ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2012-22
ОЭФ

С.В. Донсков, В.Н. Колосов, А.А. Леднев, Ю.В. Михайлов,
В.А. Поляков, В.Д. Самойленко, Г.В. Хаустов

Измерение угла смешивания в псевдоскалярном секторе мезонов в π^-- и K^--пучках на установке ГАМС-4π при импульсе 32 ГэВ/с

Протвино 2012

УДК 519.25.256 М–24

Аннотация

Донсков С.В., Колосов В.Н., Леднев А.А. и др. Измерение угла смешивания в псевдоскалярном секторе мезонов в π^-- и K^--пучках на установке ГАМС-4π при импульсе 32 ГэВ/с: Препринт ИФВЭ 2012-22. – Протвино, 2012. – 8 с., 4 рис., 1 табл., библиогр.: 11.

Изложены результаты по измерению угла смешивания и образованию η'- и η-мезонов в π^-- и K^--пучках. При представлении физических состояний η' и η в кварковом базисе использование π^-- и K^--пучков позволяет изучить $|\eta_q\rangle$ и $|\eta_s\rangle$ части волновой функции мезонов. Отношение сечений образования η' и η при $t' = 0$ (ГэВ/с)^2 в π^--пучке $R_\pi(\eta'/\eta) = 0.56 \pm 0.04$, что приводит к углу смешивания в псевоскалярном секторе $\phi_P = (36.8 \pm 1.)^o$. В K^--пучке $R_K(\eta'/\eta) = 1.30 \pm 0.16$. Установлено, что содержание глюонной компоненты в η'-мезоне составляет $\sin^2\psi_G = 0.15 \pm 0.06$. Работа выполнена на установке ГАМС-4π.

Abstract

Donskov S.V., Kolosov V.N., Lednev A.A. et al. Measurement of the mixing angle in pseudoscalar meson sector in π^- and K^- beams with GAMS-4π Setup at the beam momentum 32 GeV/c: IHEP Preprint 2012-22. – Protvino, 2012. – p. 8, figs. 4, tables 1, refs.: 11.

The results for mixing angle measurement and η', η mesons production in π^- and K^- beams are preseneted. When the η', η mesons are described in nonstrange(NS)–strange(S) quark basis the π^- and K^- beams allow to study $|\eta_q\rangle$ and $|\eta_s\rangle$ parts of the meson wave function. The cross section ratio at $t' = 0$ (GeV/c)^2 in the π^- beam is $R_\pi(\eta'/\eta) = 0.56 \pm 0.04$, results in mixing angle $\phi_P = (36.8 \pm 1.)^o$. For K^- beam the ratio is $R_K(\eta'/\eta) = 1.30 \pm 0.16$. It was found that gluonium content in η' is $\sin^2\psi_G = 0.15 \pm 0.06$. The experiment was carried out with GAMS-4π Setup.

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2012

1. Введение

Первые исследования структуры легких мезонов восходят к семидесятым годам прошлого века, когда в рамках наивной кварковой модели измерялись экспериментальные следствия нарушения $SU(3)$ симметрии. В этой модели физические состояния являются смесью $SU(3)$ синглета и октета:

$$|\eta_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}|u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}\rangle,\ |\eta_8\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}|u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}\rangle, \tag{1}$$

а физические состояния η и η' есть их линейная комбинация

$$\begin{pmatrix} \eta \\ \eta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_P & -\sin\theta_P \\ \sin\theta_P & \cos\theta_P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_8 \\ \eta_0 \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где θ_P — угол смешивания в синглет-октетном представлении. При использовании кваркового базиса

$$|\eta_q\rangle = \frac{|u\bar{u} + d\bar{d}\rangle}{\sqrt{2}},\ |\eta_s\rangle = |s\bar{s}\rangle, \tag{3}$$

смешивание принимает вид

$$\begin{pmatrix} \eta \\ \eta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi_P & -\sin\phi_P \\ \sin\phi_P & \cos\phi_P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_q \\ \eta_s \end{pmatrix}. \tag{4}$$

Углы θ_P и ϕ_P в представлениях (2) и (4) связаны простым соотношением

$$\theta_P = \phi_P - \arctan\sqrt{2}. \tag{5}$$

Но, как показали дальнейшие исследования, структура псевдоскаляров оказалась не столь проста. Экспериментальные свойства η' можно описать, если предположить,

что он содержит значительную примесь глюонной компоненты [1]. Поэтому волновая функция η' обязана включать и глюонную часть. Параметризация, которая используется в эксперименте KLOE [2], имеет два угла смешивания — ψ_P для кварковой части и ψ_G для глюонной:

$$\begin{array}{llll} \eta' = & \cos\psi_G \sin\psi_P |\eta_q\rangle & +\cos\psi_G \cos\psi_P |\eta_s\rangle & +\sin\psi_G |G\rangle \\ \eta = & \cos\psi_P |\eta_q\rangle & -\sin\psi_P |\eta_s\rangle. & \end{array} \tag{6}$$

По результатам "глобального фита" [2] глюонная компонента $|G\rangle$ составляет $\sin^2\psi_G = 0.12 \pm 0.04$. Отметим, что в представлении (6) глюонная компонента приписывается только η'.

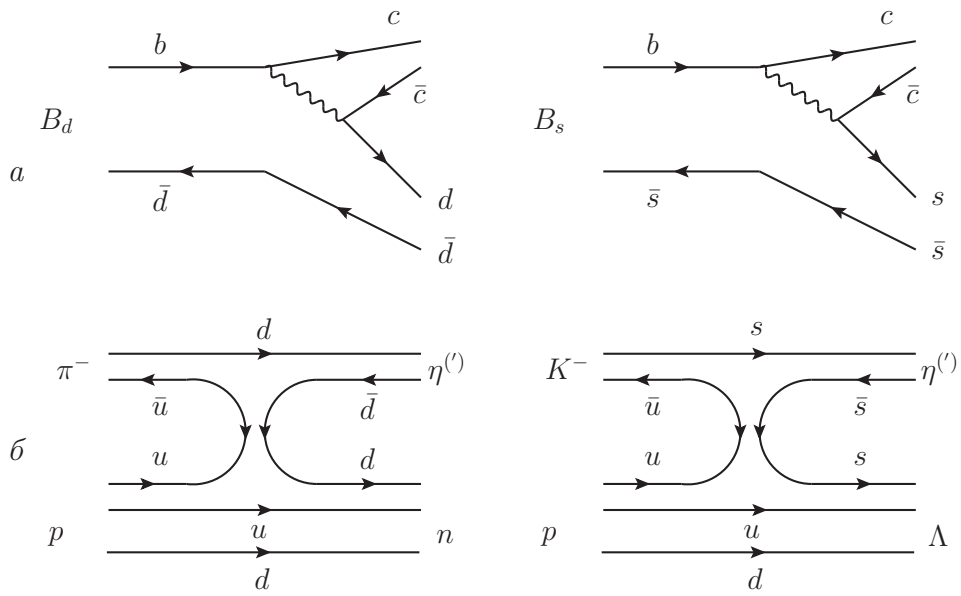

Рис. 1. Диаграммы процессов распадов B_d, B_s мезонов (a), диаграммы реакций перезарядки с π^-- и K^--пучками ($б$).

В процессе изучения внутренней структуры мезонов стало понятно, что можно значительно улучшить точность измерений, если для исследуемого процесса "приготовить" заранее известное начальное кварковое состояние ($|\eta_q\rangle$ или $|\eta_s\rangle$). Такая возможность появляется, например, при изучении распадов B_d, B_s мезонов [3], рис. 1а. В нашем случае, при образовании η'-, η-мезонов в π^-- и K^--перезарядке, хорошим приближением для понимания процессов могут служить планарные диаграммы, рис. 1б. В предположении доминирования этих диаграмм можно надеяться, что для пучковых частиц с различным кварковым составом — π^--мезона ($d\bar{u}$) и K^--мезона ($s\bar{u}$) с хорошей точностью будет приготовлено начальное состояние $d\bar{d}$ в π^--пучке и $s\bar{s}$ в K^--пучке. Тогда в этом приближении отношение сечений образования η' и η в π^--пучке

связано с углом смешивания ϕ_P (4) как

$$R_\pi = \frac{\sigma(\eta')}{\sigma(\eta)} = \mathrm{tg}^2\,\phi_P, \tag{7}$$

и в K^--пучке

$$R_K = \frac{\sigma(\eta')}{\sigma(\eta)} = \mathrm{ctg}^2\,\phi_P. \tag{8}$$

Идея измерения угла смешивания при помощи отношения сечений впервые была высказана в работе [4], и экспериментально измерена в π^--пучке [5, 6]. При этом было сделано указание, что угол смешивания должен извлекаться с учетом кинематических факторов и возможной зависимости матричного элемента перехода от фазового объема, переданного импульса и пр. [4, 7]. Чтобы привести условия измерений к единому виду и избавиться от влияния приведенных выше факторов, значение угла смешивания обычно приводят при переданном импульсе $t' = t - t_{min} = 0$[1], и тогда отношение сечений принимает вид

$$R = \frac{d\sigma(\eta')}{dt} / \frac{d\sigma(\eta)}{dt}\,|_{t=0}\,. \tag{9}$$

Если параметры дифференциальных сечений мезонов совпадают, то отношение (9), в зависимости от сорта пучковой частицы, близко к отношению полных сечений (7) или (8).

В настоящей работе изложены результаты измерений угла смешивания и поведения R_π, R_K в зависимости от переданного импульса для легких псевдоскалярных мезонов (η, η') в π^-- и K^--пучках. Анализ данных проведен как в предположении чисто кваркового состава мезонов, так и с учетом глюонной компоненты.

2. Установка ГАМС-4π и отбор событий

Данные были получены на установке ГАМС-4π в сеансе 2002 г. Постановка эксперимента, детекторы и система обработки были подробно описаны в наших предыдущих работах [8]. В пучке заряженных частиц канала 4В ускорителя У-70 ИФВЭ, на котором работала установка, содержится примерно 98% π^-- и 2% K^--мезонов. Примесь других частиц пренебрежимо мала. Тип пучковой частицы (π^- или K^-) надежно определяется двумя пороговыми черенковскими счетчиками типа ПСС [9] с кварцевыми линзами.

Источником моноэнергетических мезонов служила реакция перезарядки при импульсе пучковой частицы 32.5 ГэВ/с

$$\pi^-(K^-)\;p \to M^0\;n(\Lambda) \tag{10}$$

[1] В наших кинематических условиях $|t_{min}| < 4 \cdot 10^{-3}$ (ГэВ/с)^2.

с последующим распадом состояния M^0 на γ-кванты, которые регистрировались электромагнитным калориметром ГАМС-2000 [10]. Изучение образования псевдоскалярных мезонов η и η' было проведено в моде распада на два γ-кванта. Использование одинаковой моды распада с простейшей топологией значительно уменьшает систематические ошибки при вычислении отношения сечений образования.

Подавление аппаратурного и физических фонов без существенной потери эффективности регистрации исследуемых процессов было достигнуто следующими стандартными отборами:

- расстояние между осями ливней в ГАМС больше 50 мм;
- расстояние точки попадания γ-кванта в ГАМС от оси пучка больше 45 мм (для подавления фона в наиболее загруженных центральных счетчиках ГАМС);
- энергия каждого γ-кванта больше 0.7 ГэВ, и в центральной области порог плавно повышается до 1 ГэВ;
- суммарная энергия в ГАМС ограничена интервалом 28-36 ГэВ;

Экспериментальный спектр масс 2γ-событий приведен на рис. 2. Как в π^--, так и в K^--пучке мезоны выделяются практически без фона. За время измерений было зарегистрировано $0.66{\cdot}10^6$ событий $\eta \to 2\gamma$ в π^--пучке и $2.22{\cdot}10^3$ событий в K^--пучке. Для η'-мезона количество событий составляет $14.27 \cdot 10^3$ и $0.21 \cdot 10^3$ соответственно. При изучении дифференциального сечения образования с целью улучшения разрешения по переданному импульсу t был выполнен 2C фит (дополнительно фиксирована масса двух γ-квантов — $M_{\gamma\gamma} = M_\eta$ или $M_{\gamma\gamma} = M_{\eta'}$), а гистограмма с переменным бином отражает изменение разрешения по переданному импульсу во всем интервале.

3. Измерение угла смешивания

Как уже отмечалось, чтобы устранить зависимость угла смешивания от параметров дифференциального сечения образования в реакции перезарядки, принято определять его при экстраполяции сечений образования к $t' = 0$.

Для описания зависимости дифференциального сечения образования в области передач $|t| < 0.6$ (ГэВ/c)^2 была использована феноменологическая зависимость [11]

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\sigma}{dt}\,|_{t=0}\,(1 - gct)e^{ct}, \tag{11}$$

где $g = \sigma_-/\sigma_+$ — отношение проинтегрированных по t сечений с переворотом и без переворота спина. Результаты фита с учетом эффективности в π^-- и K^--пучках для η- и η'-мезонов приведены в табл. 1 и показаны на рис. 3. Интересно отметить, что в K^--пучке доминирует амплитуда без переворота спина ($g = 0$).

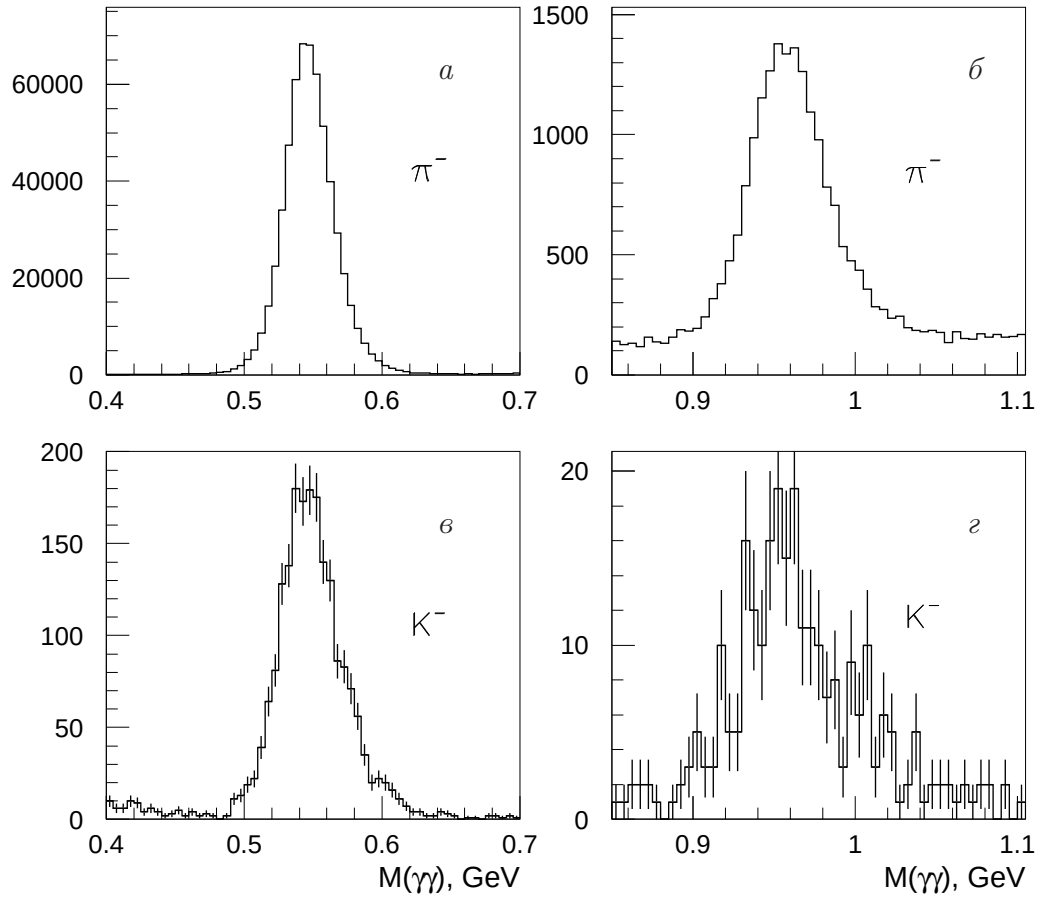

Рис. 2. Экспериментальный спектр масс 2γ-событий, в области η- и η'-мезонов в π^--пучке (гистограммы *а* и *б* соответственно) и в K^--пучке (*в*, *г*).

При $t' = 0$ отношение сечений в π^--пучке составляет

$$R_\pi = \frac{d\sigma(\eta')}{dt} / \frac{d\sigma(\eta)}{dt} \mid_{t=0} = 0.56 \pm 0.04, \tag{12}$$

Таблица 1. Результаты фита распределений по переданному импульсу для η- и η'-мезонов в π^-- и K^--пучках функцией (11), ($a \equiv \frac{d\sigma}{dt} \mid_{t=0}$).

	η			η'		
	a	c	g	a	c	g
π^-	3.61 ± 0.04	7.9 ± 0.1	2.5 ± 0.1	4.58 ± 0.14	8.9 ± 0.2	1.9 ± 0.2
K^-	14.2 ± 0.7	9.8 ± 1.2	0.15 ± 0.17	8.3 ± 0.9	6.1 ± 2.1	0.0 ± 0.4

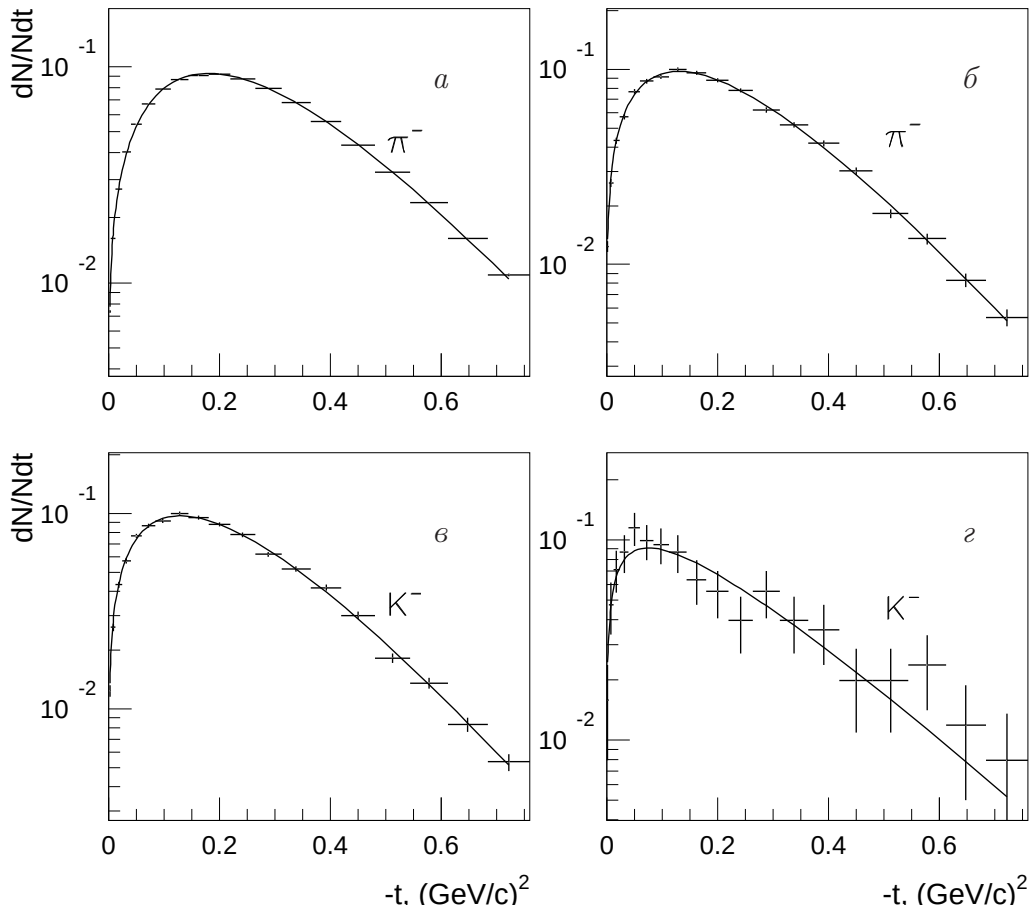

Рис. 3. Нормированные дифференциальные сечения образования η- и η'-мезонов с фитирующей функцией (11) в π^--пучке (гистограммы *а* и *б* соответственно) и в K^--пучке (*в*, *г*).

ошибка главным образом связана с точностью вычисления эффективности при малой величине переданного импульса t. Полученное значение согласуется с результатом эксперимента НИЦЕ $R_\pi(\eta'/\eta) = 0.55 \pm 0.06$ [6]). Угол смешивания в кварковом базисе равен

$$\phi_P = (36.8 \pm 1.0)^o, \tag{13}$$

что в октет-синглетном представлении соответствует углу $\theta_P = -17.9 \pm 1.0$. Для K^--пучка отношение дифференциальных сечений

$$R_K = \frac{d\sigma(\eta')}{dt} / \frac{d\sigma(\eta)}{dt} \mid_{t=0} = 1.30 \pm 0.16. \tag{14}$$

Очевидно, что согласно наивной кварковой модели ожидается

$$R_\pi \cdot R_K = \mathrm{tg}^2\, \phi_P \cdot \mathrm{ctg}\, {\phi_P}^2 = 1, \tag{15}$$

но экспериментальные данные приводят к результату

$$R_\pi \cdot R_K = 0.72 \pm 0.09. \tag{16}$$

Это говорит о том, что внутренняя структура мезонов содержит компоненты, которые не учитываются в модели, либо об ограниченности применимости планарных диаграмм для исследуемых процессов. Если следовать подходу KLOE (6), то для отношения сечений легко получить следующие выражения:

$$\begin{aligned} R_\pi &= \cos^2\psi_G \,\mathrm{tg}^2\,\phi_P \\ R_K &= \cos^2\psi_G \,\mathrm{ctg}^2\,\phi_P, \end{aligned} \tag{17}$$

и тогда произведение отношений

$$R_\pi \cdot R_K = \cos^4\psi_G. \tag{18}$$

Наш результат (16) даёт содержание глюооонной компоненты

$$\sin^2\psi_G = 0.15 \pm 0.06 \tag{19}$$

близкое к результату KLOE, который был получен из радиационных распадов векторных и скалярных мезонов.

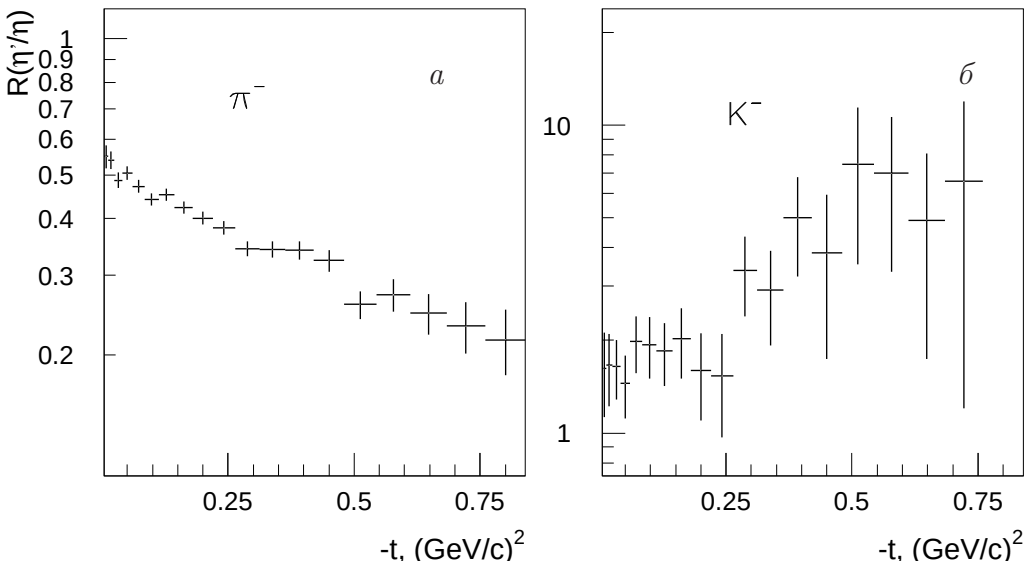

Рис. 4. Отношение дифференциальных сечений $R(\eta'/\eta)$ в π^-- (*а*) и K^--пучке (*б*) в зависимости от переданного импульса.

Представляет интерес поведение отношения дифференциальных сечений образования η'- и η-мезонов как функции переданного импульса в π^-- и K^--пучках, которые показаны на рис. 4. Наблюдённое в эксперименте различие в параметрах наклона дифференциального сечения η' и η приводит к тому, что отношение сечений не является константой. Этот вопрос требует дальнейших исследований.

4. Заключение

В работе на основе измерения сечений легких псевдоскалярных мезонов η, η' в π^-- и K^--пучках определен угол смешивания.

Отношение дифференциальных сечений при переданном импульсе $t' = 0$ (ГэВ/с)^2 в π^--пучке $R_\pi(\eta'/\eta) = 0.56 \pm 0.04$ приводит к значению угла смешивания в кварковом базисе $\phi_P = (36.8 \pm 1.0)^o$, или $\theta_P = -(17.9 \pm 1.0)^o$ в октет-синглетном представлении. Отношение сечений, полученное в K^--пучке, $R_K(\eta'/\eta) = 1.30 \pm 0.16$ соответствует углу $\phi_P = (41.3 \pm 1.8)^o$ и не согласуется с результатом в π^--пучке. Мы полагаем, что причиной является глюонная часть η'-мезона, которая не учитывается в простой кварковой модели. Введение в базис волновой функции η'-мезона дополнительной глюонной компоненты $|G\rangle$ и угла смешивания ψ_G, как это было сделано в эксперименте KLOE, приводит к содержанию глюонной компоненты $\sin^2\psi_G = 0.15 \pm 0.06$ в η'-мезоне.

Авторы благодарны профессору А.К. Лиходеду и А.В. Лучинскому за многочисленные полезные обсуждения.

Список литературы

[1] S.S. Gershtein, A.K. Likhoded, Yu.D. Prokoshkin, Z.Phys. C24 (1984) 305.

[2] F. Ambrosino et al., arXiv:0906.3819 [hep-ph].

[3] M.-C. Chang et al., arXiv:1203.3399v1 [hep-ex].

[4] G. Alexander, H.J. Lipkin and F. Scheck, Phys.Rev.Lett. 17 (1966) 412.

[5] N.R. Stanton et al., Phys.Letters B92 (1980), P. 353.

[6] В.Д. Апель, К.Х. Аугенштайн, Е. Бертолуччи и др. – Препринт ИФВЭ 79-23 (1979).

[7] H.J. Lipkin and F. Scheck, Phys.Rev.Lett. 16 (1966) 71.

[8] Ф. Бинон и др. – Препринт ИФВЭ 2005-47.

[9] Донсков С.В., Качанов В.А., Кутьин В.М. и др. – Препринт ИФВЭ 68-46; ПТЭ Т.3. С.60 (1969).

[10] Бинон Ф. и др. – В кн.: Черенковские детекторы и их применение в науке и технике. – М.: Наука, 1990, с. 149; Nucl. Instr. Methods. 1986. V. A248. P.86.

[11] В.Д. Апель, К.Х. Аугенштайн, Е. Бертолуччи и др. – Препринт ИФВЭ 79-1 (1979).

Рукопись поступила 26 ноября 2012 г.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

С.В. Донсков, В.Н. Колосов, А.А. Леднев и др.
Измерение угла смешивания в псевдоскалярном секторе мезонов в π^-- и K^--пучках на установке ГАМС-4π при импульсе 32 ГэВ/с.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **LaTeX.**

Подписано к печати 29.11.2012. Формат $60 \times 84/16$. Цифровая печать.
Печ.л. 0,75. Уч.-изд.л. 0,96. Тираж 80. Заказ 57. Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2012–22, И Ф В Э, 2012