорода и упругому и неупругому $K^- p$ рассеянию вблизи порога.
2. Вклад резонансного барионного фона с квантовыми числами унитарного октета $J^P = \frac{1}{2}^-$ и барионных резонансов с квантовыми числами унитарного октета и декуплета $J^P = \frac{1}{2}^+$ и $J^P = \frac{3}{2}^+$ играют важную роль для описания сильных низкоэнергетических $\bar{K}N$ взаимодействий в S – и P – волне.
3. Основными поправками к сдвигу и ширине энергетического уровня основного состояния каонного водорода являются поправки от неупругих каналов $K^- p \rightarrow Y\pi$, где $Y\pi = \Sigma^\pm \pi^\mp$, $\Sigma^0 \pi^0$ и $\Lambda^0 \pi^0$ и $K^- p \rightarrow \bar{K}^0 n$ обусловленных вкладом сильных низкоэнергетических взаимодействий и взаимодействий нарушающих изотопическую инвариантность, соответственно.

Публикации.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

- 1) Ivanov A. N., Cargnelli M., Faber M., Fuhrmann H., Ivanova V. A., Marton J., Troitskaya N. I. and Zmeskal J. On kaonic Hydrogen: Phenomenological quantum field theoretic model revisited // European Physical Journal -2005. -V.A25. -P.329
- 2) Иванова В. А. и Бердников Я. А. Сдвиг энергетического уровня основного состояния каонного водорода, индуцируемый вкладом неупругих каналов $K^- p \rightarrow Y\pi$ // Ядерная физика. 2006. том 8. с. 1334.

- 3) Ivanov A. N., Cargnelli M., Faber M., Furhmann H., Ivanova V. A., Marton J., Troitskaya N. I. and Zmeskal J. On isospin – breaking corrections to the energy level displacement of the ground state of kaonic hydrogen // Journal of Physics -2005. - V.G31. -P.769
- 4) Ivanov A. N., Faber M., Ivanova V. A., Marton J. and Troitskaya N. I. On the estimate of the $\sigma_{KN}^{(I=0)}$ -term value from the energy level shift of kaonic hydrogen in the ground state // Physical Review -2006. -V.A73. -P.032510
- 5) Ivanov A. N., Cargnelli M., Faber M., Fuhrmann H., Ivanova V. A., Marton J., Troitskaya N. I., and Zmeskal J. Energy level displacement of excited np state of kaonic hydrogen // Physical Review -2005. -V.A71. -P.052528
- 6) Ivanov A. N., Cagnelli M., Ivanova V. A., Marton J., Troitskaya N. I. and Zmeskal J. On radiative $np \rightarrow 1s + \gamma$ transitions, induced by strong low-energy interactions, in kaonic atoms // Physical Review -2005. -V.A72. -P.022506.