

# РОЖДЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ СОСТОЯНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ СТРАННЫЕ КВАРКИ, В $\Sigma^-$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

*В. В. Тарасов (от коллаборации SELEX)*

ФГУП «ГНЦ РФ – ИТЭФ», Москва

Физика частиц занимается изучением наиболее скрытых деталей строения материи. Изучение свойств таких частиц, механизмов их рождения и распада, играет ключевую роль в понимании многих процессов происходящих во Вселенной с момента Большого взрыва до настоящего времени. Теория, описывающая взаимодействия между этими частицами, называется Стандартной Моделью, а сами частицы, участвующие во взаимодействиях – адронами и лептонами.

Адроны, содержащие странные кварки, с одной стороны, еще недостаточно изучены. Систематика адронов в рамках Стандартной Модели предсказывает больше таких состояний, чем наблюдается в экспериментах. С другой стороны, странность является одним из сигналов кварк-глюонной плазмы и поэтому изменение характеристик состояний, включающих странные кварки, является актуальной задачей физики частиц.

В таблицах элементарных частиц, среди странных барионов, представлены 13  $\Lambda^*$ , 9  $\Sigma^*$  и 5  $\Xi^*$  резонансов, классифицируемых как известные (3 или 4 звезды) [1]. Так, например, из всех  $\Sigma^*$ -гиперонов почти все известные состояния с массой более 1385 МэВ/с<sup>2</sup> определялись только с помощью парциально-волнового анализа, с сильно различающимися оценками значений массы и ширины. К настоящему времени существуют лишь две работы по прямому наблюдению в спектре эффективных масс  $\Sigma^*$  с массами более 1385 МэВ/с<sup>2</sup> и  $\Lambda^*$  с массами более 1520 МэВ/с<sup>2</sup> – эксперимент WA89 в ЦЕРНе [2] и SPHINX в Протвино [3].

Коллаборация WA89 в реакции  $\Sigma^- + C(\text{Cu}) \rightarrow p + K^- + X$  в спектре эффективных масс системы  $pK^-$  наблюдала сигналы с массами 1520, 1670 и 1810 МэВ/с<sup>2</sup> (рис. 1). Все эти сигналы были образованы в инклюзивной реакции на  $\Sigma^-$ -пучке с импульсом 340 ГэВ/с.

Вторая работа – работа коллаборации SPHINX на протонном пучке ускорителя У-70 ИФВЭ, где наблюдался сигнал  $\Lambda(1520)$ , а также сигналы с массами 1670 и 1810 МэВ/с<sup>2</sup> в системе  $pK^-$  в реакции  $p + N \rightarrow p + K^- + K^+ + N$ .

Векторный  $\phi^0(1020)$ -мезон является хорошо изученным состоянием (в PDG представлено более 150 работ по наблюдению этого мезона со скрытой странностью). Менее известен тензорный  $2^+ f_2'(1525)$ -мезон, который, как и  $\phi^0(1020)$ -мезон, обладает скрытой странностью (кварковый состав  $s\bar{s}$ ), статистическая

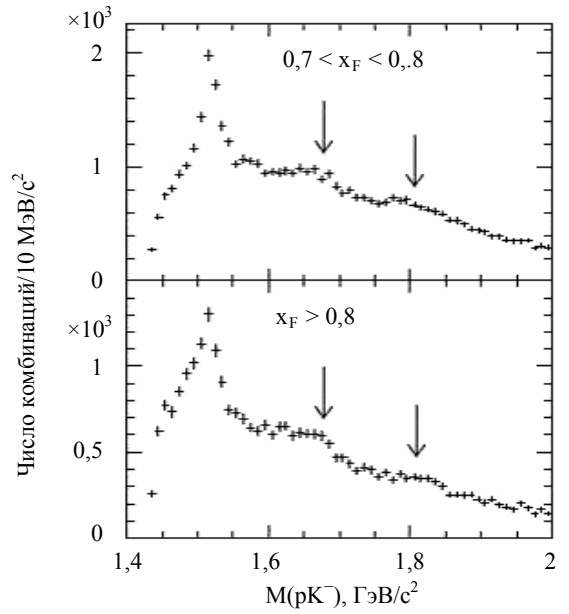


Рис. 1. Спектр эффективных масс системы  $pK^-$ , где наблюдались состояния с массами 1520, 1670 и 1810 МэВ/с<sup>2</sup>, образующихся в инклюзивной реакции на  $\Sigma^-$ -пучке (эксперимент WA 89). Стрелками показаны положения сигналов в области 1670 и 1810 МэВ/с<sup>2</sup>

обеспеченность мировых данных по этому состоянию не так велика. Большинство мировых данных о мезоне  $f_2'(1525)$  получены на пучках, не содержащих странный кварк – в таких экспериментах рождение  $s\bar{s}$  состояний подавлено правилом Окубо-Цвейга-Иизуки (ОЦИ). Существует порядка 10 работ (преимущественно 70–80-х годов), где этот резонанс наблюдался на каонном пучке.

## Экспериментальная установка

Название SELEX является аббревиатурой от SEgmented Large  $X_F$  baryon spectrometer (или дословно: Многосекционный барионный спектрометр больших  $x_F$ ). Основной задачей эксперимента SELEX являлось изучение свойств барионов, содержащих s-кварки, образующихся при взаимодействии гиперонов с ядрами на ускорителе Тэватрон. Набор данных происходил в течение 1996–97 гг.

На рис. 2 представлена схема установки SELEX. В эксперименте SELEX пучок протонов с энергией

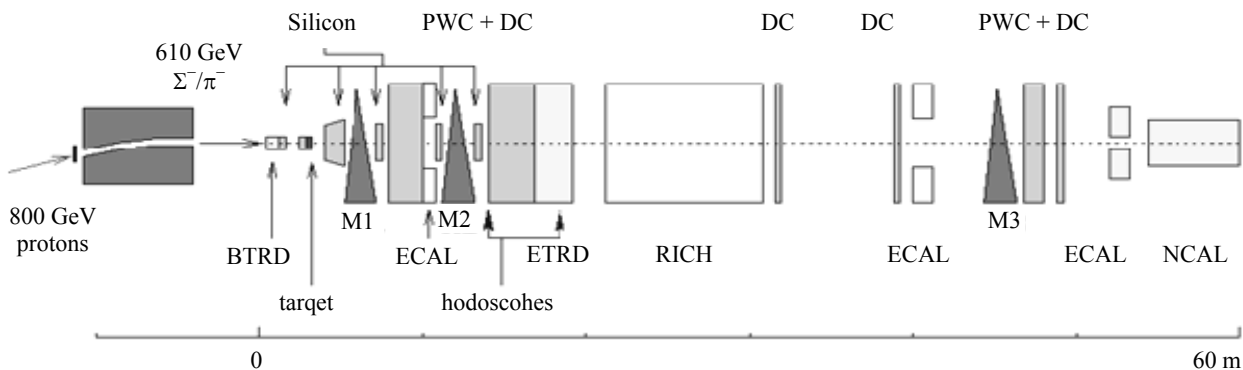


Рис. 2. Схема установки SELEX

800 ГэВ падал на бериллиевую мишень. Вылетающие вперед вторичные частицы направлялись в узкий изогнутый канал, высверленный в гиперонном магните. Поскольку относительная доля гиперонов во вторичном пучке растет с энергией, данные для анализа были набраны с использованием гиперонного пучка с энергией  $600 \pm 50$  ГэВ. В области мишени 600 ГэВ-й вторичный пучок состоял из приблизительно 50,9 %  $\pi^-$ ; 46,3 %  $\Sigma^-$ ; 1,6 %  $K^-$  и 1,2 %  $\Xi^-$ .

Три дипольных магнита делят установку SELEX на 5 независимых спектрометров, называемых пучковый, вершинный, M1, M2, M3 соответственно. По отклонению треков в магнитном поле определялся импульс частиц. Для определения треков частиц использовались пропорциональные проволоочные камеры (Proportional Wire Chambers или PWC), кремниевые детекторы (Silicon Detectors или SD) и векторные дрейфовые камеры (Vector Drift Chambers или VDC). С помощью кольцевого черенковского детектора (Ring Imaging Cherenkov Detector или RICH) [4] и детекторов переходного излучения (Transition

Radiation Detectors или TRD) определялся тип частицы. Нейтральные частицы детектировались в электромагнитных калориметрах Фотон (PHOTON) и адронном калориметре (NCAL).

Как уже было сказано ранее, кольцевой черенковский детектор являлся одним из основных детекторов для идентификации заряженных частиц. В нем частицы проходили 10-метровый цилиндр, заполненный газом Ne. Поскольку релятивистские частицы двигались быстрее, чем скорость света в данной среде, они испускали черенковские фотоны, которые отражались от сферического зеркала и образовывали кольца на детектирующей поверхности (рис. 3).

В эксперименте SELEX черенковские фотоны отражались от зеркала с 20-метровым радиусом кривизны и фокусировались на массиве из 2848 ФЭУ-60 с диаметром рабочей области фотокатода 10 мм. RICH-детектор использовался для определения вероятности того, что данный трек является электроном, мюоном, пионом, каоном, протоном, гипероном или другой частицей.

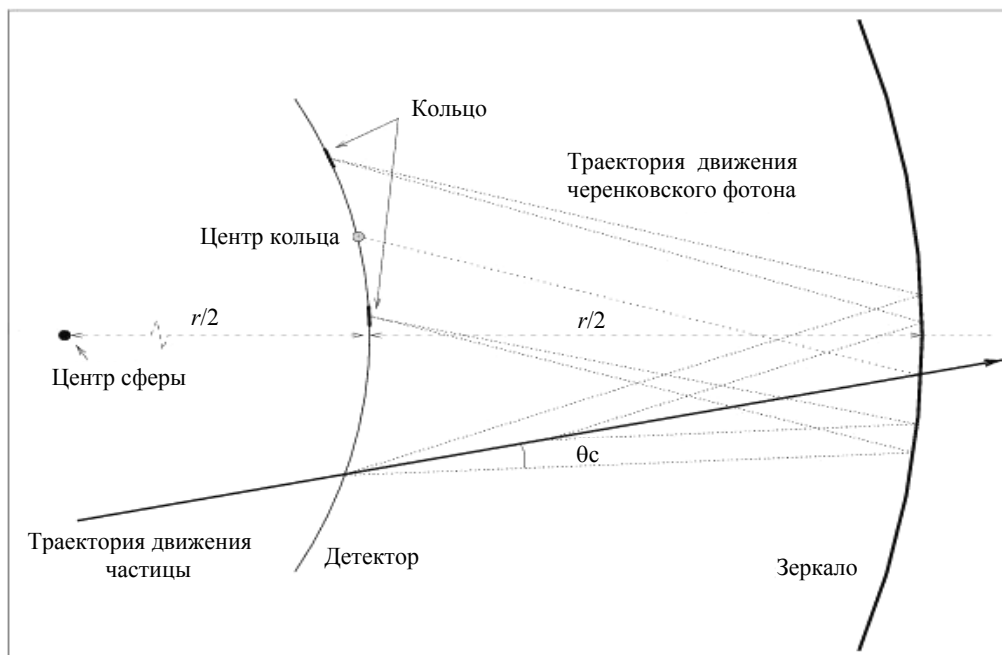


Рис. 3. Формирование колец на детектирующей поверхности RICH

## Физические результаты

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость радиуса кольца черенковского излучения от импульсов положительно заряженных частиц ( $\mu^+$ ,  $\pi^+$ ,  $K^+$ ,  $p$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\Xi^+$ ,  $\Omega^+$ ). Из рисунка наглядно видно, что приемлемая идентификация частиц возможна до значения импульсов, где происходит слияние кривых ( $\sim 300$  ГэВ/с). Видна даже область импульсов, в которой возможно различить по черенковскому излучению мюоны и пионы. Для отрицательно заряженных частиц зависимость аналогичная.

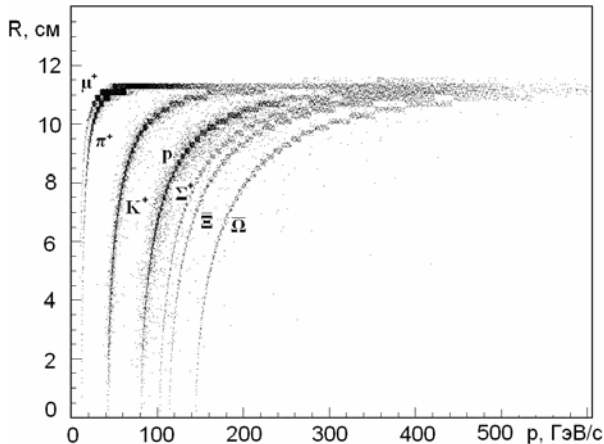


Рис. 4. Радиус колец в RICH для положительно заряженных частиц

На выборке данных (60 млн. триггерных событий из всего массива данных, порядка 1 млрд. событий) в реакции  $\Sigma^- + C(\text{Cu}) \rightarrow p + K^- + X$  на гиперонном пучке с импульсом 600 ГэВ/с идентифицировались протоны с импульсом от 80 до 220 ГэВ/с и заряженные каоны с импульсом от 40 до 160 ГэВ/с. Знак заряда и импульс частицы определялись по отклонению трека в магнитном поле. Отбор треков проходил в соответствии с сигналами в RICH-детекторе. Примесь  $\Sigma$ -гиперонов среди зарегистрированных протонов являлась незначительной, из-за того, что время жизни  $\Sigma$ -гиперонов существенно меньше времени жизни протонов (95,5 % всех  $\Sigma$ , вылетающих из мишени, распадаются до детектора RICH, при начальном значении импульса не более 600 ГэВ/с).

Отобрано 3593988 событий, содержащих протон и  $K^-$ -мезон, вылетающих из мишени. В спектре эффективных масс системы  $pK^-$  (рис. 5) отчетливо видны сигналы в области 1520, 1670 и 1820 МэВ/с<sup>2</sup>. При фитировании спектров использовалось разрешение установки  $\sigma(M)$ , полученное моделированием методом Монте-Карло для фиксированных значений эффективных масс при нулевой ширине резонансного состояния (рис. 6). Каждый сигнал в спектре эффективных масс для систем  $pK^-$  фитировался сверткой функций Гаусса и Брейта-Вигнера, фон описывался сложной функцией  $a\{x - (m_p + m_{K^-})\}^{0,5} \exp(b + cx + dx^2)$ , где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  – параметры. Для поиска систематических погрешностей фон фитировался следую-

щими функциями: 1)  $a\{x - (m_p + m_{K^-})\}^{0,5}(b + cx + dx^2)$  и 2)  $a\{x - (m_p + m_{K^-})\}^{0,5} \exp(b + cx + dx^2)^{-1}$ . Значение  $\chi^2$  на степень свободы в области 1450–2050 МэВ/с<sup>2</sup> составляет 360/84, а в области 1550–2050 МэВ/с<sup>2</sup> составляет 160/86. Как видно из рис. 5, критерий согласия в районе 1545–1555 МэВ/с<sup>2</sup> существенно больше чем 1. Это говорит о возможном существовании в этой области резонансного состояния.

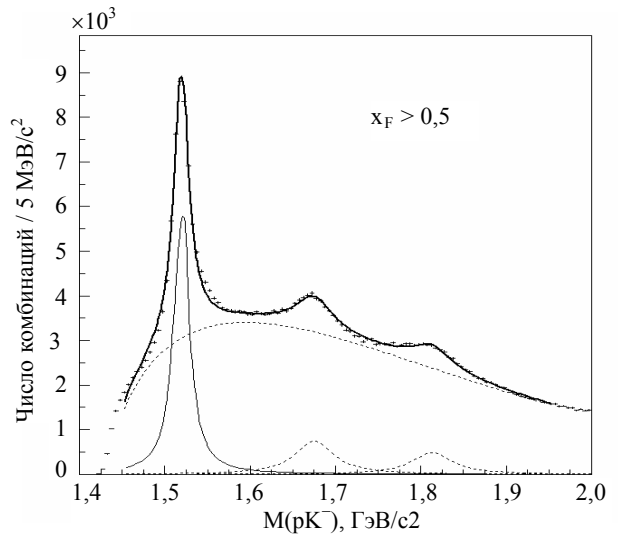


Рис. 5. Спектр эффективных масс системы  $pK^-$  в диапазоне от 1,4 до 2,0 ГэВ/с<sup>2</sup> при значении  $x_F > 0,5$ . Пунктирными линиями показаны фон и резонансы по отдельности

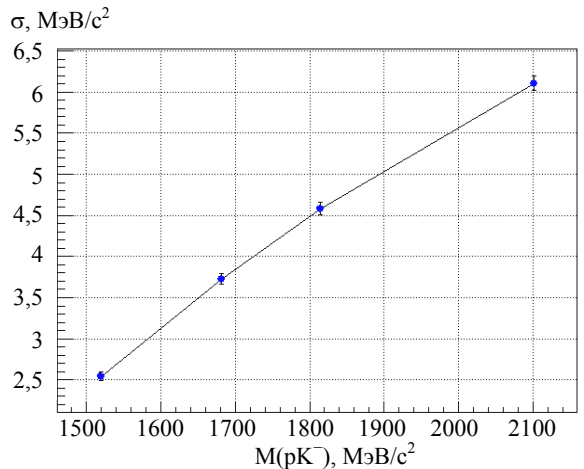


Рис. 6. Зависимость среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  от эффективной массы системы  $pK^-$

Сигнал с массой 1520 МэВ/с<sup>2</sup> соответствует известному гиперонному состоянию  $\Lambda(1520)$ . Природа сигналов с массами 1670 и 1820 МэВ/с<sup>2</sup> не так очевидна. Превышение сигнала над фоном в резонансах:  $232570 \pm 803$  событий для состояния с массой 1520 МэВ/с<sup>2</sup>,  $42620 \pm 976$  – для состояния с массой 1670 МэВ/с<sup>2</sup> и  $36070 \pm 951$  – для состояния с массой 1820 МэВ/с<sup>2</sup>, что соответствует 206, 67 и 52 стандартным отклонениям соответственно. Статистическая обеспеченность сигналов не вызывает сомнений.

Исследована зависимость наблюдаемых сигналов в системе  $pK^-$  от фейнмановской переменной  $x_F$ . Оказалось, что при больших значениях  $x_F$  происходит от-

носительное увеличение сигналов над фоном. Этот эффект может быть связан с механизмом лидирования.

При значении  $0,6 < x_F < 0,7$  в спектре эффективных масс системы  $pK^-$  имеется указание на сигнал в области  $2100 \text{ МэВ}/c^2$  с массой  $2123 \pm 3 \text{ МэВ}/c^2$  и шириной  $13 \pm 9 \text{ МэВ}/c^2$  (рис. 7). Значение  $\chi^2 = 1$ , число событий в сигнале  $39 \pm 11$ . Статистическая обеспеченность этого сигнала составляет всего около четырех стандартных отклонений. Ближайшим кандидатом из таблицы элементарных частиц является  $\Sigma$  (2100) с шириной  $70 \pm 30 \text{ МэВ}/c^2$  и с самым низким статусом (\*).

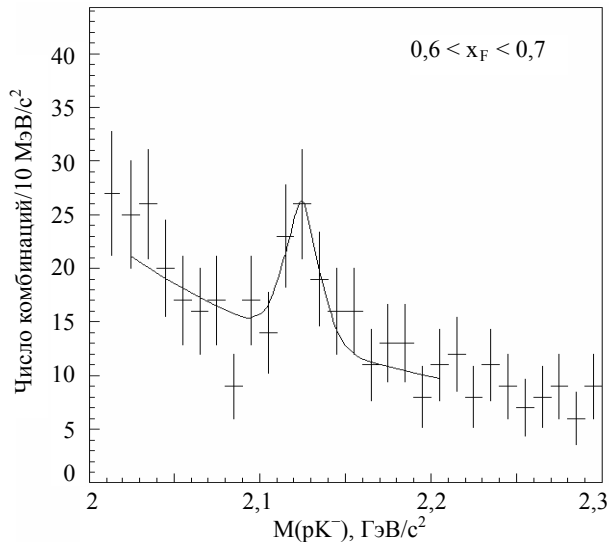


Рис. 7. Спектр эффективных масс системы  $pK^-$  при значениях  $0,6 < x_F < 0,7$

Для определения изотопического спина наблюдаемых резонансов в системе  $pK^-$  в области  $1,67$  и  $1,82 \text{ ГэВ}/c^2$  был проведен анализ спектра эффективных масс системы  $pK_S^0$ . В данном спектре при различных значениях фейнмановской переменной  $x_F$  какие-либо значимые сигналы не обнаружены. Таким образом, наблюдаемые нами сигналы в спектре  $pK^-$  скорее всего соответствуют гиперонным состояниям с изотопическим спином 0.

Полученные характеристики гиперонов вместе с данными PDG приведены в таблице (указаны как статистические, так и систематические погрешности).

Таблица  
Результаты фитирования спектров  $pK^-$  и  $K^+K^-$

Адрон	$M_{PDG}, \text{ МэВ}/c^2$	$\Gamma_{PDG}, \text{ МэВ}/c^2$	$M_{\text{экс}}, \text{ МэВ}/c^2$	$\Gamma_{\text{экс}}, \text{ МэВ}/c^2$
$\Lambda(1520)$	$1519,5 \pm 1$	$15,6 \pm 1$	$1518,7 \pm 0,1 \pm 1,0$	$15,6 \pm 0,1 \pm 1,0$
$\Lambda(1670)$	$1660 \div 1680$	$25 \div 50$	$1672,9 \pm 0,8 \pm 1,0$	$56,6 \pm 1,6 \pm 3,0$
$\Lambda(1820)$	$1815 \div 1825$	$70 \div 90$	$1809,1 \pm 1,4 \pm 1,0$	$71,6 \pm 3,6 \pm 1,4$
$\Sigma(2100)$	$\approx 2100$	$70 \pm 30$	$2125 \pm 4$	$17 \pm 6$
$\phi^0(1020)$	$1019,460 \pm \pm 0,019$	$4,26 \pm 0,05$	$1019,9 \pm 0,1 \pm 0,4$	$4,32 \pm 0,09 \pm \pm 0,16$
$f_2'(1525)$	$1525 \pm 5$	$76 \pm 10$	$1522 \pm 1 \pm 2$	$84 \pm 2 \pm 3$

Определено отношение выходов гиперонных состояний  $\Lambda(1670)$  и  $\Lambda(1820)$  относительно  $\Lambda(1520)$  в канале распада на  $pK^-$ . Оно оказалось равным

$$\frac{\sigma_{1670} \text{BR}(\Lambda(1820) \rightarrow pK^-)}{\sigma_{1520} \text{BR}(\Lambda(1820) \rightarrow pK^-)} = (24,92 \pm 0,45 \pm 0,48) \%$$

$$\frac{\sigma_{1820} \text{BR}(\Lambda(1820) \rightarrow pK^-)}{\sigma_{1520} \text{BR}(\Lambda(1820) \rightarrow pK^-)} = (16,13 \pm 0,38 \pm 0,45) \%$$

где  $\sigma$  – эффективное сечение рождения;  $BR$  – вероятность распада по данному каналу.

Проведены исследования образования гиперонных состояний также и на протонном и пионном пучках. В спектре эффективных масс системы  $pK^-$  на протонном пучке отчетливо наблюдается сигнал  $\Lambda(1520)$ , сигналы с массами  $1670$  и  $1820 \text{ МэВ}/c^2$  имеют меньшую амплитуду по сравнению с сигналами, полученными на гиперонном пучке, так как в этом случае мы имеем другой механизм образования гиперонных состояний (вероятность рождения гиперонных состояний меньше, чем на  $\Sigma^-$ -пучке). На пионном пучке виден лишь сигнал в области  $1520 \text{ МэВ}/c^2$ .

В реакции  $\Sigma^- + C(\text{Cu}) \rightarrow K^+ + K^- + X$  исследованы резонансные состояния в спектрах эффективных масс системы  $K^+K^-$ . Как и в случае системы  $pK^-$ , для системы  $K^+K^-$  был проведен предварительный отбор событий.

На выборке данных системы  $K^+K^-$  (2,3 млн. триггерных событий из всего массива данных, порядка 1 млрд. событий) в реакции  $\Sigma^- + C(\text{Cu}) \rightarrow K^+ + K^- + X$  на гиперонном пучке с импульсом  $600 \text{ ГэВ}/c$  идентифицировались положительно и отрицательно заряженные каоны с импульсом от  $40 \div 160 \text{ ГэВ}/c$ . Отбор треков проходил в соответствии с сигналами в RICH-детекторе.

Отобрано 2255544 событий, содержащих один отрицательный и один положительный  $K$ -мезоны.

Спектр эффективных масс системы  $K^+K^-$  представлен на рис. 8 и 9. В системе  $K^+K^-$  отчетливо видны сигналы в области  $1020$  и  $1525 \text{ МэВ}/c^2$ , которые однозначно можно идентифицировать как  $\phi^0(1020)$  и  $f_2'(1525)$ -мезоны, соответственно.

Фитирование проводилось аналогично описанному выше для системы  $pK^-$ . Как и в случае системы  $pK^-$  при фитировании спектра использовалось разрешение установки  $\sigma(M)$ , полученное моделированием методом Монте-Карло для фиксированных значений эффективных масс. Разрешение установки  $\sigma(M)$  для резонансного состояния с массой  $1020 \text{ МэВ}/c^2$  составляет  $1,6 \text{ МэВ}/c^2$ , для сигнала с массой  $1525 \text{ МэВ}/c^2$  –  $4,5 \text{ МэВ}/c^2$ . Значение  $\chi^2$  на степень свободы в области  $1 \text{ ГэВ}/c^2$  составляет  $80/43$ , в области  $1,5 \text{ ГэВ}/c^2$  –  $185/93$ . Сигнал от  $\phi^0(1020)$ -мезона отличается высоким значением отношения сигнал/фон и малой шириной; число событий в пике равно  $264973 \pm 3355$ . На рис. 8 и 9,б виден сигнал небольшой амплитуды от  $f_2'(1525)$ -мезона, содержащий  $28492 \pm 842$  событий. Статистическая обеспеченность резонансов составляет  $504$  и  $34$  стандартных отклонения для  $\phi^0(1020)$ -мезона и  $f_2'(1525)$ -мезона соответственно.

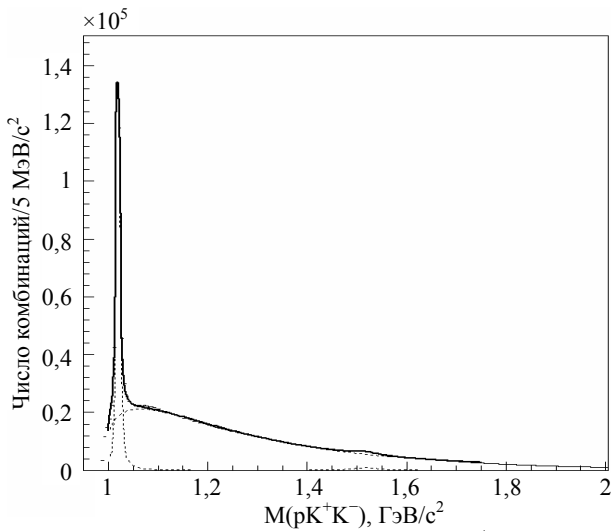
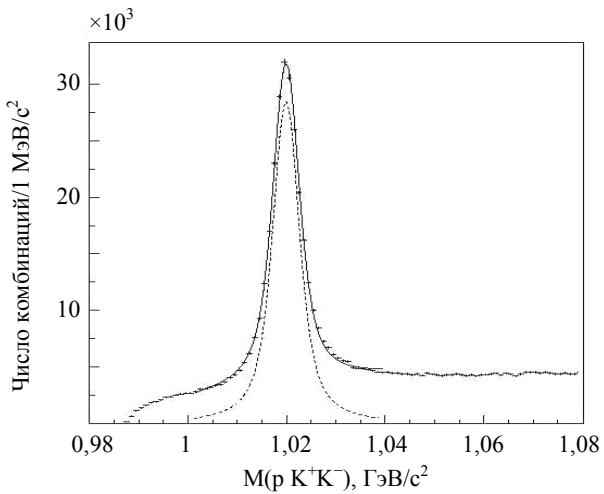
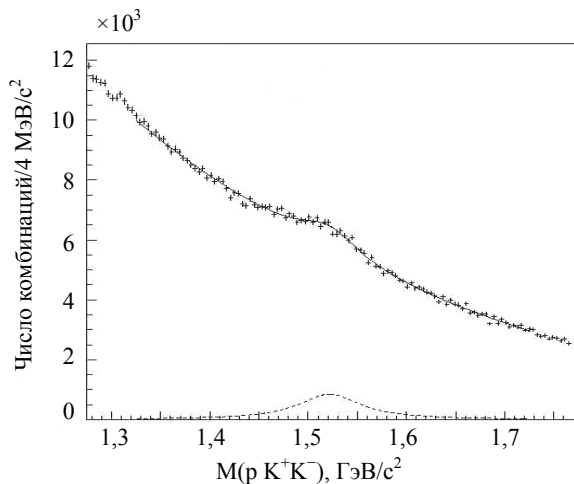


Рис. 8. Спектр эффективных масс системы  $K^+K^-$ . Сплошной линией показан результат фита, пунктирной – фон и резонансы по отдельности



а



б

Рис. 9. Спектр эффективных масс системы  $K^+K^-$  в области 1020 МэВ/с<sup>2</sup> (а) и 1525 МэВ/с<sup>2</sup> (б) (сплошной линией показан результат фита, пунктирной – резонансы в отсутствии фона)

Полученные характеристики мезонов со скрытой странностью вместе с данными PDG приведены в таблице (указаны как статистические, так и систематические погрешности).

Определено отношение выхода мезона  $f_2'(1525)$  относительно  $\phi^0(1020)$  в канале распада на  $K^+K^-$ . Оно оказалось равным

$$\frac{\sigma_{1525} \text{ЧBR}(f_2'(1525) \rightarrow K^+ K^-)}{\sigma_{1020} \text{ЧBR}(\phi^0(1020) \rightarrow K^+ K^-)} = (10,75 \pm 0,25 \pm 0,45) \%$$

Нами проведен поиск состояний в системе  $\bar{p}K^+$  на гиперонном, протонном и пионном пучках. Отчетливо виден сигнал  $\bar{\Lambda}(1520)$ . Сигналы в области 1670 и 1820 МэВ/с<sup>2</sup> сильно подавлены. Этот эффект может быть связан с периферическим (полусным) механизмом образования адронов.

## Выводы

Мы наблюдаем высоковозбужденные гиперонные состояния в реакциях  $\Sigma^- + C(\text{Cu}) \rightarrow p + K^- + X$  в области 1,52 ( $M = 1518,7 \pm 0,1 \pm 1,0$  МэВ/с<sup>2</sup>,  $\Gamma = 15,6 \pm 0,1 \pm 1,0$  МэВ/с<sup>2</sup>); 1,67 ( $M = 1672,9 \pm 0,8 \pm 1,0$  МэВ/с<sup>2</sup>,  $\Gamma = 56,6 \pm 1,6 \pm 3,0$  МэВ/с<sup>2</sup>) и 1,82 ( $M = 1809,1 \pm 1,4 \pm 1,0$  МэВ/с<sup>2</sup>,  $\Gamma = 71,6 \pm 3,6 \pm 1,4$  МэВ/с<sup>2</sup>). Сигнал вблизи 1,52 ГэВ/с<sup>2</sup> соответствует известному резонансу  $\Lambda(1520)$ . Сигналы вблизи 1,67 и 1,82 ГэВ/с<sup>2</sup> согласуются с результатами экспериментов SPHINX 2004 г. и WA89 2007 года. Наблюдаемые нами сигналы в спектре  $pK^-$  скорее всего соответствуют гиперонным состояниям с изотопическим спином 0. Впервые в спектре эффективных масс в системе  $pK^-$  обнаружен сигнал в области 2,1 ГэВ/с<sup>2</sup> ( $M = 2125 \pm 4$  МэВ/с<sup>2</sup>,  $\Gamma = 17 \pm 6$  МэВ/с<sup>2</sup>), который виден лишь при значении фейнмановской переменной  $0,6 < x_F < 0,7$ .

Измеренные параметры гиперонных состояний имеют наибольшую статистическую обеспеченность среди аналогичных экспериментальных данных, представленных в PDG.

Нами исследована зависимость наблюдаемых сигналов в системе  $pK^-$  от фейнмановской переменной  $x_F$ . Показано, что при больших значениях  $x_F$  происходит относительное увеличение сигналов над фоном. При малых значениях фейнмановской переменной  $x_F$  ( $x_F < 0,3$ ) сигнал вблизи 1520 МэВ/с<sup>2</sup> существенно уменьшается, а сигналы вблизи 1670 и 1810 МэВ/с<sup>2</sup> не наблюдаются. Данное наблюдение полностью подтверждает эффект механизма лидирования и полюсного механизма образования адронов в сильных взаимодействиях.

Проведен поиск состояний в системе  $pK^-$  на протонном и пионном пучках, а также поиск античастиц в системе  $\bar{p}K^+$  на  $\pi^-$ ,  $p$ ,  $\Sigma^-$ -пучках. Амплитуда сигналов, наблюдаемых на гиперонном пучке, в данных условиях подавлена, что также наглядно под-

тверждает механизм полюсного образования адронов и механизм лидирования.

В системе  $K^+K^-$  наблюдались сигналы в области 1020 и 1525 МэВ/ $c^2$ . Сигнал вблизи 1,02 ГэВ/ $c^2$  ( $M = 1019,9 \pm 0,1 \pm 0,4$  МэВ/ $c^2$ ,  $\Gamma = 4,32 \pm 0,09 \pm 0,16$  МэВ/ $c^2$ ), соответствует  $\phi_0(1020)$ -мезону, а в области 1,525 ГэВ/ $c^2$  ( $M = 1522 \pm 1 \pm 2$  МэВ/ $c^2$ ,  $\Gamma = 84 \pm 2 \pm 3$  МэВ/ $c^2$ ), соответствует  $f_2'(1525)$ -мезону. Число событий в сигнале  $f_2'$  составляет около 29000 и это более чем на два порядка превышает существующие мировые данные по наблюдению в спектрах эффективных масс  $f_2'$ -мезона на пучках, содержащих странные кварки. Более того, статистическая обеспеченность резонанса  $f_2'$  превосходит абсолютно все другие экспериментальные

данные представленные в PDG как минимум на порядок.

## Литература

1. Nakamura K. et al. (Particle Data Group). J. Phys. G37, 075021, 2010.
2. WA89 Collaboration, Adamovich M. I., Alexandrov Yu. A., Baranov S. P. et al. // hep-ex/070244v1 27 Feb 2007.
3. SPHINX Collaboration, Antipov Yu. M., Artamonov A. V., Batarin V. A. et al. // Eur. Phys. J. A. 2004. Vol. 21. P. 455.
4. Engelfried J. et al. The RICH detector of the SELEX experiment. Nucl. Instrum. Meth. A 433. 149, 1999.