

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДОВ ПОЛОЖИТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПОД УГЛОМ 35° ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРОТОНОВ С ЯДЕРНЫМИ МИШЕНЯМИ ПРИ ЭНЕРГИИ 50 ГэВ

© 2013 г. **В. В. Аммосов**¹⁾, Н. Н. Антонов¹⁾, А. А. Балдин²⁾, В. А. Виктор¹⁾, В. А. Гапиенко¹⁾, Г. С. Гапиенко¹⁾, А. А. Головин¹⁾, В. Н. Гресь¹⁾, А. А. Иванилов¹⁾, В. И. Корешев¹⁾, В. А. Коротков¹⁾, А. И. Мысник¹⁾, А. Ф. Прудкогляд¹⁾, Ю. М. Свиридов¹⁾, А. А. Семак^{1)*}, В. И. Терехов¹⁾, В. Я. Углеков¹⁾, М. Н. Уханов¹⁾, Б. В. Чуйко¹⁾, С. С. Шиманский²⁾

Поступила в редакцию 03.05.2012 г.

Впервые получены импульсные спектры кумулятивных частиц в области больших P_T в реакции $pA \rightarrow h^+ + X$. Эксперимент выполнен на установке СПИН (ИФВЭ, Протвино) на пучке протонов с энергией 50 ГэВ, взаимодействующих с ядрами C, Al, Cu и W. Положительно заряженные частицы регистрировались под углом 35° в л.с. и в диапазоне поперечных импульсов от 0.6 до 3.7 ГэВ/с. Наблюдена сильная зависимость сечения рождения частиц от атомного числа. В предкумулятивной области проведено сравнение с расчетами по моделям HIJING и UrQMD.

DOI: 10.7868/S0044002713100036

ВВЕДЕНИЕ

Одна из самых интересных проблем исследования ядерной материи при разных температурах и плотностях — это исследование возможности получения в лабораторных условиях и изучения свойств сверхплотного состояния ядерной материи [1], что является основной задачей в программе работ на будущих ускорительных комплексах НИКА [2] и FAIR [3]. Однако при столкновении тяжелых ядер сигнал об образовании сверхплотной ядерной материи сопровождается огромным числом фоновых частиц. Это делает такие эксперименты очень непростыми методически и очень сложными для теоретической интерпретации.

Другая возможность связана с тем, что сверхплотное состояние может присутствовать в ядерной материи как квантовая компонента в волновой функции. В процессах с большими передачами энергии, идущих на малых расстояниях и временах, можно визуализировать эти квантовые состояния. При взаимодействии с холодной сверхплотной компонентой должны наблюдаться характерные сигналы не только в ядро-ядерных, но и в адрон-ядерных и лептон-ядерных столкновениях. Взаимодействие с плотной конфигурацией в ядрах

должно приводить к расширению кинематической области за пределы, допустимые для свободных лептон-нуклонных или адрон-нуклонных взаимодействий.

Идея о существовании в ядрах флуктуаций ядерной плотности восходит к гипотезе Блохинцева [4]. Исследования кинематической области, запрещенной для процессов со свободными нуклонами, проводятся в течение многих десятков лет и принесли большой объем экспериментальных данных (см., например, [1, 5]). Процессы с рождением частиц в “кинематически запрещенную” область получили название “кумулятивные процессы”.

Особый интерес представляет область больших поперечных импульсов (P_T), в которой кумулятивные процессы экспериментально не исследовались. Теоретический анализ [6] показал, что при $X_T \sim 1$ основной вклад должны давать процессы взаимодействия с многокварковыми (многонуклонными) конфигурациями при малом вкладе фоновых процессов перерасеяния. Здесь X_T — доля от максимально возможного поперечного импульса, $2P_T/\sqrt{s}$, а s — инвариантная энергия нуклон-нуклонного взаимодействия.

Целью настоящей работы являлось проведение первых измерений инклюзивных спектров в предкумулятивной и кумулятивной кинематических областях при больших поперечных импульсах. В предкумулятивной области выполнено сравнение

¹⁾Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия.

²⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

*E-mail: Artem.Semak@ihep.ru

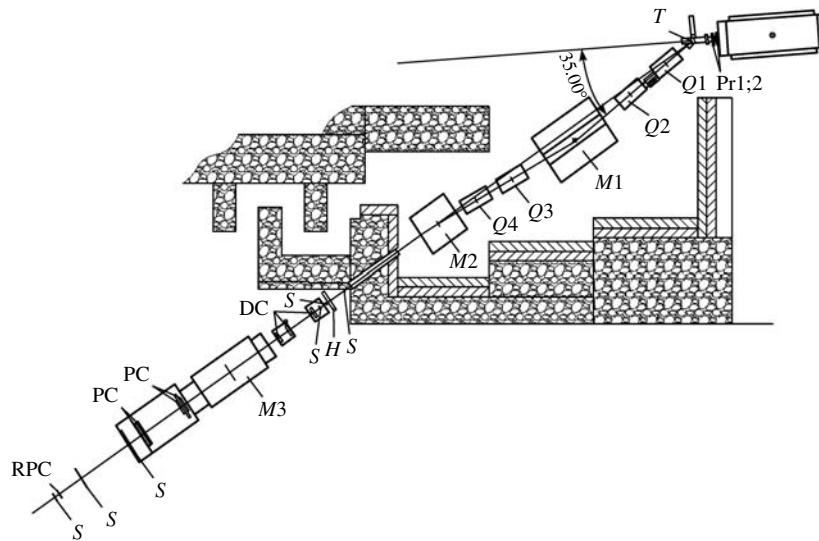


Рис. 1. Схема элементов установки: *T* — мишень; *Q1*, *Q2*, *Q3* и *Q4* — магнитные линзы; *M1*, *M2* — магниты, выводящие частицы из горячей зоны; *M3* — анализирующий магнит; *S* — набор сцинтилляционных триггерных счетчиков; *PC*, *DC* — проволоочные камеры трековой системы; *H* и *RPC* — элементы времяпролетной системы (годоскоп и резистивная плоская камера).

с предсказаниями существующих популярных монте-карло-генераторов, способных моделировать протон-ядерное и ядро-ядерное взаимодействия.

1. УСТАНОВКА СПИН И ДЕТАЛИ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ

В настоящей конфигурации установка СПИН представляет собой одноплечевой спектрометр с узкой апертурой. Схема установки показана на рис. 1. Оборудование установки СПИН размещено на двух площадках — в “горячей” и “холодной” зонах, разделенных между собой радиационной защитой. В “горячей” зоне расположены пучковый профилометр, мишень и шесть элементов магнитной оптики установки. Изменяя положение шести магнитных элементов, можно отбирать частицы, вылетающие из мишени под углами в диапазоне 22° – 55° , и выводить их через канал в защите в “холодную” зону, где расположена триггерная и анализирующая части установки. Данные настоящей работы набраны для угла 35° . Совпадение сигналов с пяти сцинтилляционных счетчиков, расположенных до и после анализирующего магнита (*M3*), является триггером для системы сбора данных. Система проволоочных камер, стоящих перед магнитом *M3* и после него, позволяет измерять импульс частицы с разрешением $\sigma(p)/p \approx 3 \times 10^{-3}$. Угловой аксептанс установки составляет по азимуту $\Delta\varphi \approx 100$ мрад, а по полярному углу $\Delta\theta \approx 40$ мрад. Захват установки по импульсу меняется от 5.5% при 1 ГэВ/с до 3.5% при импульсе 6 ГэВ/с. Времяпролетная система состоит из сцинтилляционного

годоскопа, расположенного на входе в “холодную” зону, и многозачерной резистивной плоской камеры, расположенной в конце спектрометра.

Набор данных проводился на протонном пучке ускорителя У-70, выведенного в канал № 8 при интенсивности $\sim 5 \times 10^{12}$ протонов на мишени за цикл. Длительность сброса составляла ~ 1 с. Использовались четыре тонкие мишени, их толщины приведены в табл. 1.

Все четыре мишени закреплены на одной рамке и вводились в пучок поочередно. Таким образом, разные мишени облучались при близких параметрах пучка. Для каждой из мишеней измерялся выход заряженных частиц с импульсами от 1.0 до 6.6 ГэВ/с, что соответствует диапазону поперечных импульсов $P_T = 0.6$ – 3.7 ГэВ/с.

Фоновые события вызываются частицами, которые, не проходя по плечу спектрометра, проникают в “холодную” зону и производят срабатывание триггерных сцинтилляционных счетчиков. Чтобы измерить вклад фоновых частиц, в самом начале плеча спектрометра между первой и второй магнитными линзами (*Q1* и *Q2* на рис. 1) устанавливался стальной цилиндр (затвор) в 4 ядерные длины. Вклад фона измерялся при перекрытом с помощью

Таблица 1. Толщины мишеней, использованных в настоящей работе

| Мишень | Углерод | Алюминий | Медь | Вольфрам |
|------------------------------|---------|----------|------|----------|
| Толщина [г/см ²] | 0.86 | 0.81 | 0.90 | 0.64 |

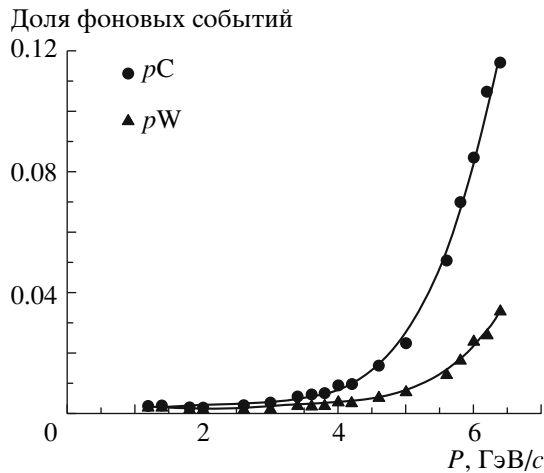


Рис. 2. Доля фоновых событий для разных значений импульса при работе с углеродной и вольфрамовой мишенями.

затвора пути прохождения частиц по плечу спектрометра. Как пример, доля фоновых триггеров показана на рис. 2 для двух использованных мишеней, углеродной и вольфрамовой, в зависимости от импульса положительно заряженной частицы. Из рисунка видно, что вклад фона растет с ростом импульса и в случае углеродной мишени составляет ~13% при 6.6 ГэВ/с. Для вольфрама доля фона при максимальном импульсе составляет 4%. Все приводимые далее экспериментальные данные направлены на вклад фона.

Интенсивность протонного пучка измерялась с помощью камеры вторичной эмиссии. Поперечные геометрические характеристики протонного пучка и его положение контролировались посредством двухкоординатных профилометров (16 каналов на плоскость, шаг электродов — 2.5 мм, толщина по пучку — 10 мг/см²), оснащенных чувствительной электроникой.

2. ДАННЫЕ ПО ИНКЛЮЗИВНЫМ СПЕКТРАМ. СРАВНЕНИЕ С МОДЕЛЯМИ UrQMD И HIJING

Для всех четырех мишеней были построены импульсные спектры в виде двойного дифференциального сечения, определенного как

$$\frac{d^2\sigma}{dP d\Omega} = \frac{A}{N_A \rho t} \frac{1}{\varepsilon \Delta P \Delta \Omega} \frac{1}{N_{\text{prot}}} N^{h+},$$

где A — число нуклонов ядра; N_A — число Авогадро; ρ — плотность мишени; t — толщина мишени; Δp и $\Delta \Omega$ — аксептанс установки по импульсу и телесному углу; N_{prot} — полное число протонов,

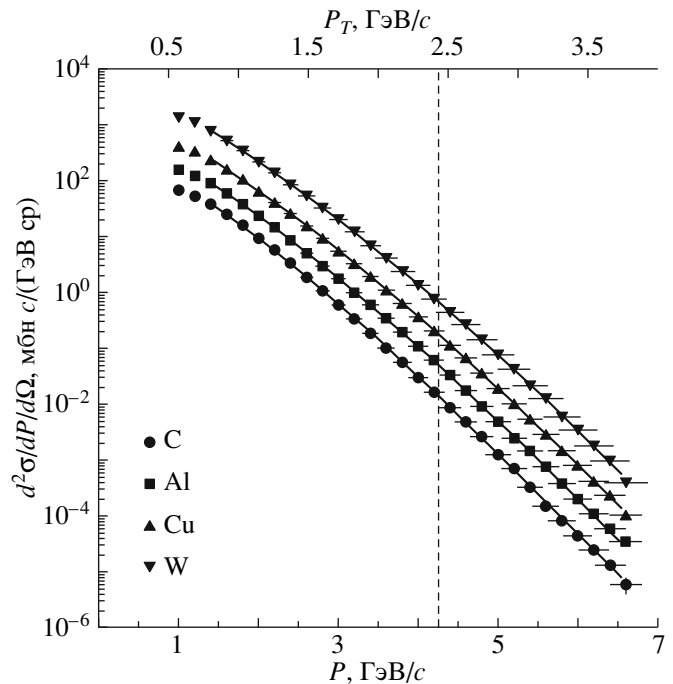


Рис. 3. Двойное дифференциальное сечение для рождения положительно заряженных частиц, вылетающих под углом 35° во взаимодействиях протонов с четырьмя разными мишенями. Вертикальная штриховая линия — кинематический предел для упругого NN -рассеяния.

направленных на мишень; N^{h+} — число триггеров для данного импульса. Величина ε описывает потери, возникающие при прохождении частиц по длинному (~30 м) плечу спектрометра, и эффективность триггерной системы. Величина $\varepsilon \Delta p \Delta \Omega$ рассчитывалась путем моделирования с помощью программы GEANT3, куда были заложены параметры всех элементов установки.

Величины двойного дифференциального сечения, измеренные для положительно заряженных частиц в зависимости от полного импульса, приведены на рис. 3 для всех четырех мишеней. На верхней горизонтальной шкале показаны значения поперечного импульса, P_T . Вертикальная штриховая линия соответствует кинематическому пределу для упругого pp -рассеяния. Область поперечных импульсов более ~2.5 ГэВ/с лежит в кинематической области, запрещенной для взаимодействия свободных нуклонов. Таким образом, данные на рис. 3 подтверждают существование кумулятивных частиц в области больших поперечных импульсов.

Статистическая ошибка в измеренных сечениях составляет менее 1% для импульсов $P < 5$ ГэВ/с. С ростом импульса выше 5 ГэВ/с эта ошибка растет и при $P = 6.4$ ГэВ/с составляет 6% для

Таблица 2. Значения параметров A , B , C , D , найденных при аппроксимации спектров

| Мишень | A , мбн c ГэВ $^{-1}$ $ср^{-1}$ | B , c ГэВ $^{-1}$ | C , c^2 ГэВ $^{-2}$ | D , c^3 ГэВ $^{-3}$ |
|--------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| C | 629.8 ± 13.8 | -1.626 ± 0.012 | -0.272 ± 0.024 | 0.0146 ± 0.0005 |
| Al | 1165.0 ± 84.9 | -1.473 ± 0.069 | -0.266 ± 0.021 | 0.0132 ± 0.0019 |
| Cu | 3374.8 ± 190.9 | -1.612 ± 0.056 | -0.191 ± 0.016 | 0.0059 ± 0.0014 |
| W | 10290.0 ± 1116.8 | -1.604 ± 0.102 | -0.171 ± 0.029 | 0.0040 ± 0.0025 |

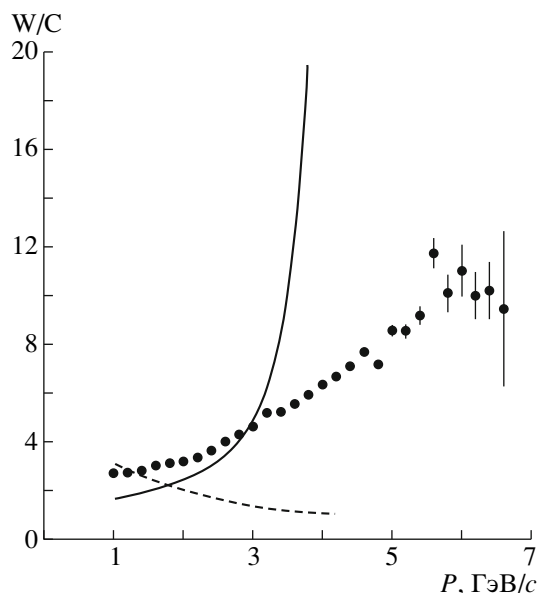
вольфрама и 12% для углерода. Ошибки, приведенные на рис. 3–6, являются только статистическими. Оценка систематической ошибки в измеренных сечениях сделана путем сравнения данных, набранных в разное время. Эта ошибка не зависит от импульса и может достигать порядка 20%. Основной вклад в систематическую ошибку дает неточность измерения числа пучковых частиц, прошедших через мишень. Как было сказано выше, разные мишени облучались в пучке при близких условиях, поэтому систематическая погрешность в измерении отношения сечений ниже, чем погрешность измерения самих сечений. Систематическая ошибка в измерении отношения была определена как $\sim 7\%$ путем сравнения повторных измерений, сделанных в разное время.

Сплошные кривые на рис. 3 представляют собой результат аппроксимации дифференциальных спектров для импульсов $P > 1.5$ ГэВ/с выражением $A \exp(BP + CP^2 + DP^3)$, где A , B , C и D —

свободные параметры. Полученные в результате аппроксимации величины A , B , C и D и их ошибки приведены в табл. 2 для всех мишеней.

Сопоставление экспериментальных данных с расчетами моделей, работающих в предкумулятивной области, было проведено для отношения выходов h^+ на разных мишенях. Экспериментальные данные сравнивались с результатами расчетов по популярным в физике высоких энергий моделям: UrQMD (версия 3.3) [7] и HIJING (версия 1.34) [8]. Программа UrQMD (Ultra-relativistic Quantum-Molecular-Dynamics Model) представляет собой микроскопическую транспортную модель, в которой разыгрываются множественные взаимодействия начальных частиц и вновь рожденных частиц, выполняется фрагментация цветовых струн в адроны, моделируется распад адронных резонансов. Эта модель активно используется для сравнения с данными по рождению адронов в столкновении тяжелых ионов. Примеры использования UrQMD можно найти в работах [9, 10] Сотрудничества NA49. Программа HIJING (Heavy Ion Jet INteraction Generator) была создана для описания рождения частиц в pp , pA и AA -взаимодействиях с помощью моделирования множественного рождения струй. Особенностью HIJING является включение жесткого и полужесткого рассеяния партонов с переданными импульсами в несколько ГэВ. Расчеты, выполненные по этой модели, используются [11, 12] при анализе данных экспериментов на ускорителе RHIC.

На рис. 4 показаны измеренные отношения выходов частиц на W- и C-мишенях в расчете на одно взаимодействие. Здесь N_{int} означает число взаимодействий в мишени. Экспериментальные данные на рисунке сравниваются с предсказаниями моделей HIJING (сплошная кривая) и UrQMD (штриховая). Видно, что предсказания HIJING и UrQMD не соответствуют измеренным величинам. Аналогичное сравнение экспериментальных данных с этими же моделями проведено на рис. 5, где показано отношение выходов на W и Cu. Как и в случае с отношением W/C , экспериментальные данные для отношения W/Cu плохо описываются кривыми, полученными при моделировании.

**Рис. 4.** Отношение выходов положительно заряженных частиц во взаимодействиях протонов с вольфрамом и углеродом. Точки — эксперимент; кривые: штриховая — UrQMD, сплошная — HIJING.

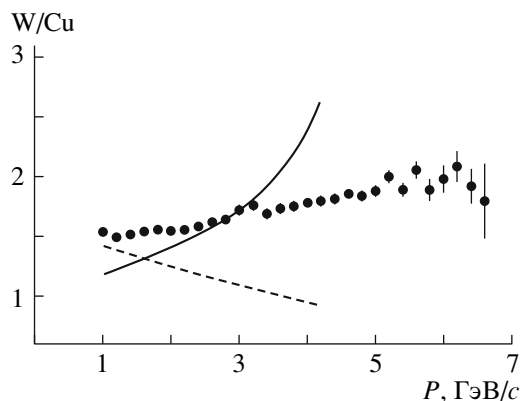


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но для случая вольфрама и меди.

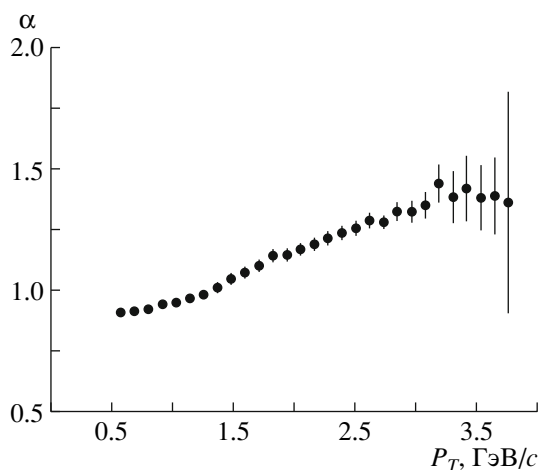


Рис. 6. Показатель степенной зависимости сечения от атомного номера, приведенный как функция поперечного импульса.

Кумулятивные процессы характеризуются сильной зависимостью от атомного числа [5]. При параметризации сечения степенной функцией $\sim A^\alpha$ величина α для кумулятивных частиц может быть больше единицы. На рис. 6 приведен показатель степени α , полученный из отношения сечений на вольфраме и углероде и представленный как функция поперечного импульса. Рисунок показывает рост величины α с ростом P_T . При $P_T \approx 3.5$ ГэВ/с показатель степени достигает величины ~ 1.37 .

К сильной A -зависимости может приводить перерассеяние вторичных адронов на нуклонах ядра. В настоящей работе мы не пытались оценить вклад этого процесса. Заметим, что в работах [13–15] было показано, что в реакциях рождения антипротонов и других адронов в pA -взаимодействиях при энергиях протонов 10 и 70 ГэВ для частиц с импульсом больше 1–2 ГэВ/с вклад вторичных взаимодействий мал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены спектры положительных частиц, вылетающих под углом 35° в л.с. при взаимодействии 50-ГэВ протонов со следующими ядерными мишенями: С, Al, Cu и W. Измерения выполнены в диапазоне поперечных импульсов вплоть до $P_T = 3.7$ ГэВ/с, включая кинематически запрещенную (кумулятивную) область $P_T > 2.5$ ГэВ/с. Образование кумулятивных частиц с большими поперечными импульсами наблюдалось впервые. Сечения образования кумулятивных частиц сильно зависят от атомного веса мишени. Наблюдение кумулятивных частиц с большими P_T в совокупности с сильной A -зависимостью может служить указанием на то, что в эксперименте зарегистрированы процессы жесткого рассеяния на плотных многонуклонных (многокварковых) конфигурациях в ядрах. Представляется интересным продолжение как экспериментальных, так и теоретических исследований наблюдаемых фактов.

Полученные в предкумулятивной области спектры существенно расходятся с предсказаниями стандартных монте-карло-генераторов UrQMD и HIJING, претендующих на описание pA - и AA -взаимодействий.

Авторы признательны руководству ГНЦ ИФВЭ за поддержку данного исследования, персоналу отделения ускорителя и отделения пучков за эффективную работу У-70 и 8-го канала. Авторы также благодарят А.Т. Головина за неоценимую техническую поддержку при подготовке установки к проведению измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г. А. Лексин, ЯФ **65**, 2042 (2002) [Phys. Atom. Nucl. **65**, 1985 (2002)].
2. NICA Project, <http://nica.jinr.ru>
3. FAIR Project, <http://www.fair-center.com>
4. Д. И. Блохинцев, ЖЭТФ **33**, 1295 (1957) [Sov. Phys. JETP **6**, 995 (1958)].
5. А. В. Ефремов, ЭЧАЯ **13**, 613 (1982) [Sov. J. Part. Nucl. **13**, 254 (1982)].
6. А. В. Ефремов, В. Т. Ким, Г. И. Лыкасов, ЯФ **44**, 241 (1986) [Sov. J. Nucl. Phys. **44**, 151 (1986)].
7. S. A. Bass *et al.*, Prog. Part. Nucl. Phys. **41**, 255 (1998); M. Bleicher *et al.*, J. Phys. G **25**, 1859 (1999); <http://urqmd.org>
8. Xin-Nian Wang and M. Gyulassy, Phys. Rev. D **44**, 3501 (1991); <http://www-nsdth.lbl.gov/~xnwang/hijing/doc.html>
9. M. Mitrovski (for the NA49 Collab.), J. Phys. G **37**, 094003 (2010).

10. T. Anticic *et al.*, Phys. Rev. C **79**, 044904 (2009). (1982) [Sov. J. Nucl. Phys. **37**, 732 (1983); **35**, 694 (1982)].
11. J. T. Mitchel (for the PHENIX Collab.), J. Phys. Conf. Ser. **27**, 88 (2005).
12. A. Adare *et al.*, Phys. Rev. C **78**, 044902 (2008).
13. Л. М. Барков и др., ЯФ **37**, 1232 (1983); **35**, 1186
14. А. А. Сибирцев и др., ЯФ **53**, 191 (1991) [Sov. J. Nucl. Phys. **53**, 121 (1991)].
15. C. Pajares and Yu. M. Shabelski, *Relativistic Nuclear Interactions* (Editorial URSS, Moscow, 2007).

A MEASUREMENT OF THE YIELD OF THE POSITIVE PARTICLES ESCAPING AT 35° ANGLE FROM PROTON INTERACTIONS WITH NUCLEAR TARGETS AT ENERGY OF 50 GeV

V. V. Ammosov, N. N. Antonov, A. A. Baldin, V. A. Viktorov, V. A. Gapienko, G. S. Gapienko, A. A. Golovin, V. N. Gres, A. A. Ivanilov, V. I. Koreshev, V. A. Korotkov, A. I. Mysnik, A. F. Prudkoglyad, Yu. M. Sviridov, A. A. Semak, V. I. Terekhov, V. Ya. Uglekov, M. N. Ukhanov, B. V. Chujko, S. S. Shimanskii

First data on momentum spectra of cumulative particles produced with high P_T in $pA \rightarrow h^+ + X$ scattering were obtained. Experiment was carried out with SPIN detector (IHEP, Protvino) at 50-GeV proton beam interacting with C, Al, Cu, and W nuclei. Positively charged particles escaped at 35° angle in lab system were measured in 0.6–3.7 GeV/ c interval of transverse momentum. Strong dependence on atomic number was observed. A comparison with computation done with HIJING and UrQMD model was performed in subcumulative range.