Письма в ЖЭТФ, том 108, вып. 12, с. 799 – 802

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

Н. Н. Антонов[+], А. А. Балдин[*], В. А. Викторов[+], А. С. Галоян[*], В. А. Гапиенко[+1)], Г. С. Гапиенко[+], В. Н. Гресь[+], М. А. Илюшин[+], А. И. Мысник[+], А. Ф. Прудкогляд[+], Д. С. Пряников[+], В. А. Романовский[+], А. А. Семак[+], В. И. Терехов[+], В. Я. Углеков[+], М. Н. Уханов[+], С. С. Шиманский[*]

[+]*НИЦ "Курчатовский институт" – ИФВЭ, 142281 Протвино, Россия*

[*]*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° (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° (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 регистрируется 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° 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 $\sim 90°$ (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 π-мезонами на выходе из разных ядер. Проведение измерений было инициировано наблюдением нами ранее[3] интересного факта для кумулятивных частиц, рожденных под углом 35° (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 π-мезонов, рожденных под углом 40° (лаб. сист.) по отношению к пучку в протон-ядерных столкновени-

1)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° импульсные спектры заряженных π-мезонов и протонов выглядят качественно похожими для всех 4-х мишеней. На рисунке 1 в виде точек приведены спектры отрицательных и положительных π-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 π-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/c, однако выход медленных протонов недооценен. Как для pC так и для pW, модель FTFP переоценивает множественности быстрых π-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/π 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/π^+-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/π 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 π^+ 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/π^+ величины. Чтобы показать, что замена π^+ на π^- ничего принципиально не меняет, на рис. 3 для пары W/C показаны величины R, полученные с использованием как p/π^+, так и p/π^- 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 $(p/\pi^+)_{\mathrm{Cu}}/(p/\pi^+)_{\mathrm{C}}$ для разных значений p_T. Получаются значения Cu/C ≈ 1.2 при отсутствии какой-либо явной зависимости от поперечного импульса в интервале 1–4 ГэВ/c, 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, $R = (p/\pi^+)_{\mathrm{W}}/(p/\pi^+)_{\mathrm{Be}}$, то величина R при росте p_T от ~ 0.8 до 6 ГэВ/c, растет от значения ~ 1.3 до 2.0, что не соответствует поведению двойных отношений

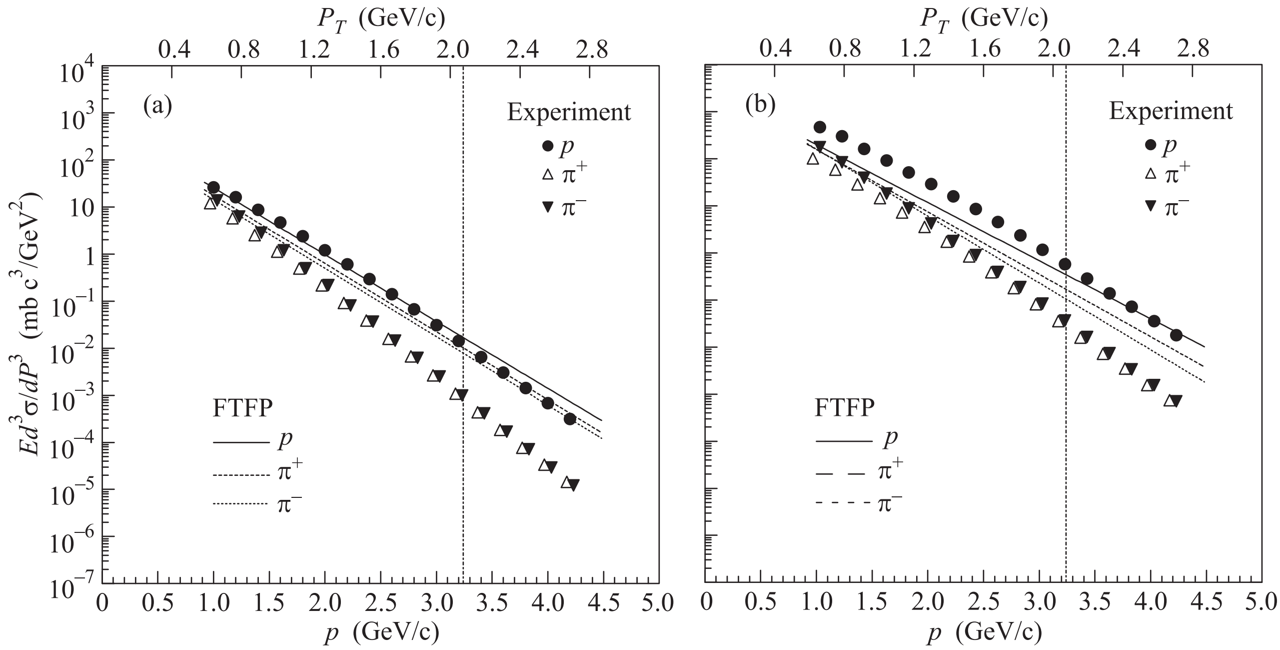

Рис. 1. Импульсные спектры заряженных π-мезонов и протонов, вылетающих под углом 40° (лаб. сист.) из углеродной (левая половина) и из вольфрамовой (справа) мишеней. Вертикальные линии указывают кинематический предел для нуклонов в случае упругого нуклон-нуклонного рассеяния. На верхней шкале приведены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

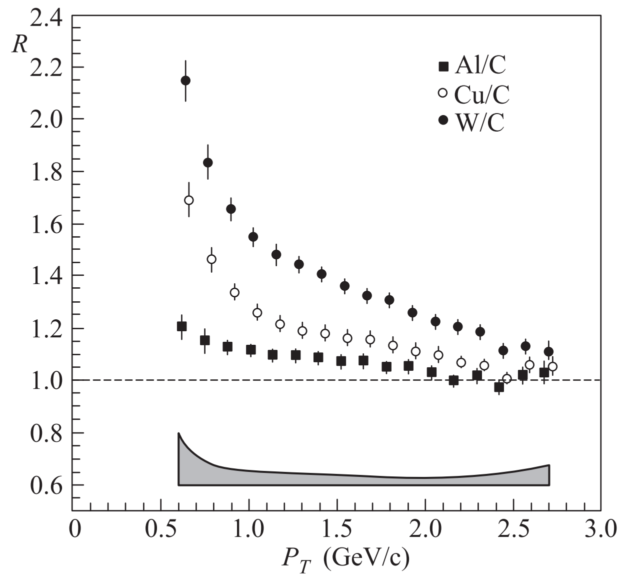

Рис. 2. Величина R в зависимости от поперечного импульса при сравнении углеродной мишени с мишенями из алюминия, меди и вольфрама. Ширина серой полосы внизу рисунка соответствует возможной систематической погрешности при разных p_T

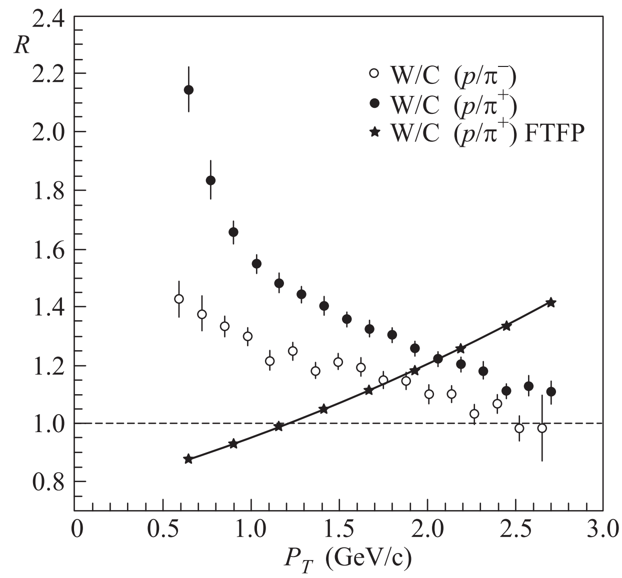

Рис. 3. Величины R для пары W/C при использовании положительно и отрицательно заряженных π-мезонов. В виде кривой на рисунке показан расчет с помощью FTFP модели

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/π^+, измеренного в настоящей работе для разных ядер как функция p_T, отличается от поведения p/π^+ величин, полученных для рождения частиц с большими поперечными импульсами под углом 90° (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/π 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 FTFP, 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).