

# Наблюдение эффекта независимости $p/\pi$ отношения от размера ядра для адронов, выбитых из мишени с большими поперечными импульсами в $pA$ взаимодействиях при энергии 50 ГэВ

Н. Н. Антонов<sup>+</sup>, А. А. Балдин<sup>\*</sup>, В. А. Виктор<sup>+</sup>, А. С. Галоян<sup>\*</sup>, В. А. Гапиенко<sup>+1)</sup>, Г. С. Гапиенко<sup>+</sup>, В. Н. Гресь<sup>+</sup>, М. А. Илюшин<sup>+</sup>, А. И. Мысник<sup>+</sup>, А. Ф. Прудкогляд<sup>+</sup>, Д. С. Пряников<sup>+</sup>, В. А. Романовский<sup>+</sup>, А. А. Семак<sup>+</sup>, В. И. Терехов<sup>+</sup>, В. Я. Углеков<sup>+</sup>, М. Н. Уханов<sup>+</sup>, С. С. Шиманский<sup>\*</sup>

<sup>+</sup> НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ, 142281 Протвино, Россия

<sup>\*</sup> Объединенный Институт Ядерных Исследований, 141980 Дубна, Россия

Поступила в редакцию 19 октября 2018 г.

После переработки 1 ноября 2018 г.

При сравнении выходов кумулятивных протонов и  $\pi^\pm$ -мезонов, рожденных под углом  $40^\circ$  (лаб. сист.) во взаимодействиях протонного пучка с ядром углерода и с более тяжелыми ядрами, найдено ослабление влияния ядра на выходы частиц с большими поперечными импульсами. Работа выполнена в рамках эксперимента СПИН при использовании пучка, выведенного из ускорителя У70 (ИФВЭ, Протвино).

DOI: 10.1134/S0370274X18240025

Цель проводимых в эксперименте СПИН исследований состоит в том, чтобы изучая спектры и состав вторичных частиц, рожденных с большими поперечными импульсами ( $p_T > 1$  ГэВ/с) в так называемой кумулятивной области, получить информацию как о механизме образования таких частиц, так и о структуре барионной материи ядра. Кумулятивной областью называется область импульсов, запрещенных по кинематике для взаимодействий на свободных нуклонах. Частицы, образованные во взаимодействиях с ядрами в кумулятивной части спектра, принято называть кумулятивными.

Согласно теоретическим оценкам [1], основной вклад в кинематическую область, которую изучает эксперимент СПИН, дают жесткие взаимодействия с многонуклонными конфигурациями в ядре. В ранее опубликованных работах [2–5] эксперимента содержатся данные по рождению  $\pi^\pm$ ,  $p$  и легких ядерных фрагментов  $d$  и  $t$  с большими  $p_T$  под углом  $35^\circ$  (лаб. сист.) во взаимодействиях протонов с импульсом 50 ГэВ/с с тонкими ядерными мишенями C, Al, Cu и W. В публикациях [2, 3] впервые представлены данные по наблюдению кумулятивных частиц с поперечными импульсами выше 2 ГэВ/с. Там же можно найти схему установки и детали эксперимента. Проведенный анализ [4, 5] спектров кумулятивных легких ядерных фрагментов ( $d, t$ ) привел к выводу, что в исследуемой кинематической области регистриру-

ется прямое выбивание из ядра дейтронов и тритонов.

В области энергии ( $\sqrt{s} \sim 10$  ГэВ), где работает установка СПИН, имеются полученные [6] в эксперименте ФОДС (Фокусирующий Двухплечевой Спектрометр) (ИФВЭ, Протвино) данные по рождению  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $p$  и  $\bar{p}$  с поперечными импульсами в интервале от 1 до 4.65 ГэВ/с при взаимодействии протонов с ядрами C, Al, Cu, Sn и Pb. Измерения ФОДС проводились при энергии пучка 70 ГэВ и при угле вылета вторичных частиц, соответствующем  $90^\circ$  в системе центра масс (с.ц.м.) сталкивающихся нуклонов. Для более высокого импульса пучка, 300–400 ГэВ/с, рождение заряженных адронов с большими  $p_T$  под углом  $\sim 90^\circ$  (с.ц.м.) в  $pA$  взаимодействиях было изучено [7, 8] во ФНАЛ.

Целью этой работы было оценить вклад вторичных взаимодействий путем сравнения соотношений между протонами и  $\pi$ -мезонами на выходе из разных ядер. Проведение измерений было инициировано наблюдением нами ранее [3] интересного факта для кумулятивных частиц, рожденных под углом  $35^\circ$  (лаб. сист.) в  $pA$  взаимодействиях. Оказалось, что отношение выходов заряженных частиц с разным знаком,  $h^+/h^-$ , измеренное при  $p_T > 2$  ГэВ/с, слабо зависит от атомного номера ядра, становясь практически одинаковым для вольфрама и алюминия. В настоящей работе использовались спектры протонов и  $\pi$ -мезонов, рожденных под углом  $40^\circ$  (лаб. сист.) по отношению к пучку в протон-ядерных столкновени-

<sup>1)</sup> e-mail: Vladimir.Gapienko@ihep.ru

ях при начальной энергии 50 ГэВ. Угол вылета частиц соответствует  $\sim 150^\circ$  в системе центра масс налетающего протона и покоящегося нуклона ядра. Были использованы те же тонкие мишени (C, Al, Cu, W), что и в предыдущих наших работах [2–5].

Измеренные для угла  $40^\circ$  импульсные спектры заряженных  $\pi$ -мезонов и протонов выглядят качественно похожими для всех 4-х мишеней. На рисунке 1 в виде точек приведены спектры отрицательных и положительных  $\pi$ -мезонов и протонов для самой легкой из использованных мишеней (углерод, левая половина) и для самой тяжелой (вольфрам, правая часть). Для ядер Al и Cu спектры выглядят подобно тому, как это представлено на рис. 1 для C и W. Для всех мишеней выход протонов при больших импульсах становится примерно в 20 раз больше, чем выход  $\pi$ -мезонов. Вертикальные линии на обеих половинках рис. 1 показывают кинематический предел для нуклонов в случае взаимодействия протона на свободном нуклоне. *Напомним, что особенностью представляемых результатов является то, что выход частиц измеряется как в предкумулятивной, так и в кумулятивной областях кинематики.*

Кривые на рисунке 1 представляют расчеты сечений с помощью Fritiof струнной фрагментационной моделью (FTFP), которая в настоящее время является одним из базовых генераторов в Geant4 [9] для моделирования адрон/ион взаимодействий с ядрами. Эта модель выбрана потому, что в [10] была продемонстрирована ее способность описать рождение адронов в широком диапазоне углов ( $0$ – $420$  мрад) в  $pC$  взаимодействиях при близкой к нам энергии. Из рисунка 1 видно, что спектры протонов описываются моделью удовлетворительно для  $pC$  взаимодействий. Для  $pW$  взаимодействий спектры протонов воспроизводятся моделью для импульсов более 3 ГэВ/с, однако выход медленных протонов недооценен. Как для  $pC$  так и для  $pW$ , модель FTFP переоценивает множественности быстрых  $\pi$ -мезонов.

При анализе влияния ядерной материи на какую-нибудь характеристику обычно сравнивают  $pp$  и  $pA$  взаимодействия. В нашем случае импульсный спектр простирается в кумулятивную область, недоступную для  $pp$  столкновений, поэтому в этой работе проводится сравнение процессов на более тяжелых ядрах по отношению к процессам на ядре углерода. Влияние ядерной материи на относительный выход протонов и пионов было оценено через двойное отношение  $R = (p/\pi)_A / (p/\pi)_C$ , где индексами C и A обозначены принадлежность величины  $p/\pi$  к ядру углерода и к более тяжелому ядру соответственно.

На рисунке 2 приведены величины  $R$ , измеренные для пар ядер Al/C, Cu/C и W/C при разных значениях  $p_T$ . Для построения этого рисунка использовались  $p/\pi^+$ -отношения. В области малых импульсов оказывается, что чем больше разница между массой углерода и массой более тяжелого ядра, тем больше величина  $R$ , а значит, тем выше доля протонов среди частиц, покидающих более тяжелое ядро. Однако, в области больших импульсов значение  $R$  стремится к единице для всех рассмотренных пар ядер, что указывает на проявление эффекта ослабления зависимости  $p/\pi$  от размеров ядра.

На рисунке 2 экспериментальные данные приведены со статистическими ошибками. Уровень возможной систематической погрешности в определении величин  $R$  при разных значениях поперечного импульса отражает ширина серой полосы в нижней части рисунка. Систематическая ошибка связана, в основном, с неточностью восстановления инвариантных сечений из сырых экспериментальных данных. Кроме того, в области больших импульсов начинает сказываться вероятность неправильной идентификации частиц.

Протоны и  $\pi^+$  мезоны в эксперименте СПИН регистрируются в одной и той же серии измерений, при одних и тех же условиях. Данные по рождению отрицательно заряженных частиц набираются в другой серии измерений. Для исключения возможной систематической погрешности, связанной с разницей в условиях измерения положительно и отрицательно заряженных частиц, для данных на рис. 2 брались только  $p/\pi^+$  величины. Чтобы показать, что замена  $\pi^+$  на  $\pi^-$  ничего принципиально не меняет, на рис. 3 для пары W/C показаны величины  $R$ , полученные с использованием как  $p/\pi^+$ , так и  $p/\pi^-$  отношений.

В виде кривой на рис. 3 показан результат расчетов W/C отношения с помощью FTFP модели. Рисунок 3 указывает на явную неспособность модели описать поведение экспериментальных данных.

Из данных работы [6] ФОДС возможно посчитать величины  $(p/\pi^+)_{Cu} / (p/\pi^+)_C$  для разных значений  $p_T$ . Получаются значения  $Cu/C \approx 1.2$  при отсутствии какой-либо явной зависимости от поперечного импульса в интервале 1–4 ГэВ/с, что отличается от поведения  $Cu/C$  на рис. 2. Другой тип поведения  $R$  наблюдается в работах [7, 8], где исследовалось рождение адронов в  $pA$  взаимодействиях при  $\sqrt{s} \approx 27.4$  ГэВ. Если построить двойное отношение, используя данные для вольфрама и бериллия,  $R = (p/\pi^+)_{W} / (p/\pi^+)_{Be}$ , то величина  $R$  при росте  $p_T$  от  $\sim 0.8$  до 6 ГэВ/с, растет от значения  $\sim 1.3$  до 2.0, что не соответствует поведению двойных отношений

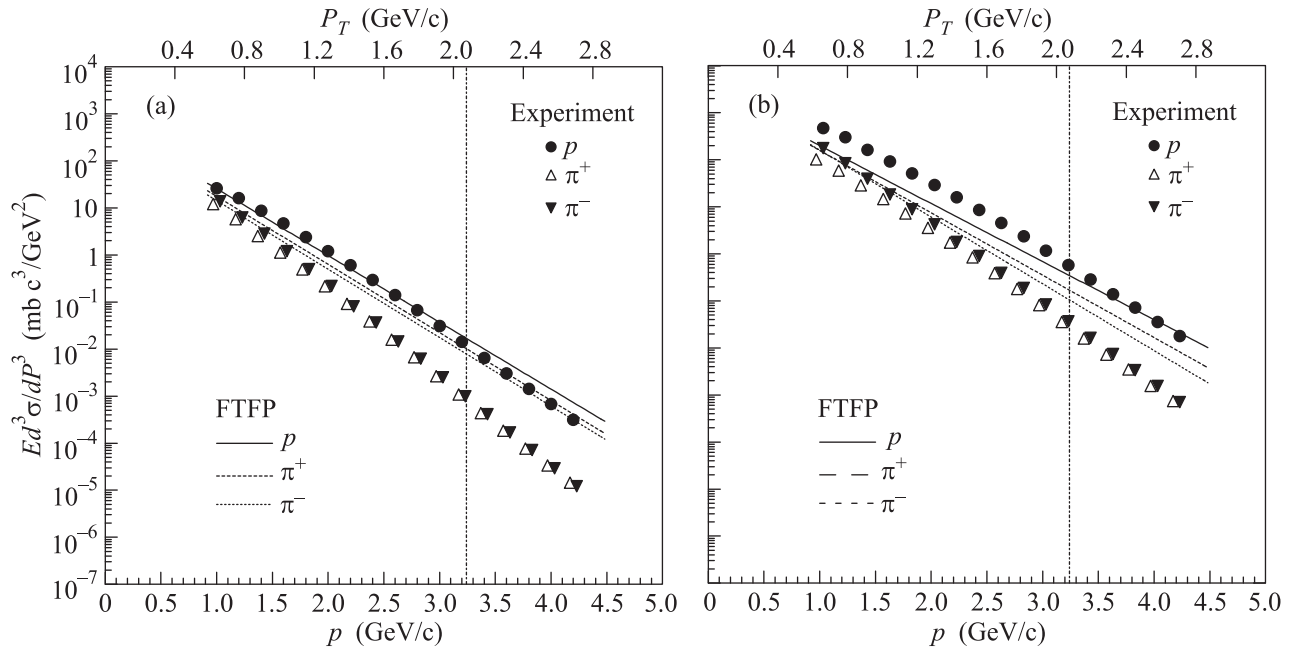


Рис. 1. Импульсные спектры заряженных  $\pi$ -мезонов и протонов, вылетающих под углом  $40^\circ$  (лаб. сист.) из углеродной (левая половина) и из вольфрамовой (справа) мишеней. Вертикальные линии указывают кинематический предел для нуклонов в случае упругого нуклон-нуклонного рассеяния. На верхней шкале приведены значения поперечного импульса. Расчеты сечений с помощью FTFP модели даны в виде кривых

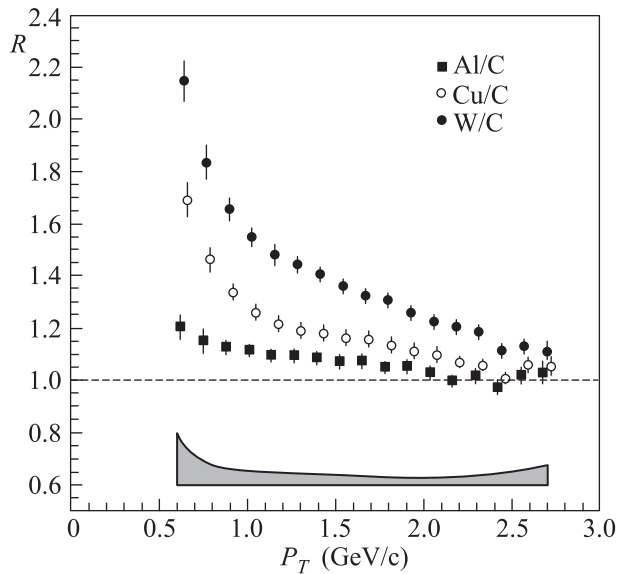


Рис. 2. Величина  $R$  в зависимости от поперечного импульса при сравнении углеродной мишени с мишенями из алюминия, меди и вольфрама. Ширина серой полосы внизу рисунка соответствует возможной систематической погрешности при разных  $p_T$

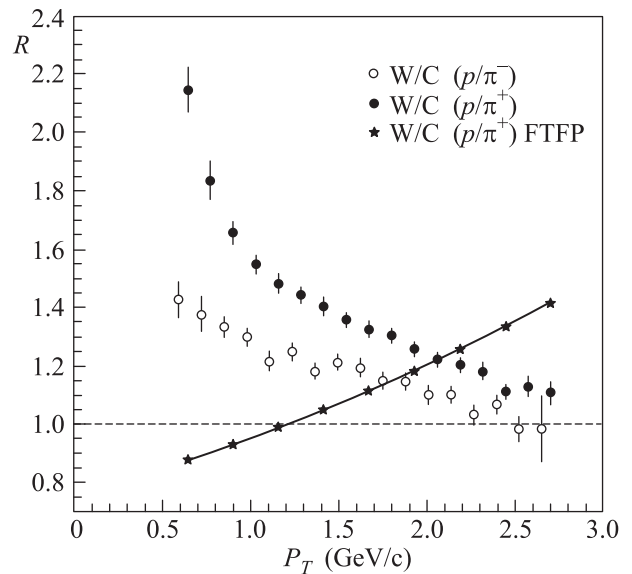


Рис. 3. Величины  $R$  для пары W/C при использовании положительно и отрицательно заряженных  $\pi$ -мезонов. В виде кривой на рисунке показан расчет с помощью FTFP модели

$R$  на рис. 2. Отметим, что данные работ [6–8] получены в кинематической части протон-нуклонного столкновения без перехода в кумулятивную область.

**Основные выводы.** Поведение отношения  $p/\pi^+$ , измеренного в настоящей работе для разных ядер как функция  $p_T$ , отличается от поведения  $p/\pi^+$  величин, полученных для рождения частиц

с большими поперечными импульсами под углом  $90^\circ$  (с.ц.м.) в  $pA$  взаимодействиях при импульсе пучка 70 ГэВ/с [6] и при 300–400 ГэВ/с [7, 8]. Эффект ослабления зависимости  $p/\pi$  от размера ядра, возможно, говорит о прозрачности ядерной материи для кумулятивных частиц с большими поперечными импульсами. Этот эффект не описывается даже качественно с помощью модели FTFR, являющейся одной из базовых в Geant4 [9].

Авторы признательны руководству НИЦ “Курчатовский Институт” – ИФВЭ за поддержку данного исследования, персоналу отделения ускорителя и отделения пучков за эффективную работу У70 и 8-го канала. Авторы благодарны проф. А.М. Зайцеву за внимательное прочтение рукописи и за ряд полезных замечаний, позволивших улучшить качество представления результатов. Авторы благодарят также А.Т. Головина за неоценимую техническую поддержку при подготовке установки СПИН к проведению измерений.

1. А. В. Ефремов, В. Т. Ким, Г. И. Лыкасов, ЯФ **44**, 241 (1986).

2. В. В. Аммосов, Н. Н. Антонов, А. А. Балдин и др. (эксперимент СПИН), ЯФ **76**(10), 1275 (2013).
3. В. В. Аммосов, Н. Н. Антонов, В. А. Викторов и др. (эксперимент СПИН), ЯФ и Инж. **4**(9–10), 773 (2013); arXiv:1410.5582v2 [nucl-ex].
4. Н. Н. Антонов, В. А. Викторов, В. А. Гапиенко и др. (эксперимент СПИН), Письма ЖЭТФ **101**(10), 746 (2015).
5. Н. Н. Антонов, А. А. Балдин, В. А. Викторов и др. (эксперимент СПИН), Письма в ЖЭТФ **104**(10), 678 (2016).
6. V. V. Abramov, B. Yu. Baldin, A. F. Buzulutskov et al. (FODS experiment), Z. Phys. C **24**, 205 (1984).
7. D. Antreasyan, J. W. Cronin, H. J. Frisch, M. J. Shochet, L. Kluberg, P. A. Piroue, and R. L. Sumner, Phys. Rev. D **19**, 764 (1979).
8. J. W. Cronin, H. J. Frisch, M. J. Shochet, J. P. Boymond, P. A. Piroue, and R. L. Sumner, Phys. Rev. D **11**, 3105 (1975).
9. J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis et al. (Geant4 collaboration), Nuclear Instruments and Methods A **835**, 186 (2016).
10. V. Uzhinsky, arXiv1109.6768v1[hep-ph] (2011).