



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2001-49

На правах рукописи

Рогалёв Роман Николаевич

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ
КИРАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ
К ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССОВ
РАССЕЯНИЯ И РАСПАДА
 π - И K -МЕЗОНОВ**

01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 2001

УДК 539.1.01

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Протвино).

Научный руководитель – доктор физико–математических наук, старший научный сотрудник В.А. Петров (ГНЦ ИФВЭ).

Официальные оппоненты: доктор физико–математических наук, чл.-корр. РАН В.Ф. Образцов (ГНЦ ИФВЭ), доктор физико–математических наук, старший научный сотрудник Е.П. Шабалин (ИГЭФ).

Ведущая организация – НИИЯФ МГУ им. Д.В. Скобельцына (г. Москва).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2001 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д201.004.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, г. Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2001 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д201.004.01

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2001

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Исследование процессов рассеяния и распада мезонов при энергиях до 1 ГэВ представляет двоякий интерес. Во-первых, в амплитуды этих реакций дают вклад процессы, идущие на малых расстояниях (т.е. отвечающих энергиям > 100 ГэВ). Такие процессы могут быть обусловлены как электрослабыми взаимодействиями, так и новой физикой за пределами стандартной модели — поэтому распады лёгких мезонов могут служить источником информации (подчас уникальной) о физике малых расстояний и могут быть использованы как для уточнения параметров стандартной модели, так и для поисков новых взаимодействий. Однако, чтобы выделить вклад малых расстояний в амплитуды таких реакций, необходимо уметь учитывать вклад больших расстояний (отвечающих энергиям < 1 ГэВ), обусловленный сильными взаимодействиями. Поскольку до сих пор неизвестен механизм конфайнмента, в настоящее время не существует динамических моделей, адекватно описывающих взаимодействия адронов как составных объектов. По этой причине приходится пользоваться феноменологическими схемами. Самая популярная в настоящее время феноменологическая схема — киральная теория возмущений, представляет собой регулярное разложение амплитуд реакций с участием псевдоскалярных мезонов, фотонов и лептонных токов в ряд по малым импульсам и массам частиц и позволяет сформулировать стандартную модель

как (неперенормируемую) квантовую теорию поля на адронном уровне. Как и всякая неперенормируемая теория поля, киральная теория возмущений включает в себя бесконечно много параметров, однако для достижения 1–2% точности в подавляющем большинстве случаев достаточно знать 12 параметров, при помощи которых вполне можно описать вклад сильных взаимодействий с точностью, достаточной для того, чтобы извлечь из данных по распадам мезонов информацию о взаимодействиях на малых расстояниях. Вот почему описание динамики мезонов в рамках киральной теории возмущений приобретает актуальность.

Во-вторых, благодаря успешному описанию динамики адронов при помощи киральной теории возмущений и различных её расширений (модель доминантности векторных мезонов, модель Скирма и т.д.) можно сказать, что вышеупомянутые 12 параметров являются важными феноменологическими величинами, которые должны быть вычислены в рамках фундаментальной теории (КХД). Другими словами, киральную теорию возмущений можно рассматривать как очень эффективную параметризацию низкоэнергетических экспериментальных данных при помощи небольшого числа параметров. Однако в настоящее время большинство этих параметров известны с недостаточной точностью. Следует отметить, что низкоэнергетические амплитуды зависят не только от параметров собственно киральной теории возмущений, но и от параметров фундаментальной теории (масс лёгких кварков, числа цветов и т.д.). Вычисление амплитуд различных процессов в рамках киральной теории возмущений и сопоставление их с экспериментальными данными призвано как уточнить значения вышеупомянутых параметров, так и проверить киральную теорию возмущений как универсальную феноменологическую схему при низких энергиях.

Основные цели работы. Целью диссертации является изучение следующих проблем:

1. Проявления киральной аномалии в реакциях с участием странных мезонов и возможность экспериментального определения параметров эффективного аномального лагранжиана.

2. Возможность экспериментального изучения \mathcal{CP} - и \mathcal{T} -нечётных эффектов в распадах заряженных K -мезонов.
3. Расхождение экспериментального и теоретического спектров вылетающих частиц в распаде $\pi \rightarrow e\nu\gamma$.
4. Применение диагонального спинового базиса к вычислению амплитуд полуплептонных распадов.

Научные результаты и новизна работы

1. Вычислены электромагнитные поправки к формфакторам распада $\pi \rightarrow e\nu\gamma$ в порядке $O(p^6)$ и показано, что они не могут объяснить расхождение теоретического спектра с экспериментальным, установленное в результате экспериментов на установке “Истра” ИЯИ РАН.

Получена оценка константы эффективного тензорного взаимодействия f_T в рамках киральной теории возмущений и стандартной модели. Показано, что $f_T \simeq 10^{-7} \div 10^{-6}$, что на два порядка больше значения, предсказанного ранее.

2. Произведён полный учёт \mathcal{CP} -чётных вкладов в поперечную компоненту спина мюона в ведущем порядке теории возмущений. Результаты вычислений существенно отличаются от полученных ранее в работах Хиллера–Исидори¹, Ефросинина–Куденко² и Брагута–Лиходеда–Чалова³ и согласуются с результатами повторного вычисления одной из упомянутых групп авторов⁴, полученными одновременно. Зависимость ξ_{EM} от кинематических переменных представлена в аналитическом виде.
3. В рамках модели Бандо–Куго–Ямаваки, которая совмещает в себе модель доминантности векторных мезонов и киральную теорию возмущений, вычислены амплитуды процессов $K^+\gamma \rightarrow K^+\pi^0$, $K^0\gamma \rightarrow K^0\pi^0$, $K^+\gamma \rightarrow K^0\pi^+$ и $K^0\gamma \rightarrow K^+\pi^-$ и обсуждается возможность экспериментального исследования этих амплитуд в процессах кулоновского рождения пионов канонным пучком.

¹G. Hiller, G. Isidori, *Phys. Lett.* **B459**, 295 (1999).

²В.П. Ефросинин, Ю.Г.Куденко, *Ядерная физика* **62**, 1054 (1999) .

³В.В.Брагута, А.А.Лиходед, А.Е.Чалов, препринт ИФВЭ 2001-57.

⁴V.V. Braguta, A.A. Likhoded, A.E. Chalov, hep-ph/0105111.

4. Свободные от сингулярностей формулы для токов перехода $S, V_\mu, T_{\mu\nu}, A_\mu, P$, определяемых выражением

$$w(p_1, n_1)\bar{w}(p_2, n_2) = S + V_\mu\gamma^\mu + T_{\mu\nu}\sigma^{\mu\nu} + A_\mu\gamma^\mu\gamma^5 + P\gamma^5, \quad (1)$$

где $w(p_i, n_i)$ — решения уравнения Дирака с импульсом p_i и вектором спина n_i , получены путём предельного перехода от общего случая к той ситуации, когда импульсы и спины обеих рассматриваемых частиц лежат в одной 2-плоскости; результаты представлены в компактной форме. Полученные выражения совпадают с аналогичными выражениями, полученными ранее другим способом группой исследователей из Минска. Проанализированы свойства величин, входящих в эти выражения и показан изоморфизм между решениями уравнения Дирака и изотропными картановскими 2-плоскостями. Полученные выражения впервые применяются для вычисления однопетлевых диаграмм с массивными фермионами; эта процедура подробно описана во 2-й главе настоящей диссертации. Показано, что их использование существенно уменьшает объём вычислений.

Практическая ценность

1. Показано, что если 30%-ное отличие экспериментального спектра от теоретического подтвердится на достаточно большой статистике, то будет наблюдеено явление, не укладывающееся в рамки стандартной модели.
2. Установлено следующее. Если в идущих либо планируемых экспериментах (на ускорителе У70 ИФВЭ в рамках экспериментальной программы “ОКА”, на детекторе E246 (КЕК, Япония) и E923 (БНЛ, США)) будет получено среднее значение поперечной поляризации мюона $2\xi > 10^{-3}$, то это будет чётким указанием на наличие в природе \mathcal{CP} -нечётных взаимодействий, не описываемых в рамках стандартной модели.
3. Основное значение экспериментального изучения вершин $KK\pi\gamma$ состоит в том, что они являются весьма ценным источником экспериментальной информации о числе цветов N_c .

Кроме этого, измерение амплитуды $K\gamma \rightarrow K\pi$ позволит проверить феноменологические следствия киральной аномалии в модели с тремя (а не двумя) лёгкими кварками. Это важно, поскольку аномальный член Весса–Зумино–Виттена в лагранжиане киральной теории возмущений был получен в предположении о наличии именно трех лёгких кварков.

4. Формулы для токов перехода, предложенные в работах, вошедших в диссертацию, могут быть полезны при разработке эффективного формализма для вычисления однопетлевых диаграмм, содержащих массивные фермионы, включая случай фермионов разной массы.

Апробация диссертации. Представленные на защиту результаты докладывались на семинарах ОТФ и ОЭФ ИФВЭ, Международного центра теоретической физики в г. Триесте (Италия), на XVII и XXIV Международных семинарах по физике высоких энергий и теории поля, на VI Рабочем совещании по спиновым явлениям в физике высоких энергий (г. Протвино) и на сессии ОЯФ РАН в ИТЭФ (1995).

Публикации. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в российских и зарубежных журналах в виде 5 статей (см. Список литературы [1–5]).

Структура диссертации. Диссертация включает в себя введение, 3 главы, заключение и 3 приложения в виде 83 страниц основного текста, включая 5 таблиц и 11 рисунков; а также список литературы.

Содержание работы

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, показаны научная новизна проводимых исследований и их практическая ценность, а также кратко представлены содержание работы и ее апробация на конференциях и семинарах. Кроме этого, во введении дан краткий обзор киральной теории возмущений, в котором определяются основные понятия

и обозначения, используемые в последующих главах. Явный вид лагранжиана киральной теории возмущений, полученный автором диссертации, в порядке $O(p^2)$, а также аномальный член Весса–Зумино–Виттена (порядок $O(p^4)$) выписаны в Приложении 1.

В главе 1 вычислены однопетлевые электромагнитные поправки в порядке $O(p^6)$ к формфакторам распада $\pi \rightarrow e\nu\gamma$ и показано, что они не могут объяснить расхождение теоретического спектра с экспериментальным, которое было обнаружено следующим образом. Распад $\pi^- \rightarrow e^- \nu \gamma$ был исследован в широкой кинематической области на установке “Истра” ИЯИ РАН в ИФВЭ. Вывод этой группы состоит в том, что экспериментальный спектр существенно отличается от предсказанного стандартной моделью. Полная вероятность этого распада в исследованной кинематической области на 30% меньше теоретически предсказанной (это 3.5 стандартных отклонения). А.А.Поблагуевым было выдвинуто предположение, что указанное расхождение объясняется наличием тензорного взаимодействия вида

$$\frac{G_F e V_{ud}^*}{2\sqrt{2}} f_T (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) \pi^+ \bar{\nu} \sigma^{\mu\nu} (1 + \gamma^5) e + \text{h.c.} \quad (2)$$

с константой $f_T \simeq 1.4 \times 10^{-2}$. Автором диссертации получена оценка константы эффективного тензорного взаимодействия f_T в рамках киральной теории возмущений и стандартной модели. Показано, что $f_T \simeq 10^{-7} \div 10^{-6}$, что на два порядка больше значения, предсказанного ранее в работе Беляева–Когана⁵, но значительно меньше, чем требуется для объяснения рассогласования между теорией и экспериментом.

Результаты этих вычислений были использованы также для оценки нарушения изоспина: разность $F_V(\pi^0) - F_V(\pi^+)$ между формфакторами распадов $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ и $\pi \rightarrow e\nu\gamma$ составляет

$$\frac{\delta F_V}{F_V} \sim \frac{\delta F_A}{F_A} \sim \frac{\alpha}{4\pi} \sim 10^{-3}.$$

⁵V.M. Belyaev, I.I. Kogan, *Phys. Lett.* **B280**, 238 (1992).

В главе 2 произведён полный учёт CP -чётных вкладов в поперечную компоненту спина мюона в ведущем порядке киральной теории возмущений. Он служит фоном к возможному CP -нечётному вкладу ξ_{odd} , поиски которого ведутся в рамках программы экспериментальных исследований “ОКА” на ускорителе У70 в г. Протвино, а также на детекторе E246 (КЕК, Япония). CP -нечётный вклад в поперечную компоненту спина мюона $\xi_{\text{odd}} > 10^{-3}$ допускается лево-правыми, суперсимметричными и многохиггсовскими моделями. Также учтены однопетлевые вклады в порядке $O(p^6)$, поскольку в работе Хиллера–Исидори⁶ эти вклады были ошибочно объявлены лидирующими.

Полученная зависимость CP -чётных вкладов в поперечную компоненту спина мюона в распаде $K \rightarrow \mu\nu\gamma$ от кинематических переменных x и y показана на рис. 1. На этом графике видно, что поперечная компонента спина мюона меняется в диапазоне $(0 \div 7) \times 10^{-4}$. Её средневзвешенное значение при обрезании по энергии фотона $\simeq 25$ MeV составляет

$$\langle \xi_{EM} \rangle = \frac{\int_{x_{min}} dx \int dy \Xi}{\int_{x_{min}} dx \int dy \mathcal{N}^2} \simeq 2.3 \times 10^{-4} \quad (3)$$

(энергия фотона 25 МэВ соответствует нижнему пределу интегрирования по x — $x_{min} = 0.1$). Точность полученных результатов определяется точностью киральной теории возмущений при рассматриваемых энергиях и составляет $\simeq 20\%$.

При построении графика были использованы значения параметров $F_A = 0.042$ и $F_V = 0.095$ — в соответствии с предсказаниями киральной теории возмущений; именно эти значения были использованы в упомянутых работах.

Диапазон изменения поперечной поляризации мюона (которая равна удвоенной поперечной компоненте спина) согласуется с недавними результатами, полученными в работе Лиходеда–Брагуты–Чалова⁶, и сильно расходится со значениями, полученными в работах Ефросинина–Куденко⁶ и Хиллера–Исидори⁶. Дело в том, что в указанных работах были учтены не все диаграммы, дающие вклад

⁶См. сноску на стр. 3.

в поперечную поляризацию мюона. Также отметим, что полученное здесь среднее значение ξ при обрезании по энергии фотона при ~ 25 МэВ хорошо согласуется со средним значением, найденным в работе Брагута–Лиходеда–Чалова⁷, несмотря на то, что полученный там спектр несколько отличается от представленного на рис. 1.

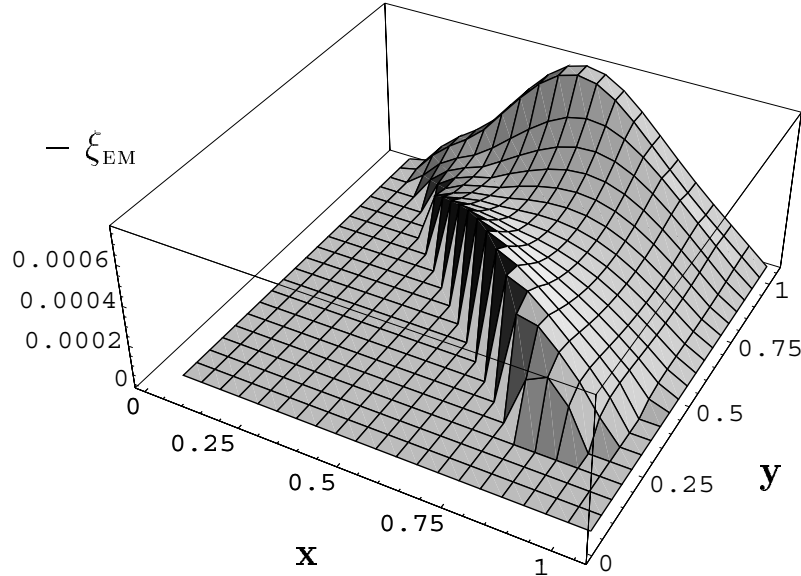


Рис. 1. Поперечная компонента спина мюона ξ_{EM} как функция x и y .

Таким образом, наблюдение поперечной компоненты спина мюона на уровне 5×10^{-4} в экспериментах (на ускорителе У70 ИФВЭ в рамках экспериментальной программы “ОКА”, на детекторе E246 (КЕК, Япония) и E923 (БНЛ, США)) было бы однозначным указанием на нарушение CP - и T -инвариантности, поскольку фоновый CP - и T -чётный вклад во взвешенное среднее поперечной компоненты спина не превышает 3×10^{-4} , а её абсолютное значение ограничено сверху величиной 7×10^{-4} (именно взвешенное среднее доступно наблюдению в идущих экспериментах). Поэтому в экспериментах указанного типа можно наблюдать новые CP - и T -нечётные эффекты

⁷V.V. Braguta, A.A. Likhoded, A.E. Chalov, hep-ph/0105111.

либо получить новые ограничения на параметры вышеупомянутых нестандартных моделей.

При вычислениях спиральных амплитуд в главах 1 и 2 были использованы явные ковариантные выражения для величин $S, V_\mu, T_{\mu\nu}, A_\mu, P$, входящих в разложение

$$w(p_1, n_1)\bar{w}(p_2, n_2) = S + V_\mu\gamma^\mu + T_{\mu\nu}\sigma^{\mu\nu} + A_\mu\gamma^\mu\gamma^5 + P\gamma^5, \quad (4)$$

где $w(p_i, n_i)$ — решения уравнения Дирака в импульсном представлении с положительной ($w = u$) или отрицательной ($w = v$) энергией, описывающие фермион с 4-импульсом p_i и 4-вектором спина n_i . В приложении 2 дан вывод формул, выражающих величины $S, V_\mu, T_{\mu\nu}, A_\mu$ и P через импульсы и векторы спина фермионов, а также указаны свойства фундаментальных объектов, использованных в этих выражениях и при конкретных вычислениях (векторов ω_\pm с нулевой нормой).

Использование обозначений, предложенных в приложении 2, может быть полезно при разработке эффективного формализма для вычисления однопетлевых диаграмм, содержащих фермионы. Эти обозначения применяются для вычисления однопетлевых диаграмм с массивными фермионами; соответствующая процедура подробно описана в главе 2. Они очень хорошо приспособлены для использования в программах на языках REDUCE и FORM. Показано, что использование этих обозначений существенно уменьшает объём вычислений. Заметим, что до недавнего времени различные группы исследователей применяли спинорный формализм для вычисления только древесных диаграмм как в безмассовом, так и в массивном случае; достоинства этого формализма при вычислении петлевых диаграмм показаны в главе 2. Кроме того, непосредственное вычисление спиральных амплитуд особенно полезно при изучении многочастичных процессов, когда число возможных формфакторов может значительно превосходить число спиральных амплитуд. Так, например, при вычислении радиационных поправок к распаду $K \rightarrow \pi\mu\nu\gamma$ приходится иметь дело с 16 формфакторами, в то время как реально независимы только 4 из них, поскольку процесс полностью характеризуется четырьмя спиральными амплитудами.

В главе 3 амплитуды процессов $K^+\gamma \rightarrow K^+\pi^0$, $K^0\gamma \rightarrow K^0\pi^0$, $K^+\gamma \rightarrow K^0\pi^+$ и $K^0\gamma \rightarrow K^+\pi^-$ вычислены в рамках модели доминантности векторных мезонов, которая является естественным расширением киральной теории возмущений. В околороговой области сечения процессов $K^+\gamma \rightarrow K^+\pi^0$ и $K^0\gamma \rightarrow K^0\pi^0$, в которые даёт вклад киральная аномалия, в десятки раз превосходят сечения “неаномальных” процессов $K^+\gamma \rightarrow K^0\pi^+$ и $K^0\gamma \rightarrow K^+\pi^-$, что отчётливо видно на рис. 2 и 3, где показано околороговое поведение соответствующих сечений.

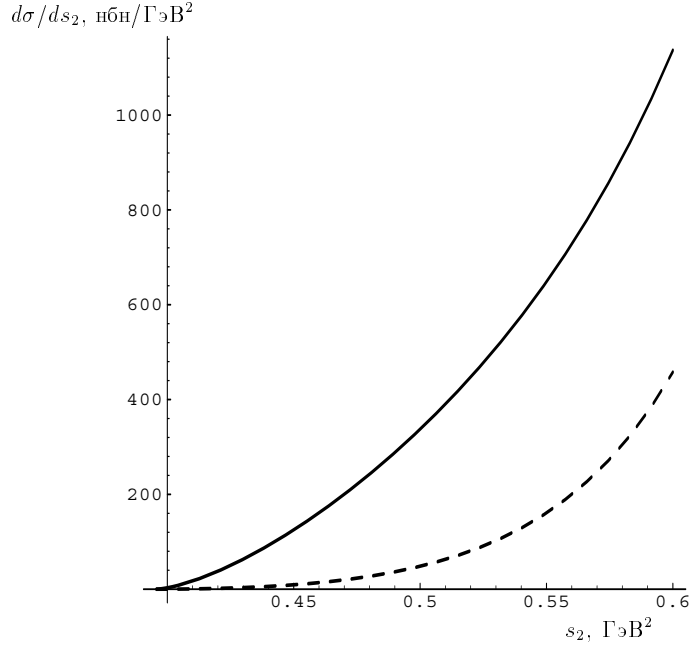


Рис. 2. Сечения процессов кулоновского рассеяния на ядре бериллия $K^+Z \rightarrow K^+\pi^0Z$ (сплошная линия) и $K^+Z \rightarrow K^0\pi^+Z$ (штриховая линия) в зависимости от $s_2 = (p_K^{\text{out}} + p_\pi)^2$ при энергии пучка K^- -мезонов 40 ГэВ. Кинематическое ограничение: квадрат импульса, переданного ядру, $|t_1| < (50 \text{ МэВ})^2$.

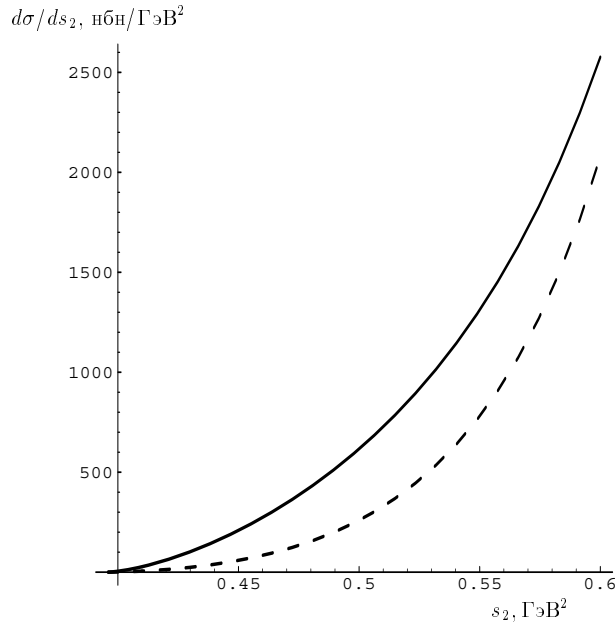


Рис. 3. Сечения процессов кулоновского рассеяния на ядре бериллия $K^0 Z \rightarrow K^0 \pi^0 Z$ (сплошная линия) и $K^0 Z \rightarrow K^+ \pi^- Z$ (штриховая линия) в зависимости от $s_2 = (p_K^{\text{out}} + p_\pi)^2$ при энергии пучка K -мезонов 40 ГэВ. Кинематическое ограничение: квадрат импульса, переданного ядру, $|t_1| < (50 \text{ МэВ})^2$.

Показано, что эти сечения вполне можно измерить в процессах кулоновского рождения π -мезонов каонным пучком на ядре бериллия на ускорителе ИФВЭ (энергия каонного пучка 40 ГэВ): сечения таких процессов при рассеянии в подходящую кинематическую область составляют $20 \div 200$ нбн.

Основное значение экспериментального изучения амплитуд $K\gamma \rightarrow K\pi$ состоит в том, что они являются весьма ценным источником экспериментальной информации о числе цветов — именно сечения этих реакций (а не ширина распада $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$) могут быть упоминаемы как физические величины, **явно** зависящие от N_c .

В заключении сформулированы результаты диссертации, представленные к защите.

Список литературы

1. Yu.Ya. Komachenko, R.N. Rogalyov. Isospin breaking corrections to form factors of the $\pi \rightarrow e\nu\gamma$ decay.// *Phys. Lett.* **B334**, 132 (1994).
2. Р.Н. Роголёв. Компактное выражение билинейной комбинации дираковских спиноров через мировые тензоры.// *ТМФ*, **101**, 384 (1994).
3. R.N. Rogalyov. Geometrical Aspects of the Helicity Formalism.// *Int. J. Mod. Phys. A* **11**, 3711 (1996).
4. Р.Н. Роголёв. Киральная аномалия в реакциях $K\gamma \rightarrow K\pi$.// *Ядерная физика*, **64**, 72 (2001).
5. R.N.Rogalyov. "A Possibility to Measure CP -Violating Effects in the Decay $K \rightarrow \mu\nu\gamma$ ".// *Phys. Lett.* **B521**, 243 (2001); hep-ph/0105187.

Рукопись поступила 12 ноября 2001 года

Р.Н. Роголёв

Применение методов киральной теории возмущений к изучению процессов
рассеяния и распада π - и K -мезонов.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В. Орлова

Подписано к печати 15.11.2001. Формат $60 \times 84/16$.

Офсетная печать. Печ.л. 0.74. Уч.-изд.л. 0.65. Тираж 100. Заказ 189.

Индекс 3649. ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2001–49, И Ф В Э, 2001
