

УДК 539.126.3

*Д.А. Иванищев, А.Е. Иванов,  
Д.О. Котов, А.С. Сафонов*

## **РОЖДЕНИЕ ЛЕГКИХ НЕЙТРАЛЬНЫХ МЕЗОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРОТОНОВ ПРИ ЭНЕРГИИ 500 ГэВ**

*D.A. Ivanishchev<sup>1</sup>, A.E. Ivanov<sup>2</sup>,  
D.O. Kotov<sup>3</sup>, A.S. Safonov<sup>4</sup>*

<sup>1,2</sup> В.Р. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute,  
Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Russia.

<sup>3,4</sup> St. Petersburg State Polytechnical University,  
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

## **LIGHT MESONS PRODUCTION IN PROTON-PROTON COLLISIONS AT 500 GeV**

---

В статье представлены результаты измерения инвариантных дифференциальных сечений рождения  $\pi^0$ -,  $\omega$ -,  $K_s^-$  и  $\phi$ -мезонов и их относительных выходов к нейтральным пионам в столкновениях протонов при энергии 500 ГэВ. Произведено сравнение результатов измерений с расчетами, выполненными в рамках квантовой хромодинамики.

**СТОЛКНОВЕНИЯ ПРОТОНОВ. МЕЗОНЫ. РОЖДЕНИЕ. ЛЕГКИЕ КВАРКИ. АНАЛИЗ.**

The result of invariant differential cross sections measurement of  $\pi^0$ -,  $\omega$ -,  $K_s^-$  и  $\phi$ -mesons in proton-proton collisions at 500 GeV is presented. The experimental results are compared with QCD calculations.

**PROTON COLLISIONS. MESONS. PRODUCTION. LIGHT QUARKS. ANALYSIS.**

---

Рождение адронов в области поперечных импульсов  $p_T > 2$  ГэВ/с в столкновениях ультрарелятивистских ядер при энергиях ускорителя РНЭС, в основном происходит в результате фрагментации жестко рассеянных партонов [1]. С увеличением поперечного импульса характерный масштаб расстояний жестких процессов уменьшается, и в области больших поперечных импульсов такие процессы можно считать точечными. При отсутствии коллективных эффектов в области больших поперечных импульсов взаимодействия ядер можно представить как суперпо-

зицию нуклон-нуклонных взаимодействий. Однако наличие коллективных эффектов меняет данное представление. Базовые знания о свойствах частиц, рождающихся в элементарных нуклон-нуклонных столкновениях, и механизмах их рождения необходимы для изучения коллективных эффектов. Результаты измерений свойств адронов в протонных столкновениях используются для проверки и подстройки теоретических расчетов в рамках квантовой хромодинамики (КХД) и построения универсальной масштабной инвариантности [2].

В данной работе представлены результаты измерения инвариантных дифференциальных сечений рождения  $\pi^0$ -,  $K_s^-$ ,  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов и их относительных выходов в столкновениях протонов при энергии  $\sqrt{S} = 500$  ГэВ в каналах распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $\omega \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$ ,  $K_s^- \rightarrow \pi^0\pi^0$  и  $\phi \rightarrow K^+K^-$  в области быстрот  $|y| < 0,35$ . Произведено сравнение результатов измерений с расчетами, выполненными в рамках КХД.

### Методика измерений

Результаты, представленные в данной работе, основаны на выборке экспериментальных данных с общей интегральной светимостью  $8 \text{ пбарн}^{-1}$ , накопленных экспериментальной установкой PHENIX [3] в 2009 году. Восстановление треков заряженных частиц и измерение их поперечных импульсов проводилось с помощью дрейфовых камер (DC) и первого слоя палочных камер (PC1). Поперечный импульс частицы определяется через измерение угла изгиба трека заряженной частицы в аксиальном магнитном поле центрального магнита, с учетом того, что частица вылетает из вершины столкновения [4]. Измерение энергии и импульса фотонов осуществляется посредством электромагнитного калориметра ECal [3].

В связи с высокой частотой протонных столкновений (до 1 МГц) использовалось несколько специализированных триггеров, позволяющих увеличить статистическую значимость редких событий. Триггер является частью системы сбора данных экспериментальной установки PHENIX. Основной функцией триггера является отбор в реальном времени столкновений по интересующим параметрам. Использовались триггеры первого уровня (МВ-триггер) и фотонный [3]. Первый из указанных включался, если срабатывал, как минимум, один кварцевый черенковский счетчик в каждом из пучковых счетчиков BBC и координата точки  $z$  столкновения ядер не превышала по модулю 30 см. Эффективность триггера первого уровня составляет  $91,0 \pm 1,1 \%$  от полного сечения неупругого ( $p + p$ )-взаимодействия, равного  $32,5 \pm 3,2$  мбарн при энергии 500 ГэВ. Фотонный триггер организован на

основе электромагнитного калориметра и срабатывает при регистрации  $\gamma$ -кластера с энергией, превышающей 3,7 ГэВ.

Инвариантное дифференциальное сечение рождения мезона в каждом интервале по поперечному импульсу вычисляется как

$$\frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2\sigma}{dp_T dy} = \frac{1}{2\pi p_T} \frac{1}{L \text{Вг}} \frac{1}{\epsilon(p_T) \epsilon_{BBC}} \frac{N(\Delta p_T)}{\Delta p_T \Delta y},$$

где  $p_T$  – поперечный импульс мезона;  $\Delta p_T$  – интервал по поперечному импульсу;  $y$  – быстрота;  $N(\Delta p_T)$  – число мезонов, зарегистрированных экспериментальной установкой (выход мезонов);  $L$  – интегральная светимость, полученная с использованием триггера первого уровня;  $\epsilon(p_T)$  – функция коррекции, учитывающая геометрический акцептанс, разрешение, эффективность работы детекторных подсистем экспериментальной установки PHENIX;  $\text{Вг}$  – вероятность распада мезона по исследуемому каналу;  $\epsilon_{BBC}$  – эффективность триггера первого уровня.

При анализе данных, накопленных с помощью фотонного триггера, эффективность фотонного триггера учитывалась как множитель в функции  $\epsilon(p_T)$ .

Определение выходов мезонов и расчет функций коррекций осуществлялся аналогично методикам, описанным в работах [3 – 6]. Анализировались выборки данных, накопленные с применением  $\gamma$ -триггера (для  $\pi^0$ -мезонов в области  $p_T < 4$  ГэВ/с и  $K_s^-$ ,  $\omega$ -мезонов) и без него (для  $\pi^0$ -мезонов в области  $p_T > 4$  ГэВ/с и  $\phi$ -мезонов). Кандидаты в нейтральные мезоны были восстановлены из пар кластеров, зарегистрированных электромагнитным калориметром, с энергией  $E_\gamma > 0,2$  ГэВ, в предположении, что они соответствуют фотонам, пришедшим из вершины столкновения. Отбирались пары фотонов, энергии фотонов которых  $E1$  и  $E2$  удовлетворяли неравенству

$$\frac{|E2 - E1|}{E1 + E2} < 0,8.$$

Положения и значения ширины пиков, соответствующих распаду  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ , в спектре восстановленной инвариантной массы пары фотонов были измерены и параметризованы как функция поперечного им-

пульса пары фотонов  $p_T^{\gamma\gamma}$ . Ширина пиков, в основном, определяется энергетическим разрешением электромагнитного калориметра. Ширина уменьшается с 12 до 9 МэВ/c<sup>2</sup> в области поперечных импульсов пары фотонов

$$1 < p_T^{\gamma\gamma} \text{ (ГэВ/c)} < 4,$$

затем в области поперечных импульсов  $p_T^{\gamma\gamma} > 4$  ГэВ/c ширина монотонно возрастает. Для дальнейшего анализа характеристик частиц, в распаде которых имеется  $\pi^0$ -мезон, были выбраны пары фотонов с  $p_T^{\gamma\gamma} > 1$  ГэВ/c и значением инвариантной массы, находящейся в пределах двух стандартных отклонений от измеренного положения пика. Всем фотонным парам, которые удовлетворяют указанным выше критериям, была присвоена табличная масса нейтрального пиона, а энергии фотонов пары были масштабированы на отношение значения табличной массы к измеренному значению массы пары фотонов.

Восстановление пиков от распада  $K_s^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$  было выполнено комбинированием отобранных пар фотонов в пределах одного события. Комбинации, использовавшие одни и те же кластеры электромагнитного калориметра более одного раза, были откинута.

Для определения основных характеристик  $\omega \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$ , отобранные пары фотонов были объединены со всеми парами разнозаряженных частиц в том же событии. Заряженные частицы, которые использовались в анализе, должны были иметь поперечные импульсы в диапазоне

$$0,2 < p_T \text{ (ГэВ/c)} < 8,$$

и им были присвоены массы заряженных пионов. Заряженные частицы с поперечным импульсом меньше 0,2 ГэВ/c не долетают до центральных спектрометров экспериментальной установки PHENIX из-за того, что их угол изгиба в аксиальном поле центрального магнита имеет большое значение. Частицы, которые зарегистрированы с импульсом больше 8 ГэВ/c, в своей основе являются вторичными частицами, рождающимися из распадов долгоживущих частиц. Их импульс рассчитывается некор-

ректно из-за того, что они рождаются не в вершине столкновения ядер и их истинный импульс меньше зарегистрированного.

Восстановление распада  $\phi \rightarrow K^+K^-$  было выполнено при помощи объединения в пары всех разнозаряженных адронов в диапазоне поперечных импульсов

$$0,3 < p_T \text{ (ГэВ/c)} < 8,0.$$

Каждому треку присваивалась масса заряженного каона.

Примеры спектров восстановленной инвариантной массы  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $\omega \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$ ,  $K_s^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$  и  $\phi \rightarrow K^+K^-$  для различных интервалов по поперечному импульсу показаны на рис. 1. Значения ширины пиков  $\omega$ -,  $K_s^0$ - и  $\phi$ -мезонов составляют около 17, 15 и 13 МэВ/c<sup>2</sup> и имеют слабо выраженную зависимость от поперечного импульса.

Для определения выходов  $\pi^0$ -,  $\omega$ -,  $K_s^0$ - и  $\phi$ -мезонов спектры восстановленной инвариантной массы пар фотонов, триплета пионов, пар нейтральных пионов и пар разнозаряженных каонов около каждого пика были аппроксимированы функцией, которая учитывает форму сигнала и фона.

Для описания формы сигнала использовались свертка функции Брейта–Вигнера и Гауссовой функции. Первая функция описывает естественную форму измеренного резонанса, а вторая учитывает вклад разрешения детектора. В зависимости от исследуемого канала распада может преобладать первое или второе распределение, например, Гауссова функция играет большую роль в таких распадах, как  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $\omega \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$  и  $K_s^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ , а функция Брейта–Вигнера – в распаде  $\phi \rightarrow K^+K^-$ . Фоновая подложка аппроксимировалась полиномом второй степени.

Систематическая ошибка, связанная с измерением выходов мезонов, вносит основной вклад в общую систематическую неопределенность измерений. Методика ее оценки подробно описана в работе [7]. Она заключается в использовании различных критериев отбора для определения выходов легких мезонов и последующем сравнении полученного набора результатов. Величины данной неопределенности представлены в таблице.

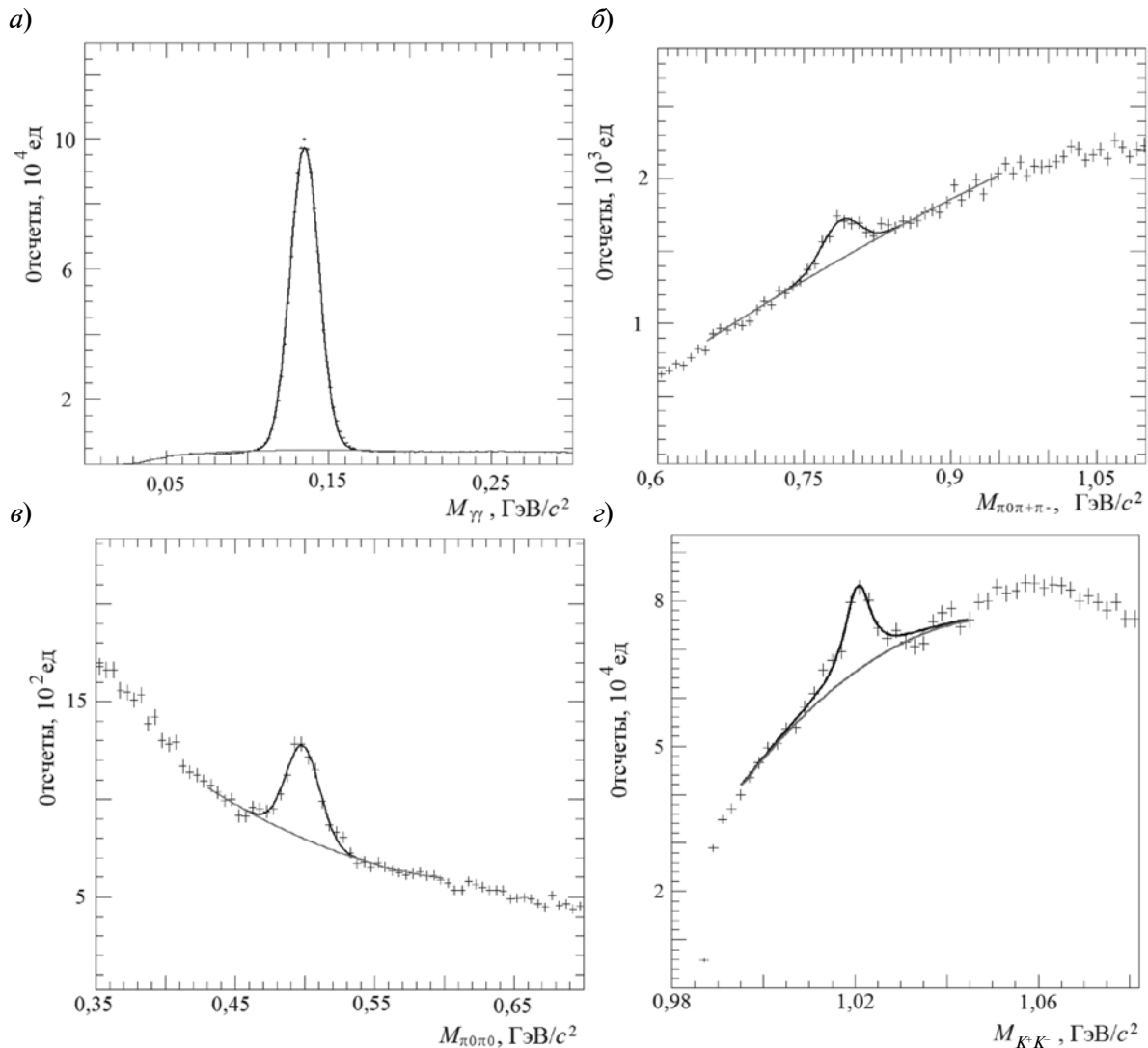


Рис. 1. Спектры инвариантной массы  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  (а),  $\omega \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$  (б),  $K_s \rightarrow \pi^0\pi^0$  (в) и  $\phi \rightarrow K^+K^-$  (з).

Спектры восстановлены в интервалах по поперечному импульсу, ГэВ/c:

5 – 6 (а), 6 – 7 (б, в) и 2,7 – 3,2 (з).

Сплошные линии – результаты аппроксимации фоновой подложки полиномом второй степени, а сигнала – сверткой функции Брейта–Вигнера с Гауссовой функцией

Для определения функций коррекций проводились модельные расчеты методом Монте-Карло взаимодействия продуктов распада исследуемых мезонов с экспериментальной установкой PHENIX. Мезоны равномерно генерировались в области быстрот  $|y| < 0,5$  и в полном азимутальном угле. Выбранные диапазоны распределений поперечного импульса и количество мезонов позволяют обеспечить статистическую точность порядка 1 – 3 % для всех проводимых исследований. Для расчета

эффективности регистрации мезонов к сгенерированным спектрам была применена нормировка, позволяющая получить совпадение с измеренными спектрами частиц. Эта процедура повторялась многократно. Для описания кинематики трехчастотного распада  $\omega$ -мезона использовались экспериментально измеренные распределения плотности фазового пространства [7]. Полученные в ходе модельного расчета положения и ширины пиков  $\pi^0$ -,  $K_s$ -,  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов в спектрах инвариантных

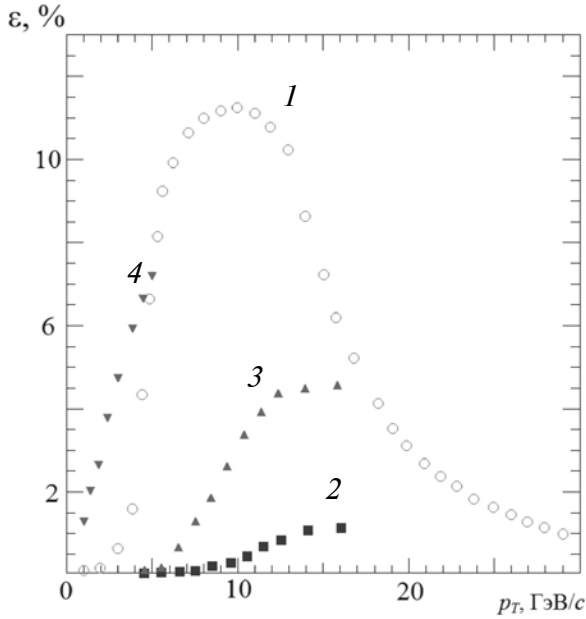


Рис. 2. Функции коррекции, рассчитанные для каналов распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  (1),  $\omega \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$  (2),  $K_s \rightarrow \pi^0\pi^0$  (3) и  $\phi \rightarrow K^+K^-$  (4)

масс  $\gamma\gamma$ ,  $\pi^0\pi^+\pi^-$ ,  $\pi^0\pi^0$  и  $K^+K^-$  согласуются со значениями, найденными из экспериментальных данных, для всего диапазона поперечных импульсов. При анализе экспериментальных данных и выполнении

модельного расчета использовался один и тот же программный код.

Функции коррекции, вычисленные для  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $\omega \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$ ,  $K_s \rightarrow \pi^0\pi^0$  и  $\phi \rightarrow K^+K^-$  показаны на рис. 2. При построении всех кривых учтены геометрия детектора, кинематика распадов частиц, работа детекторных подсистем (включая идентификацию частиц) и критерии отбора частиц. При вычислении функций коррекций для  $\pi^0$ -,  $\omega$ -,  $K_s$ -мезонов также учтена эффективность фотонного триггера. Функции коррекции сильно зависят от поперечного импульса частицы и быстро уменьшаются в области малых поперечных импульсов для всех типов частиц, описанных в данной статье. Уменьшение значений функции коррекции для  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  в области  $p_T > 12$  ГэВ/с обусловлено ограниченным пространственным разрешением электромагнитного калориметра. С ростом поперечного импульса нейтральных пионов уменьшается угол разлета фотонов их распада. Пара фотонов от распадов таких пионов регистрируется электромагнитным калориметром как  $\gamma$ -квант с энергией, равной сумме энергий двух фотонов, и разделить два  $\gamma$ -кванта не представляется возможным.

**Систематические ошибки измерения (в процентах) инвариантных дифференциальных сечений рождения  $\pi^0$ -,  $\omega$ -,  $K_s$ - и  $\phi$ -мезонов**

Измеряемая величина	$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	$\omega \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$	$K_s \rightarrow \pi^0\pi^0$	$\phi \rightarrow K^+K^-$	Тип
Геометрия калориметра	4	4	8	—	В
Геометрия DC	—	2	—	3	В
Пространств. разрешение	1 – 25	—	—	—	В
Энергетическое разрешение	3 – 11	2 – 5	4 – 5	—	В
Энергетическая шкала	2 – 7	3 – 6	4	0,5 – 5	В
Отбор $\pi^0$ -мезонов	—	3	6 – 12	—	В
Эффективность $\gamma$ -триггера	3 – 10	4 – 10	3 – 11	—	В
Выход (модельный расчет)	1	2	2	3	В
Конверсия $\gamma$ -квантов	1,5	3	6	—	С
Вероятность распада	—	0,8	0,2	—	С
МВ-триггер	10				С
Выход (данные эксперимента)	2 – 5	7 – 17	9 – 18	12 – 26	А
Суммарная ошибка	12 – 29	16 – 23	18 – 27	16 – 29	—

Для оценки систематических ошибок, связанных с точностью расчета функций коррекций, варьировались как критерии отбора частиц, так и энергетическое, пространственное и импульсное разрешения калориметра и трековой системы экспериментальной установки PHENIX. Результирующие систематические ошибки сведены в таблице. Неопределенности разбиты на три типа: А – не зависящие от поперечного импульса; В – зависящие от поперечного импульса, но форма зависимости неизвестна; С – связанные с неопределенностью нормировки спектров.

Для построения относительных выходов  $\omega$ -,  $K_s$ - и  $\phi$ -мезонов к нейтральным пионам ( $\omega/\pi^0$ ,  $K_s/\pi^0$  и  $\phi/\pi^0$ ) инвариантное дифференциальное сечение рождения  $\pi^0$ -мезонов было аппроксимировано следующей функциональной зависимостью [8]:

$$f(p_T) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{p_T-t}{w}}} \frac{A}{\left(1 + \frac{p_T}{p_0}\right)^m} + \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\frac{p_T-t}{w}}}\right) \frac{B}{p_T^n},$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $p_0$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $t$ ,  $w$  – свободные параметры.

Были получены следующие значения параметров:  $A = 139,5$  мбарн·ГэВ<sup>-2</sup>с<sup>3</sup>;  $B = 17,2$  мбарн·ГэВ<sup>-2</sup>с<sup>3</sup>;  $p_0 = 1,7$  ГэВ/с;  $m = 10,1$ ;  $n = 7,4$ ;  $t = 5,1$  ГэВ/с;  $w = 0,002$  ГэВ/с.

Относительные выходы были рассчитаны как отношение инвариантных дифференциальных сечений рождения  $\omega$ -,  $K_s$ - и  $\phi$ -мезонов к результату аппроксимации.

### Результаты измерений

Результаты измерения инвариантных дифференциальных сечений рождения  $\pi^0$ -,  $\omega$ -,  $K_s$ - и  $\phi$ -мезонов в столкновениях протонов при энергии  $\sqrt{S} = 500$  ГэВ показаны на рис. 3. Измерения выполнены в области быстрот  $|\eta| < 0,35$  в диапазоне поперечных импульсов от 1 до 30 ГэВ/с. В области больших поперечных импульсов диапазон измерений ограничен размером выборки накопленных экспериментальных данных, а в области малых поперечных импульсов – акцептансом экспериментальной установки PHENIX. Сплошными кривыми на рисунке обозначены результаты КХД-расчета

инвариантных дифференциальных сечений рождения  $\pi^0$ -, и  $K_s$ -мезонов, произведенного во втором порядке приближения теории возмущений, для масштабов факторизации  $\mu = p_T/2$ ,  $p_T$  и  $2p_T$ . При расчете использовались функции фрагментации и функции распределения партонов в сталкивающихся нуклонах, опубликованные в работах [9, 10]. Результаты расчета хорошо описывают экспериментальные данные.

На рис. 4 представлены зависимости относительных выходов  $\omega/\pi^0$ ,  $K_s/\pi^0$  и  $\phi/\pi^0$  от поперечного импульса. Измерения произведены в  $(p + p)$ -столкновениях при энергии  $\sqrt{S} = 500$  ГэВ. В области поперечных импульсов больше 3 ГэВ/с относительные выходы практически не зависят от поперечного импульса. Аппроксимация относительных выходов константой в области поперечных импульсов  $p_T > 3$  ГэВ/с дает следующие значения:  $\omega/\pi^0 = 0,79 \pm$

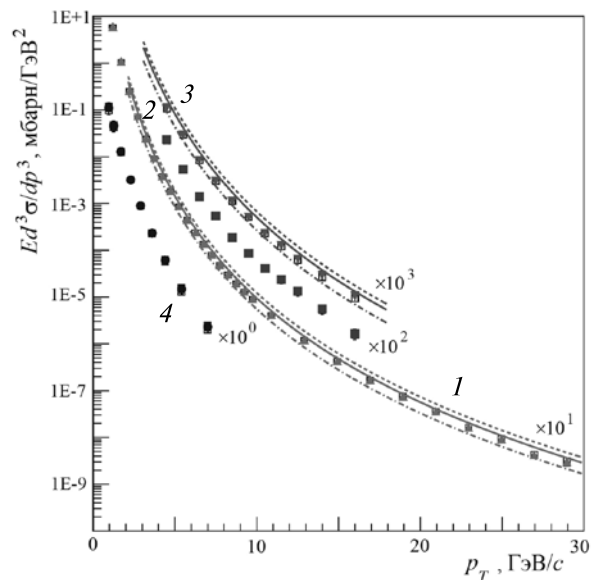


Рис. 3. Инвариантные дифференциальные сечения рождения  $\pi^0$ - (1),  $\omega$ - (2),  $K_s$ - (3) и  $\phi$ - (4) мезонов в столкновениях протонов при энергии  $\sqrt{S} = 500$  ГэВ.

Вертикальные «усы» и прямоугольники вокруг символов соответствуют статистическим и систематическим ошибкам измерений. Линии – результаты КХД-расчета инвариантных дифференциальных сечений рождения  $\pi^0$ - и  $K_s$ -мезонов, выполненных для масштабов факторизации  $\mu = p_T/2$  (точка-пунктир),  $p_T$  (сплошная) и  $2p_T$  (пунктир). Систематическая ошибка определения эффективности триггера первого уровня, равная 10 %, не показана

$\pm 0,03$  (стат.)  $\pm 0,08$  (сист.);  $K_s/\pi^0 = 0,45 \pm \pm 0,01$  (стат.)  $\pm 0,05$  (сист.);  $\phi/\pi^0 = 0,20 \pm \pm 0,02$  (стат.)  $\pm 0,04$  (сист.). В пределах ошибок измерений полученные значения совпадают со значениями относительных выходов, измеренных ранее при более низких энергиях [8]. Также на рис. 4. Показаны результаты КХД-расчетов относительных выходов  $\omega/\pi^0$  и  $\phi/\pi^0$ , выполненных с помощью программы моделирования процессов столкновения элементарных частиц РУТНИА [11]. Результаты расчетов не достаточно точно описывают экспериментальные данные, что свидетельствует о несоответствии параметров модели экспериментальным наблюдениям.

В настоящей статье представлены результаты измерения инвариантных дифференциальных сечений рождения  $\pi^0$ -,  $\omega$ -,  $K_s$ - и  $\phi$ -мезонов и их относительных выходов к нейтральным пионам  $\omega/\pi^0$ ,  $K_s/\pi^0$  и  $\phi/\pi^0$  в столкновениях протонов при энергии  $\sqrt{S} = 500$  ГэВ. Измерения охватывают широкую область поперечных импульсов от 1 до 30 ГэВ/с в области быстрот  $|y| < 0,35$ . Относительные выходы  $\omega$ -,  $K_s$ - и  $\phi$ -мезонов к нейтральным пионам в области поперечных импульсов больше 3 ГэВ/с имеют следующие значения:  $\omega/\pi^0 = 0,79 \pm 0,03$  (стат.)  $\pm \pm 0,08$  (сист.);  $K_s/\pi^0 = 0,45 \pm 0,01$  (стат.)  $\pm \pm 0,05$  (сист.);  $\phi/\pi^0 = 0,20 \pm 0,02$  (стат.)  $\pm \pm 0,04$  (сист.). Полученные значения совпадают со значениями относительных выходов, измеренных при более низких энергиях в лабораториях FNAL, CERN и BNL. Расчеты, выполненные в рамках квантовой хромодинамики, описывают представленные в работе экспериментальные данные.

Результаты, полученные в настоящей статье, вносят важный вклад в проверку квантовохромодинамических предсказаний рождения частиц в ядро-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях. Систематическое измерение выходов легких векторных

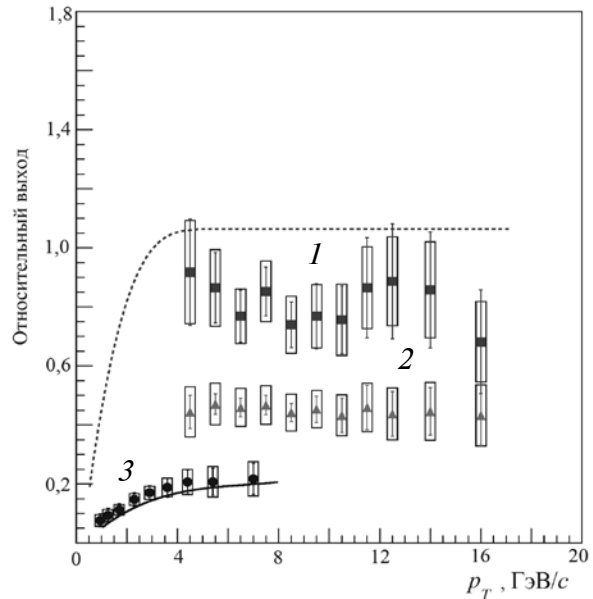


Рис. 4. Зависимости относительных выходов  $\omega/\pi^0$  (1),  $K_s/\pi^0$  (2) и  $\phi/\pi^0$  (3) от поперечного импульса, измеренные в  $(p + p)$ -столкновениях при энергии  $\sqrt{S} = 500$  ГэВ.

Вертикальные «усы» и прямоугольники вокруг символов соответствуют статистическим и систематическим ошибкам измерений. Линии – результаты КХД-расчетов относительных выходов  $\omega/\pi^0$  (пунктир) и  $\phi/\pi^0$  (сплошная), выполненных с помощью программы моделирования процессов столкновения элементарных частиц РУТНИА

мезонов в протон-протонных взаимодействиях при энергии 500 ГэВ также может обнаружить универсальную масштабную инвариантность, которая была отмечена при систематическом изучении рождения мезонов в протон-протонных взаимодействиях при более низких энергиях. Основываясь на статистическом распределении Тсалисса [2], будет возможно с высокой точностью предсказывать выходы частиц в ядро-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях. Полученные результаты послужат заделом для подобного исследования.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 12-02-31362 мол\_а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adcox, K. Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration [Text] / K. Adcox, Y. Berdnikov, V. Sam-

sonov [et al.] // Nucl. Phys. A. – 2005. – Vol. 757. – P. 184–283.

2. Бердников, Я.А. Дифференциальные сечения рождения  $\pi$ ,  $K$ ,  $\eta$ ,  $\omega$ ,  $\eta'$ ,  $\phi$ -мезонов в  $p + p$

взаимодействиях при энергии  $\sqrt{S} = 200$  ГэВ [Текст] / Я.А. Бердников, Д.А. Иванищев, Д.О. Котов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2008. – № 6(67). – С. 65–70.

3. **Бердников, Я.А.** Рождение короткоживущих нейтральных каонов в столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии 200 ГэВ [Текст] / Я.А. Бердников, Д.А. Иванищев, Д.О. Котов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2011. – № 3(129). – С. 134–139.

4. **Бердников, Я.А.** Рождение  $\phi$ -мезонов в столкновениях ядер меди при энергии 200 ГэВ [Текст] / Я.А. Бердников, Д.А. Иванищев, Д.О. Котов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – № 4(88). – С. 57–62.

5. **Бердников, А.Я.** Подавление выхода короткоживущих нейтральных каонов в центральных столкновениях ядер золота при энергии 200 ГэВ [Текст] / А.Я. Бердников, Д.А. Иванищев, В.М. Самсонов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2011. – № 2(122). – С. 111–116.

6. **Бердников, Я.А.** Рождение короткоживущих нейтральных каонов в столкновениях ядер меди при энергии 200 ГэВ [Текст] / Я.А. Бердни-

ков, Д.А. Иванищев, В.М. Самсонов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2011. – № 2(122). – С. 116 – 121.

7. **Adare, A.** Production of  $\omega$  mesons in  $p + p$ ,  $d + Au$ ,  $Cu + Cu$ , and  $Au + Au$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV [Text] / A. Adare, D. Ivanishchev, V. Samsonov [et al.] // Phys. Rev. C. – 2011. – Vol. 84. – P. 044902 (1–11).

8. **Бердников, Я.А.** Отношение выходов легких мезонов в  $(p + p)$ -столкновениях при энергии  $\sqrt{S} = 200$  ГэВ [Текст] / Я.А. Бердников, Д.А. Иванищев, В.М. Самсонов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2008. – № 6(67). – С. 70–73.

9. **Florian, D.** Global analysis of fragmentation functions for pions and kaons and their uncertainties [Text] / D. Florian, R. Sassot // Phys. Rev. D. – 2007. – Vol. 75. – P. 114010 (1–29).

10. **Pumplin, J.** New generation of parton distributions with uncertainties from global QCD analysis [Text] / J. Pumplin, D. Robert, S.J. Huston [et al.] // JHEP. – 2002. – Vol. 2002. – P. 0207:012.

11. **Sjostrand, T.** PYTHIA 6.2 physics and manual [Text] / T. Sjostrand, L. Lonnblad, S. Mrenna // Preprint arXiv:hep-ph/0108264. – 2001. – P. 1–425.

---

**ИВАНИЩЕВ Дмитрий Александрович** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории релятивистской ядерной физики отделения физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова.

188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща, ФГБУ «ПИАЯФ»  
ivanishchev@gmail.com

**ИВАНОВ Алексей Евгеньевич** – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории физики элементарных частиц отделения физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова.

188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща, ФГБУ «ПИАЯФ»  
ivanovae@pnpi.spb.ru

**КОТОВ Дмитрий Олегович** – кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
dm\_kotov@phmf.spbstu.ru

**САФОНОВ Алексей Сергеевич** – аспирант кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
asafonov.spbstu@gmail.com