



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2016–10

М. Ю. Боголюбский, А. Ю. Бордановский, А. А. Волков,
Д. К. Елумахов, В. П. Ефремов, А. А. Иванилов, А. Ю. Калинин,
А. Н. Криницын, В. И. Крышкин, Н. В. Кулагин, Д. И. Паталаха,
В. В. Скворцов, В. В. Талов, Л. К. Турчанович

**Образование частиц в переднем направлении
в pA - взаимодействиях при импульсе 25 и 50 ГэВ/с
и CA -взаимодействиях при энергии 25 ГэВ/н**

Направлено в ЯФ

Протвино 2016

Аннотация

Боголюбский М.Ю. и др., Образование частиц в переднем направлении в рА- взаимодействиях при импульсе 25 и 50 ГэВ/с и СА-взаимодействиях при энергии 25 ГэВ/н, Препринт ИФВЭ 2016–10. – Протвино, 2016. – 11 с., 9 рис., библиогр.: 12.

Измерены относительные выходы заряженных адронов ($\pi^\pm$, $K^\pm$, p , $\bar{p}$ и d) с большими x_F в рА-взаимодействиях при энергии протонов 25 и 50 ГэВ под углом около 0° в диапазоне импульсов 15-40 ГэВ/с. Получено ограничение сверху на рождение вперед двух протонов в рА-взаимодействиях при 50 ГэВ/с. В короткой экспозиции проведены измерения характеристик углеродного пучка с энергией 25 ГэВ/н и выходы фрагментов при взаимодействии пучка углерода с ядерными мишенями.

Abstract

Bogolyubsky M.Yu. et al., Production of Particles in Forward Directions in pA-interactions at momentum 25 and 50 GeV/c and CA-interactions at energy 25 GeV/n: IHEP Preprint 2016–10. – Protvino, 2016. – p. 11, fig. 9, refs.: 12.

Relative production rate of charged hadrons ($\pi^\pm$, $K^\pm$, p , $\bar{p}$ and d) at large x_F in pA-collisions at proton momentum 25 and 50 GeV/c at the angle about 0° in the momentum range 14 - 40 GeV/c is studied. Estimation of the upper limit on forward production of two protons in pA-interactions at 50 GeV/c is obtained. In short exposition there are measured characteristics of carbon beam at 25 GeV/n energy and yields of fragments from interaction of carbon beam with nuclear targets.

Введение

Создание углеродного пучка в ИФВЭ открывает новые возможности в области изучения релятивистской ядерной физики. В предложении эксперимента по изучению кумулятивных процессов в обратной кинематике на углеродном пучке [1] в качестве основного элемента установки предполагается использовать канал № 22. В таком подходе канал выступает в качестве спектрометра вылетевших вперед частиц и ядерных фрагментов, которые он выделяет и транспортирует к установленным в конце канала детекторам. Указанная схема использования канала 22 в эксперименте промоделирована методом Монте-Карло в статье [2] в рамках GEANT4.

Для проверки работоспособности всей аппаратуры, а также привязке (для сравнения) к результатам, полученным в аналогичной постановке на протонном пучке [3], выполнены измерения образования заряженных адронов под углом 0^0 в pA – взаимодействиях при импульсе протонов пучка 25 и 50 ГэВ/с .

На углеродном пучке с энергией $E_0=25$ ГэВ/н (подразумевается полная энергия нуклона) измерены характеристики пучка при разных методах вывода – стохастический метод и вывод с помощью изогнутого кристалла. Медленный вывод обеспечивает вывод только всего ускоренного пучка из ускорителя – около 3×10^9 ядер/цикл. А вывод методом каналирования позволяет выводить пучок с интенсивностью в диапазоне 10^6 - 10^8 ядер/цикл. Для выполнения программы, представленной в [1], необходима максимальная интенсивность пучка, а для исследования корреляций с CA – взаимодействиях [4] интенсивность углеродного пучка не должна быть больше $\sim 10^7$ ядер/с, что легко реализовать при выводе пучка изогнутым кристаллом.

1. Постановка эксперимента

Изучение кумулятивных процессов в прямых реакциях предполагает измерения вторичных частиц, образующихся под углами, близкими к 0° . Для этого расстояние между мишенью и регистрирующей аппаратурой должно быть таким, чтобы минимизировать счёт от прямого пучка. В данном случае был выбран канал № 22, показанный на рис. 1а. Пучок из ускорителя выходит справа, проходит через магнит М1 и попадает на турель с 16 положениями, на которой установлены 8 мишеней: ^{12}C , Al , Cu и Pb (4 мишени толщиной $0,05 \lambda_{\text{int}}$ и 4 мишени толщиной $0,1 \lambda_{\text{int}}$). На мишень направлен телескоп сцинтилляционных счётчиков S_{22} для контроля числа взаимодействий.

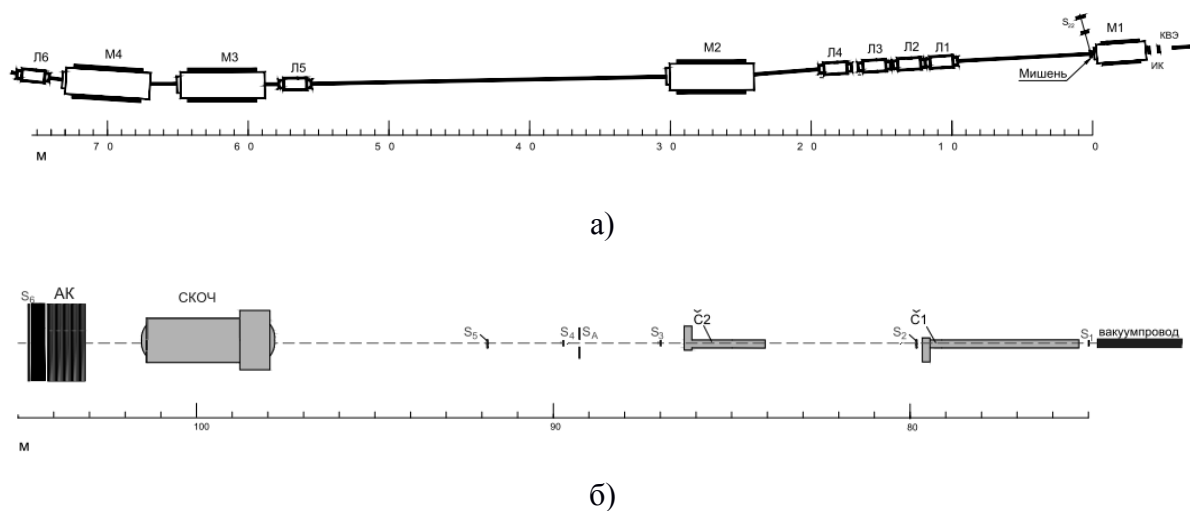


Рис. 1. а) Канал № 22. M_i – магниты, L_i – линзы, S_{22} – телескоп сцинтилляционных счётчиков. б) Регистрирующая часть установки. $\check{C}_i$ – черенковские пороговые счётчики, S_i – сцинтилляционные счётчики, СКОЧ – спектрометр колец черенковского излучения, АК – адронный калориметр.

На выходе вакуумпровода 22 канала после линзы Л6 расположена регистрирующая часть установки, показанной на рис. 1б. Траектория частиц определяется набором сцинтилляционных счётчиков. Заряженные адроны идентифицируются пороговыми черенковскими счётчиками и спектрометром черенковских колец (СКОЧ), описанном в [5]. Пример такого распределения показан на рис. 2. Энергия частиц E , измеряемая ад-

ронным калориметром AK [6], при заданном в канале импульсе (жесткости канала), определяет число нуклонов фрагмента по отношению E/E_0 . Сигналы со счётчиков S_1, S_2, S_3 и S_4 поступают на амплитудный анализ. Счётчик S_A с отверстием в центре включен в антисовпадения для подавления частиц гало. Счётчик S_F измеряет равномерность интенсивности пучка. За калориметром установлено 25 см стали и счётчик S_5 для выделения мюонов.

При длительности цикла интенсивности пучка 0.5 с число триггеров менялось от 100 до 2×10^4 частиц на протонном пучке.

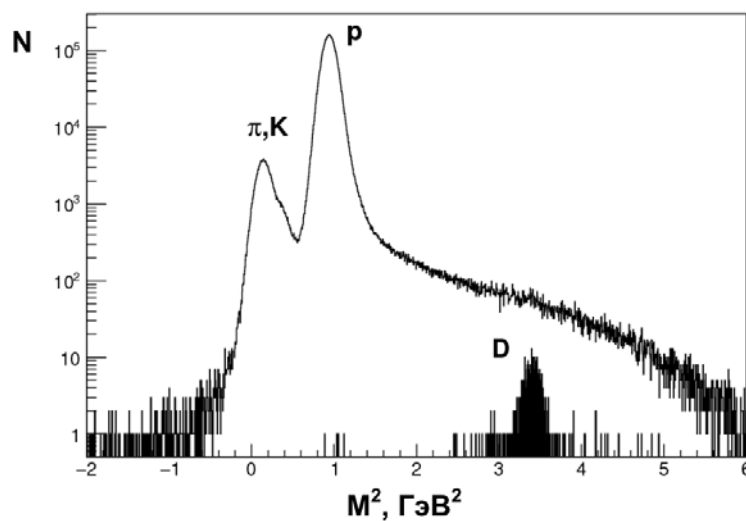


Рис. 2. Распределение по квадрату массы частиц, определённое по СКОЧ без подавления адронов пороговыми черенковскими счётчиками (светлая гистограмма) и с подавлением (тёмная гистограмма).

По триггеру, которым являлись совпадения счётчиков S_1 - S_4 в антисовпадении со счётчиком S_A , амплитудная и временная информация со сцинтилляционных счётчиков S_1 - S_4 и S_5 , черенковских счётчиков, $СКОЧ$ и калориметра поступала на блоки АЦП и ВЦП. Для контроля за случайными совпадениями задержанные на 500 нс сигналы со сцинтилляционных счётчиков и калориметра также подавались на АЦП. Измерения производились для двух толщин мишеней и без мишеней. При отсутствии мишени счёт составлял в среднем от 20 % до 50 % в зависимости от метода вывода и импульса канала. Значение импульса канала изменялось от 10 до 70 ГэВ/с, исключая область вблизи импульса выводимого из ускорителя пучка. Основные измерения выполнены

для положительной полярности пучка, для контроля проведён небольшой набор статистики при отрицательной полярности.

2. Обработка

2.1. Протонный пучок

Для каждого события проводилась следующая процедура обработки:

- за время чувствительности регистрирующей электроники, равное 500 нс, записывалось несколько сигналов с детекторов, отбирались только те события, которые коррелировали по времени с сигналом триггера;
- нормировались шкалы ВЦП сцинтилляционных счётчиков, из 4 сигналов со сцинтилляционных счётчиков отбирался сигнал с наименьшей амплитудой;
- по информации со СКОЧ определялся радиус черенковского излучения;
- для каждой мишени вычитался фон пустой мишени.

2.2. Углеродный пучок

Для каждого события проводилась следующая процедура обработки:

- по амплитуде сцинтилляционных счётчиков относительно амплитуды минимально ионизирующей частицы определялся заряд частицы (Z);
- по амплитуде импульса с адронного калориметра относительно одиночной частицы определялось число нуклонов.

3. Результаты

3.1 Протонный пучок

Как и в других работах (см., например, [3]), отмечается слабая зависимость характеристик вторичных частиц (сорта частиц, зависимость от продольного импульса) от ядерной мишени. Поэтому некоторые результаты представлены усреднёнными по мишеням. На рис. 3 показана зависимость от $x = p_{c.m.}/p_{c.m.}^{max}$ отношения протонов и каонов

к π^+ для энергии протонов 25 ГэВ, а на рис 4 - зависимость отношений $p, K^+, K^-, \bar{p}$ и d к π^+ от x для энергии протонов 50 ГэВ, усреднённых по всем мишеням.

Характер отношений такой же, как и в [3], и практически не зависит от энергии и угла. Обращает внимание быстро растущее отношение p/π^+ , которое на сегодняшний день не имеет однозначного объяснения, см. [7-9].

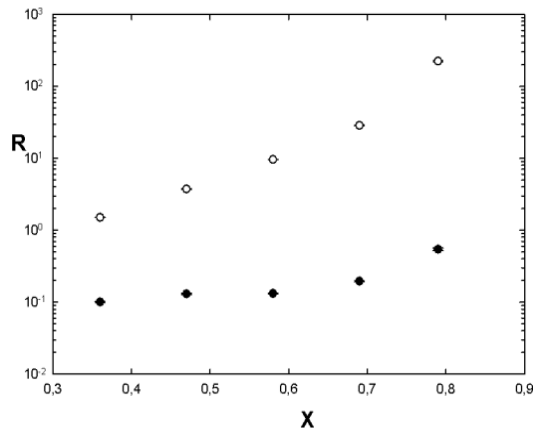


Рис. 3. Зависимость отношений p ($\circ$), K^+ ($\bullet$) к пионам от x , усреднённых по всем мишеням для энергии протонов 25 ГэВ.

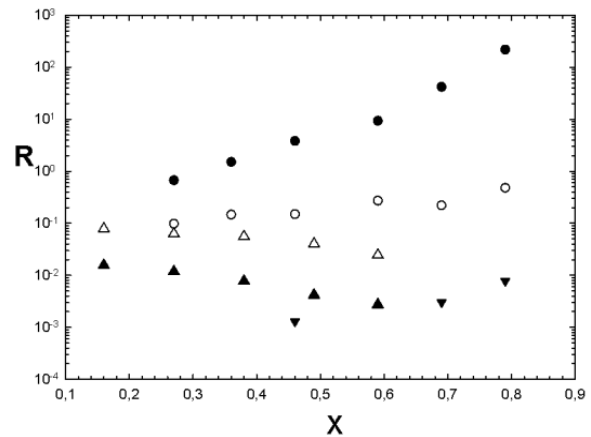


Рис. 4. Зависимость отношений p ($\bullet$), K^+ ($\circ$), K^- ($\blacktriangle$), $\bar{p}$ ($\triangle$) и d ($\blacktriangledown$) к пионам от x , усреднённых по всем мишеням для энергии протонов 50 ГэВ.

На рис. 5 и 6 показана зависимость $\alpha = \ln(Y_1/Y_2) / \ln(A_1/A_2)$, где Y_i – нормированный выход частиц, от x для энергии протонов 25 ГэВ и 50 ГэВ, A_i – массовое число ядер мишени. С ростом массы ядра мишени выходы всех частиц падают в зависимости от x как при энергии протонов 25 ГэВ, так и при энергии 50 ГэВ. Аналогичное поведение наблюдается в диапазоне энергий 70 – 400 ГэВ в экспериментах, выполненных в широком угловом диапазоне, т. е. реализуется ядерный скейлинг. Эффект этот связывают с периферическими процессами, сплошная линия – расчёт из [10].

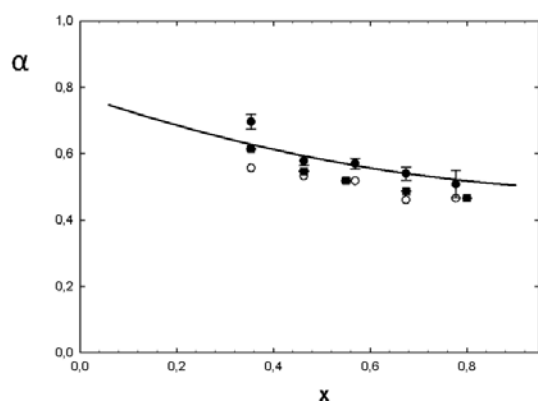


Рис. 5. Зависимость α от x при энергии 25 ГэВ. ■ – протоны, ○ – пионы, ● – каоны.

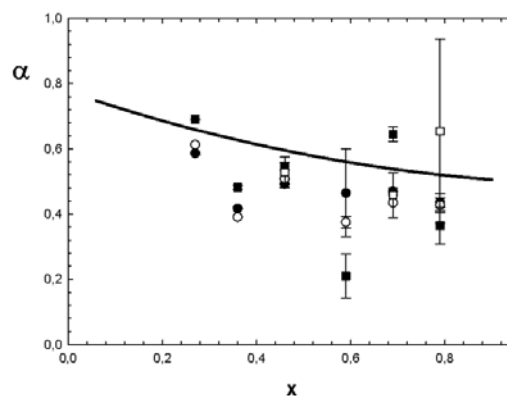


Рис. 6. Зависимость α от x при энергии 50 ГэВ. ■ – протоны, ● – пионы, ○ – каоны, □ – дейтроны.

Сравнительно высокий выход дейтронов, того же порядка, что и при больших p_T [11], в ряде работ [12] описывается моделью "слипания". В этом случае вероятность образования пар нуклонов (pn и pp) должна быть соизмерима с выходом дейтронов (или даже больше, так как коэффициент слипания меньше единицы). По ионизационным потерям в сцинтилляционных счётчиках и энерговыведению в калориметре определялась область, соответствующая регистрации двух частиц. На рис. 7 показан пример такого распределения. Область, E/p и $Z \sim 1$ соответствует одиночным адронам. Небольшая область с E/p меньше единицы показывает вклад мюонов, а область очерченная кругом, должна содержать пару адронов. Эта область была проанализирована с учётом временной информации и результатов отдельных измерений с задержанными относительно триггера сигналами с калориметра и сцинтилляционных счётчиков. Анализ показал, что все зарегистрированные события в этой области являются случайным совпадением.

Таким образом, на уровне 10^{-5} от количества триггеров на заряженные частицы в канале (импульс пучка 50 ГэВ/с, настройка канала 15 ГэВ/с с $\Delta p/p \sim 1\%$) в переднем конусе ~ 40 мстерад не зарегистрированы два протона, которые свидетельствовали бы о механизме образования через "слипание". Вероятность такого процесса при больших x_F должна падать из-за уменьшения множественности как и при $p_T \rightarrow 0$ [12].

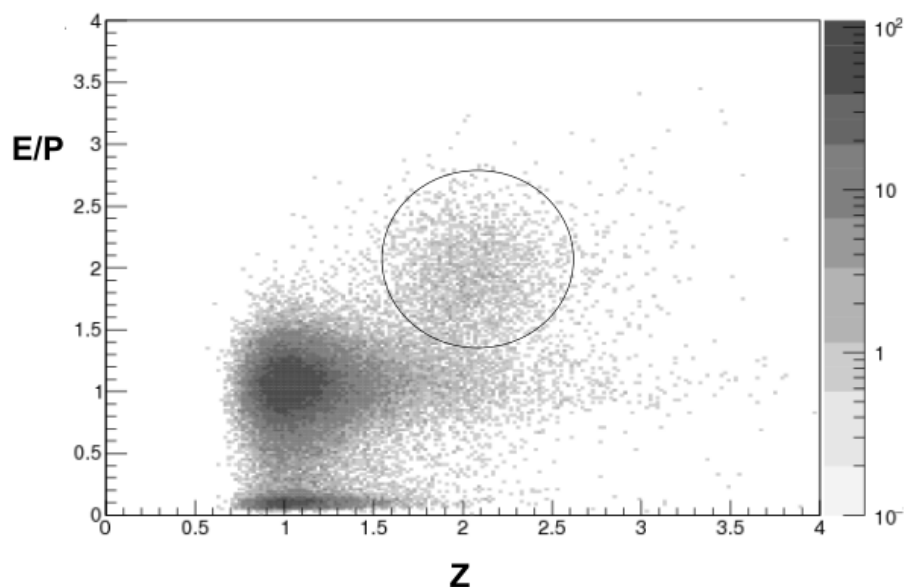


Рис. 7. Амплитудные распределения в калориметре и сцинтилляционных счётчиках.

3.2. Углеродный пучок

Углеродный пучок с энергией 25 ГэВ/н выводился стохастическим методом (вся интенсивность ускоренного пучка - 3×10^9 1/с) и кристаллом методом каналирования. При этом интенсивность могла понижаться до 10^5 1/с. Целью измерений являлось определение качества пучка (примеси других фрагментов) и диапазон изменения интенсивности при разных методах вывода, а также измерения образования фрагментов в CA - взаимодействиях в широком диапазоне магнитной жёсткости.

На рис. 8 показан состав пучка при жёсткости 50 ГэВ/с, измеренный в конце тракта 22 канала (расположение адронного калориметра). Масштаб вклада фрагментов (d и 4He) приблизительно соответствуют количеству вещества на пути пучка от ускорителя до регистрирующей аппаратуры.

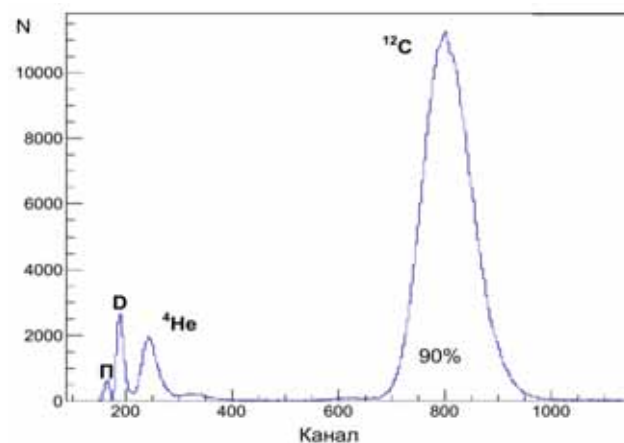


Рис. 8. Состав пучка при жёсткости 50 ГэВ/с. П- положение пьедестала.

При установке углеродной мишени количество фрагментов, зарегистрированных при изменении жёсткости в диапазоне 10 ГэВ/с - 60 ГэВ/с, приблизительно соответствует расчётам, приведённым в [1,2]. Для иллюстрации на рис. 9 показаны выходы фрагментов для жёсткости 47 ГэВ/с и 53 ГэВ/с.

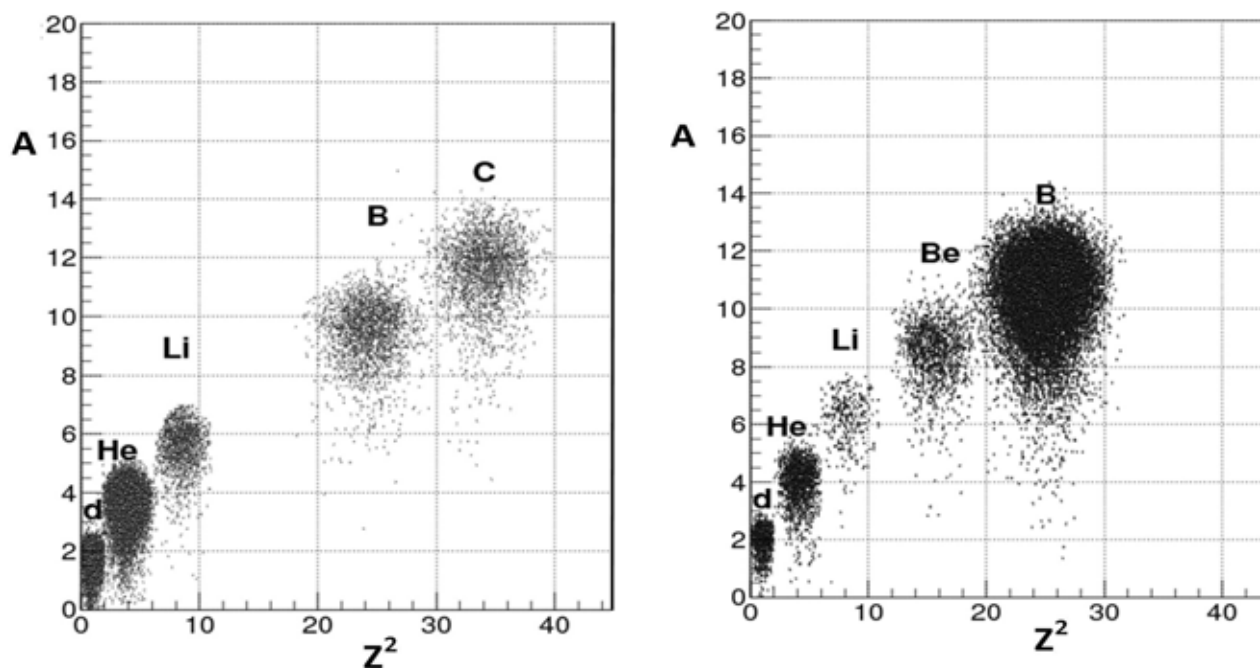


Рис. 9. Выходы фрагментов на углеродной мишени при жёсткости 47 ГэВ/с (левый рисунок) и 53 ГэВ/с.

Заключение

Основная задача на протонном пучке – контроль работы установки – выполнена, учитывая, что при энергии 50 ГэВ результаты качественно согласуются с результатами, полученными в работе [3].

Измерены относительные выходы дейтронов и показано, что на уровне 10^{-5} от количества триггеров на заряженные частицы в рА-взаимодействиях не зарегистрированы два протона. Эти результаты представляют интерес для выводов о применимости ряда теоретических моделей, в частности, модели "слипания".

Углеродный пучок имеет приемлемую примесь фрагментов, которая соответствует количеству вещества на пути до детекторов. Эта примесь не является препятствием к выполнению намеченных программ. Вывод протонного пучка с энергией 25 ГэВ показывает, что может быть реализован вывод углеродного пучка с энергией 12.5 ГэВ/н, что расширяет экспериментальную программу. Успешный вывод пучка как стохастическим методом, так и каналированием позволяет менять интенсивность пучка от 10^5 до 3×10^9 ядер/цикл, что соответствует требованиям намеченных программ.

Состав и интенсивность фрагментов, образующихся на мишени ^{12}C , качественно согласуется с оценками, приведёнными в [1,2], и открывает путь для исследования с широким набором ядер, включая короткоживущие изотопы.

В заключение авторы благодарят сотрудников отдела ускорителя и отдела пучков за создание максимально благоприятных условий для измерений.

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-02-00215.

Список литературы

- [1] М.Ю. Боголюбский, А.Ю. Бордановский, А.А. Волков, Д.К. Елумахов, В.П. Ефремов, А. Ю. Калинин, А. Н. Криницын, В. И. Крышкин, Н.В. Кулагин, В. В. Скворцов, В.В. Талов, Л.К. Турчанович, Препринт ИФВЭ 2013-11, Протвино, 2013.
- [2] М.Ю. Боголюбский // ПТЭ 2014, № 5, с 7 — 17.
- [3] Н.И. Божко, А.А. Борисов, А.С. Вовенко, А.А. Волков, В.Ю. Глебов, А.В. Куликов, В.В. Лапин, А.И. Мухин, Ю.И. Соломатин, Р.М. Фахрутдинов // ЯФ 31, 1494 (1980).
- [4] А.А. Балдин, Я.А.Бердников, А.И. Берлёв, А.Ю. Бордановский, Ю.Т. Борзунов, А.А. Волков, В.П. Ефремов, А.Е. Иванов, А.Ю. Калинин, В.Т. Ким, А.В. Константинов, А.В. Кораблёв, В.И. Корешев, А.Н. Криницын, В.И. Крышкин, И.В. Кудашкин, Н.В. Кулагин, А.А. Логинов, В.А. Мурзин, В.А. Орешкин, Е.Б. Плеханов, В.В. Скворцов, В.В. Талов, Л.К. Турчанович, С.С. Шиманский, Препринт ИФВЭ 2011-32, Протвино, 2011.
- [5] В.В. Абрамов, А.В. Алексеев, Б.Ю. Балдин., В.Г. Васильченко, А.А. Волков, А.О. Ефимов, Ю.П. Корнеев, А.И. Ронжин. Препринт ИФВЭ 83- 180, Протвино, 1983 // Nuc. Inst. and Meth. A235, 497 (1985).
- [6] А.А. Волков, А.Ю. Калинин, А.В. Кораблёв, А. Н. Криницын, В. И. Крышкин, В. В. Скворцов, В. В. Талов, Л. К. Турчанович // arXiv: 0912.4382, ПТЭ 4, 37 (2010).
- [7] Arata Hayashigaki, Proton and anti-proton production in the forward region of d+Au collisions at RHIC from the color glass condensate // arXiv:hep-ph/0604173v1, 20 Apr. 2006; Nucl.Phys. A775 (2006) 51-68.
- [8] Rudolph C. Hwa, C. B. Yang, Forward Production With Large p/π Ratio and Without Jet Structure at Any p_T // arXiv:nucl-th/0605037v4, 29 May 2007; Phys. Rev. C.76 (2007).
- [9] Gaku Mitsuka, Forward hadron production in ultra-peripheral proton-heavy-ion collisions at the LHC and RHIC // Eur. Phys. J. C (2015) 75: 614; <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3848-0>.

- [10] J. Nemchik I.K. Potashnikova. Forward Physics in Proton-Nucleus and Nucleus-Nucleus Collisions // arXiv: 0807.1605v1.
- [11] В.В. Абрамов, Б.Ю. Балдин, А.Ф. Бузулуцков, В.Г. Васильченко, А.А. Волков, В.Ю. Глебов, А.С. Дышкант, В.Н. Евдокимов, А.О. Ефимов, В.В. Змушко, А.Н. Криницын, В.И. Крышкин, М.И. Мутафян, В.М. Подставков, А.И. Ронжин, Р.М. Суляев, Л.К. Турчанович // ЯФ 45, 1362 (1987).
- [12] M. Bonesini. Deuteron production in p-Be interactions at 450 GeV/c and the coalescing model // arXiv:0712.4367v1; J. Phys. Conf. Ser. 110, 032004 (2008).

Рукопись поступила 31 августа 2016 г.

Боголюбский М.Ю. и др.

Образование частиц в переднем направлении в рА- взаимодействиях при импульсе 25 и 50 ГэВ/с и СА-взаимодействиях при энергии 25 ГэВ/н.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	05.09.2016	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.
Печ.л. 1.	Уч.– изд.л. 1,3.	Тираж 80.	Заказ 13.
Индекс 3649.			

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»

142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2016-10,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2016
