



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2019-4

А.Г. Афонин, М.Ю. Боголюбский, А.А. Волков, Д.К. Елумахов,
В.Н. Запольский, А.А. Иванюков, А.Ю. Калинин, А.Н. Криницын,
Н.В. Кулагин, В.И. Крышкин, Д.И. Паталаха, К.А. Романишин,
В.В. Скворцов, В.В. Талов, Л.К. Турчанович, Ю.А. Чесноков

**Измерение сечений инклюзивного образования
заряженных адронов в переднем направлении
в углерод - углеродных столкновениях
при энергии пучка 19.6 ГэВ на нуклон**

Направлено в ЯФ

Протвино 2019

Аннотация

Афонин А.Г. и др. Измерение сечений инклюзивного образования заряженных адронов в переднем направлении в углерод - углеродных столкновениях при кинетической энергии пучка 19.6 ГэВ на нуклон: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2019-4. – Протвино, 2019. – 13 с., 7 рис., 2 табл.

Измерены инвариантные сечения образования заряженных адронов вперёд под нулевым углом в углерод - углеродных столкновениях при кинетической энергии 19.6 ГэВ на нуклон на ускорительном комплексе У-70. Эксперимент проводился на комбинированном спектрометре, который включал в себя канал №22 и детекторы установки ФОДС. Магнитная жёсткость канала изменялась в диапазоне от 7 до 70 ГэВ/с. Результаты сравниваются с предсказаниями модели FTFP и автомодельного подхода.

Abstract

Afonin A.G. et al. Cross Section of secondary particles production in forward direction in 19.6 A GeV carbon - carbon interactions: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2019-4. – Protvino, 2019. – p. 13, figs. 7, tabl. 2.

Measurements of the invariant cross sections for charged hadrons produced forward at zero angle in CC-collisions at beam kinetic energy 19.6 GeV/n have been performed at the accelerator U-70. For particle detection we use combined spectrometer built from the beam line 22 and detectors of the modified FODS setup. Beam line rigidity was varied from 7 to 70 GeV/c. Results compared with FTFP and self-similar solution for nucleus - nucleus collisions.

Введение

Появление углеродного пучка на ускорительном комплексе У-70 открывает новые возможности для изучения релятивистской ядерной физики, в частности, в экспериментах по рождению частиц и ядерных фрагментов.

Существующие данные по выходам адронов и ядерных фрагментов в АА - взаимодействиях в экспериментах с фиксированными мишенями были получены при более низких энергиях (0,3-14 ГэВ/нуклон) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. В данной работе рассматривается образования адронов вперёд под малыми углами (менее 3 мрад) к оси пучка в углерод - углеродных столкновениях при энергии 19,6 ГэВ на нуклон. Проведённое исследование является логическим продолжением эксперимента по образованию частиц в переднем направлении для рА и АА - взаимодействий [9]. Для измерений использовался комбинированный спектрометр, состоящий из канала №22 ускорительного комплекса У-70 [10] и одного из плеч экспериментальной установки ФОДС [11].

Монте-Карло моделирование эксперимента проводилось с использованием Geant4 (версия 10.02.p02) [12]. Полученные экспериментальные данные сравниваются с существующими данными из других экспериментов, предсказаниями модели FTFR (Fritiof) [13, 14] и с расчётами по феноменологической параметризации сечений А.А. Балдина [15], основанной на автомодельном подходе к процессам ядерных столкновений [16, 17], с использованием в качестве аргумента, введённой В.С. Ставинским, минимальной энергии сталкивающихся конститuentов [18] (далее по тексту эти расчёты именуется как автомодельный подход).

1. Постановка эксперимента

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Выведенный из ускорителя углеродный пучок попадает на ядерную мишень, установленную после магнита М1. Использовалась углеродная мишень длиной 2 см. и диаметром 3 см. Для

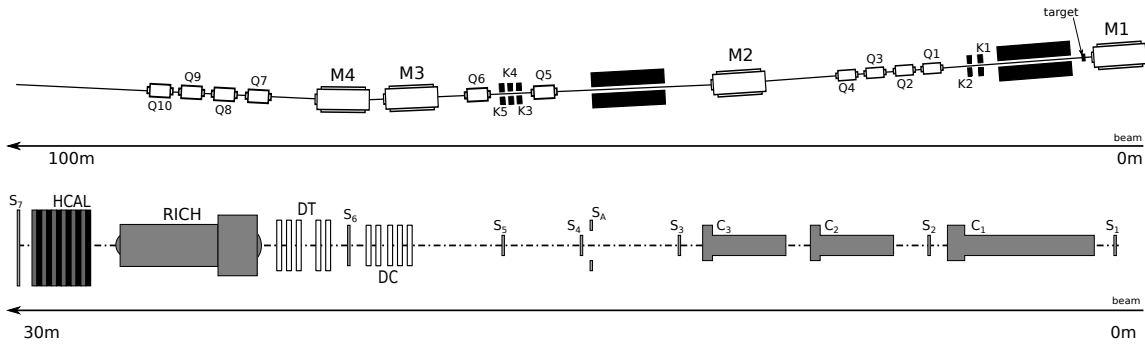


Рис. 1. Схематичное изображение 22 канала (сверху) и регистрирующей установки (снизу). Направление пучка - справа налево. M - магниты, Q - квадрупольные линзы, K - коллиматоры, сплошными чёрными прямоугольниками показана защита. S - сцинтилляционные счётчики, C - пороговые черенковские счётчики, DC - дрейфовые камеры, DT - дрейфовые трубки, $RICH$ - спектрометр колец черенковского излучения (СКОЧ), $HCAL$ - адронный калориметр.

изучения фона проводились дополнительные измерения без мишени. Интенсивность пучка составляла около 10^9 ядер углерода за цикл при длительности вывода 1.2 с, и измерялась при помощи ионизационной камеры [19]. Углеродный пучок на мишени в плоскости, перпендикулярной к его оси, имел размеры пятна приблизительно 4мм по вертикали и 12мм по горизонтали. Профили пучка близки к распределению Гаусса. В начале эксперимента параметры пучка измерялись посредством радиохромной дозиметрической плёнки и в дальнейшем периодически контролировались с помощью подвижного сцинтилляционного счётчика.

Вторичные частицы захватывались каналом и транспортировались до детекторов установки. Регистрация отрицательно заряженных частиц проводилась с раскрытыми коллиматорами канала. При этом телесный угол захвата частиц в канал составлял 35 мккр, а их импульсный разброс $\sigma_p/p_0 \simeq 2,4\%$.

При работе с вторичным пучком положительно заряженных частиц интенсивность ограничивалась изменением раскрытия коллиматоров. В этом случае телесный угол захвата частиц в канал составлял 3,4 мккр, а импульсный разброс $\sigma_p/p_0 \simeq 1,2\%$.

Анализирующая часть установки, показанной на нижней части рис. 1, состоит из набора пороговых черенковских счётчиков, сцинтилляционных счётчиков, трековой системы [20], спектрометра колец черенковского излучения [21](СКОЧ) и адронного калориметра [22].

2. Обработка экспериментальных данных

Отбор одиночных частиц и определение их заряда проводились по амплитуде сигналов со сцинтилляционных счётчиков. Амплитуды от одиночной частицы, нескольких частиц и частиц большего заряда будет значительно различаться, так как сигналы со счётчиков пропорциональны сумме квадратов зарядов прошедших частиц.

При анализе экспериментальных данных выбиралась лучшая гипотеза относительно заряда прошедшей частицы, количества прошедших частиц и возможного изменения заряда в процессе пролёта через вещество установки (например из-за распада или взаимодействия), с учётом амплитудного разрешения счётчиков. При помощи трековой системы определялись углы вхождения частиц в СКОЧ относительно оси канала. Дополнительно проводился отбор событий по количеству треков для подавления фона от взаимодействий в веществе установки и распадов ядерных фрагментов. Критерием являлось наличие единственного трека в событии. Полученные значения углов, заряда и заданная магнитная жёсткость канала позволяли отобрать срабатывания в СКОЧ и восстановить массу частицы. Необходимо отметить, что СКОЧ регистрирует фотоны черенковского света с углами от 40 до 120 мрад относительно оси детектора, а максимальный угол черенковского излучения для релятивистских частиц составляет 93 мрад. Поэтому, для идентификации частиц, не дающих кольца черенковского света в детекторе, например, антипротонов с импульсами меньше 10 ГэВ/с, требовалось наличие единственного трека при отсутствии сигнала в СКОЧ. Пороговые черенковские счётчики были необходимы для дополнительного выделения частиц, сечения образования которых сравнимы с остаточным фоном в распределении реконструированных масс. Адронный калориметр использовался в первую очередь для подавления мюонов, неотличимых из-за разрешения СКОЧ от π^+ , π^- -мезонов, и для подавления событий, в которых энергия частиц, с учётом всех восстановленных параметров, не согласуется с магнитной жёсткостью канала.

Критически важным для эксперимента являлся расчёт аксептанса канала и экспериментальной установки, а также учёт выбывания вторичных частиц за счёт распадов и взаимодействий в веществе. Для этого были проведены Монте-Карло расчёты в Geant4 и соответствующие поправки были вычислены с учётом экспериментальных критериев отбора событий [23].

Инвариантные сечения образования частиц вычислялись из измеренных нормированных выходов частиц из мишени, аксептанса установки и поправок, связанных с распадами частиц и их взаимодействием в веществе. В таблицах 1 и 2 представлены полученные инвариантные сечения образования адронов.

3. Систематические ошибки измерений

Основную неопределённость в результаты данных измерений вносят систематические ошибки нормировки сечений. Ошибка калибровки ионизационного монитора составляет около 30%. Монте-Карло моделирование показало сильную зависимость геометрического аксептанса канала от размера пучка и его смещения от оси канала. Из-за этого нормировка зависит от стабильности положения пучка и его размера, что также приводит к неопределённости в вычитании фона, составляющего примерно половину от всех регистрируемых событий. Так как в эксперименте отсутствовали точные средства контроля профиля и положения пучка можно только сделать оценку систематики и сравнить её с реальным разбросом в данных. При измерениях отрицательно заряженных частиц с открытыми коллиматорами ожидается неопре-

делённость в нормировке в 2-3%, для положительно заряженных частиц - 15-20%. Для проверки оценок систематических ошибок выборочно было проведено несколько повторных измерений. Для полученных выходов положительных частиц разница составила 15%, для отрицательных - 4%, что согласуется с оценками из Монте-Карло расчётов.

Ещё один вклад в ошибку измерений вносит неопределённость в значении магнитной жёсткости канала. Она оценивается в 1-2% от выставленного значения и предполагается, что этот относительный сдвиг будет общим для всех измеренных точек.

Также на качество результата влияют примеси посторонних частиц и ядер в пучке. Для измерения состава пучка проводился его анализ, без мишени, с минимально возможной интенсивностью и магнитной жёсткостью канала, соответствующей импульсу углеродного пучка. При этом стабильно наблюдался состав: 90% ^{12}C , 1% ^6Li , 6% ^4He , 3% d . Расчёты методом Монте-Карло показали, что изменение содержания углерода в пучке до 80% не должно давать ошибку в сечениях более 5%.

И последним фактором, который может исказить результаты эксперимента, является примесь вторичных частиц образовавшихся не в мишени, а в результате взаимодействий в веществе канала или детекторов установки. Моделирование показало, что вклад от таких частиц не превышает 1%. Это связано с тем, что они хорошо отбраковываются по энерговыделению в калориметре и реконструированной в СКОЧ массе.

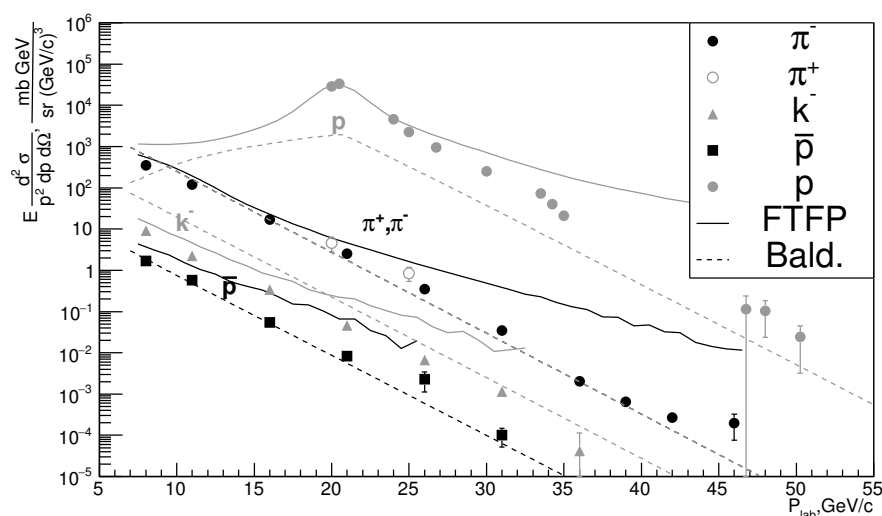


Рис. 2. Сечения образования частиц в углерод - углеродных столкновениях при энергии 19.6 ГэВ/нуклон. Символами показаны экспериментальные данные, сплошными линиями представлены расчёты по модели FTFF [13], пунктирными - автомодельного подхода (Bald.) [15]. Приведены только статистические ошибки.

4. Анализ результатов эксперимента

На рис. 2 представлены полученные инвариантные сечения образования адронов в сравнении с оценками, сделанными для различных моделей. Сравнение с предсказаниями модели FTFR, с учётом систематических ошибок, показывает качественное согласие данных при импульсах, меньших чем средний импульс на нуклон в пучке углерода, и значительное расхождение в наклонах сечений при больших импульсах. Автомодельный подход хорошо описывает наклоны сечений для антипротонов, π^+ , π^- и k^- - мезонов. Тем не менее наблюдается значительная разница в абсолютных значениях, что может быть связано со значениями нормировочных констант в модели, полученных при сравнительно малых энергиях. С другой стороны, наблюдается явное несоответствие предсказаний автомодельного подхода для сечений образования протонов. Это можно объяснить тем, что модель не учитывает вклад от фрагментации углеродного пучка.

4.1. Отрицательно заряженные частицы

Автомодельный подход описывает сечение образования частиц как:

$$E \frac{d^3\sigma}{d^3P} = C_1 A_b^{\alpha(X_1)} A_t^{\alpha(X_2)} e^{-0.5\sqrt{S_{min}}/(m_p C_2)}, \quad (1)$$

где C_1, C_2 - константы, $\alpha(X) = (1 + X)/3$ - параметризация А-зависимости, m_p - масса протона, $S_{min} = (X_1 P_1 + X_2 P_2)^2$ - минимальная энергия, необходимая для рождения инклюзивной частицы данного импульса (см. [18]), P_1, P_2 - четырехимпульсы сталкивающихся ядер, X_1, X_2 - минимально необходимая доля четырехимпульса для реакции. При этом было показано [15], что наклоны сечений в зависимости от S_{min} приблизительно совпадают для разных сортов частиц и различных энергиях пучков.

Поэтому интересно сравнить полученные наши результаты с уже существующими данными по образованию частиц вперед в АА-взаимодействиях. На рис. 3 приведено такое сравнение с данными из [3, 7, 8]. Как видно из рисунка, зависимости сечения от переменной S_{min} имеют близкие наклоны и несколько отличаются по нормировке. Полученные значения параметра C_2 совпадают в пределах погрешностей и, в среднем, равны 0.138 ± 0.002 . Из-за больших ошибок нормировки в подобных экспериментах сравнение абсолютных значений C_1 довольно затруднительно, но их можно использовать для изучения поведения отношений разных сортов частиц от энергии пучка. На рис. 4 приведено отношение параметров C_1 для разных сортов частиц в зависимости от полной энергии нуклон-нуклонного взаимодействия, полученное из данных [7, 8] и этой работы. Наблюдается изменение соотношений частиц с ростом полной энергии.

В рамках автомодельного подхода это можно объяснить тем, что с ростом энергии вклад ненаблюдаемых частиц уже не является пренебрежимым и, как показано в [15], может значительно влиять на сечение образования инклюзивной частицы.

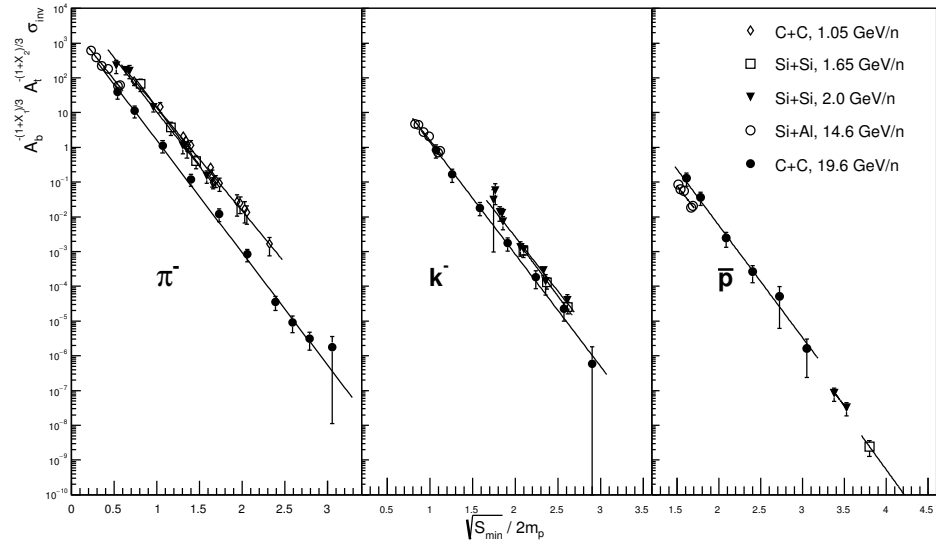


Рис. 3. Сечения образования частиц в АА-столкновениях при различных энергиях в зависимости от минимальной энергии сталкивающихся конstituентов, необходимой для рождения инклюзивной частицы, нормированной на 2 массы протона. Прямые линии - аппроксимация данных экспоненциальной функцией с фиксированным наклоном.

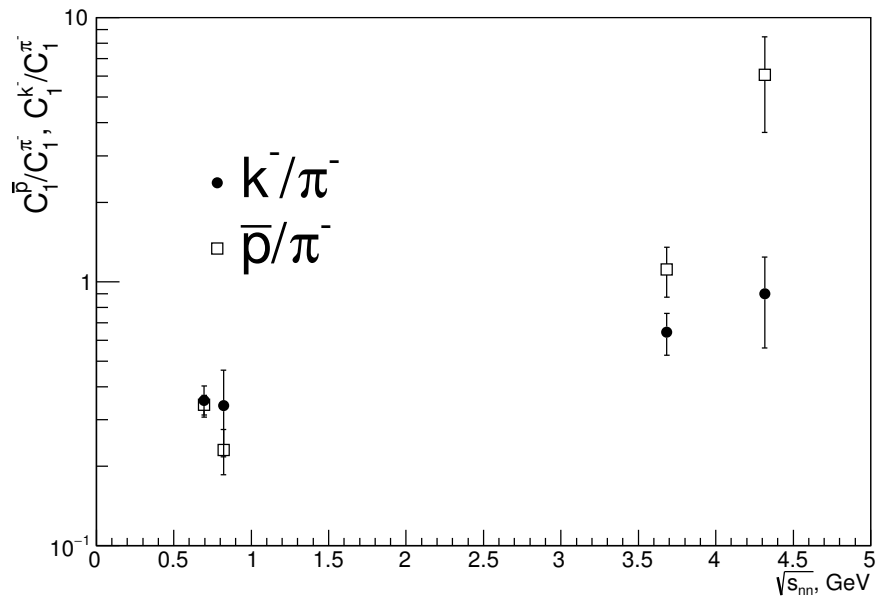


Рис. 4. Отношение параметров C_1 из 1 для различных сортов частиц в зависимости от полной энергии нуклон-нуклонного взаимодействия.

4.2. Протоны

При изучении кумулятивного рождения частиц [24, 25] (т.е. выше границы нуклон-нуклонного взаимодействия) было отмечено, что сечения образования протонов хорошо описываются суммой двух экспонент:

$$\sigma_{inv}(T_{kin}) = c_1 e^{-T_{kin}/T_1} + c_2 e^{-T_{kin}/T_2} \quad (2)$$

Как правило, коэффициенты c_1 и c_2 называют мощностями испарительных и кумулятивных процессов, а T_1 и T_2 - их температурой, T_{kin} - кинетическая энергия частицы в системе покоя фрагментирующего ядра. На рис. 5 представлены сечения образования протонов в зависимости от их кинетической энергии в сравнении с результатами других экспериментов [2],[26],[27], - а также их аппроксимация функцией 2. Как видно, сечения образования протонов близки в широком диапазоне энергий. Различия можно объяснить систематическими ошибками в экспериментах. При этом наблюдается сильная зависимость от фрагментирующего ядра. Параметр T_1 соответствует импульсам ферми-движения нуклонов в ядре и практически не зависит от энергии. Интерес представляет полученное значение температуры кумулятивных процессов T_2 , которое возможно определяется вкладом многонуклонных состояний и ненуклонных степеней свободы ядра [28].

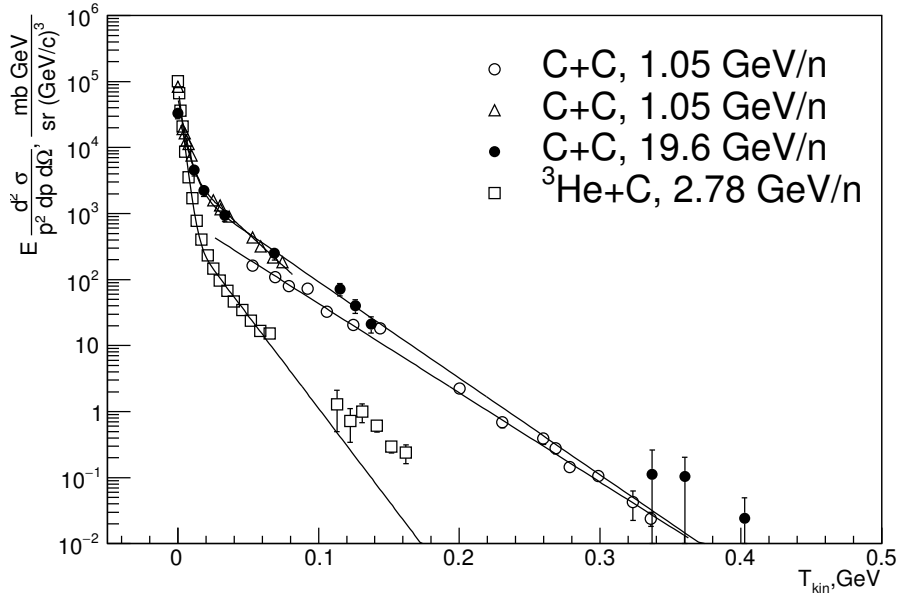


Рис. 5. Сечение образования протонов в АА-взаимодействиях в зависимости от кинетической энергии протона в системе покоя фрагментирующего ядра.

На рис. 6 показано полученное значение T_2 в сравнении с результатами других экспериментов [2, 26, 27, 29, 30, 31]. Наблюдается существенное различие параметров T_2 в разных экспериментах, что может быть связано с зависимостью сечений от

поперечного импульса регистрируемых частиц или неучтёнными систематическими ошибками и требует дальнейшего изучения. Тем не менее, данный результат полезен для настройки генераторов физических процессов, так как это первый экспериментальный результат полученный при такой энергии пучка.

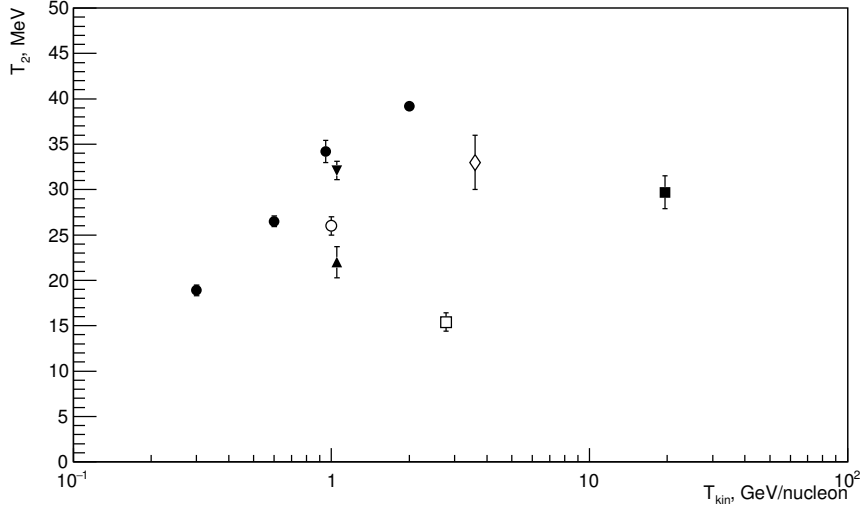


Рис. 6. Оценка параметра T_2 из формулы 2 в зависимости от кинетической энергии пучка. ■ - эта работа, □ - $^{12}C(^3He, p)x$ (0°) [27], ● - $^9Be(^{12}C, p)x$ (3.5°) [31], ○ - $^{197}Au(^{197}Au, p)x$ (160°) [30], ▼ - $^{12}C(^{12}C, p)x$ (180°) [26], ▲ - $^{12}C(^{12}C, p)x$ (0°) [2], ◇ - $^{12}C(^{12}C, p)x$ (160°) [29].

Помимо этого, интересно интерпретировать результаты в рамках кварк - кластерной модели [32]. В ней ядра рассматриваются как набор нуклонных кластеров. Теоретическое выражение для функции сечения имеет вид:

$$\sigma_{inv}(x) = c_0(c_1g(x)w_1 + \sum_2^{A-1} c_i b_i(x)w_i) \quad (3)$$

где c_0 - общий множитель, c_i - известные из модели нормировочные константы, w_i - вклады от нуклонных кластеров, такие что $\sum w_i = 1$, $g(x)$ - функция Гаусса, b_i - функции вкладов нуклонных кластеров предсказанные в модели, x - отношение импульса вторичного протона в лабораторной системе к среднему импульсу нуклона в ядрах пучка. На рис. 7 показана аппроксимация дифференциальных сечений протонов функцией 3. Как видно, имеющиеся данные, из-за быстрого падения сечения, позволяют сделать оценку только для вкладов одно-, двух- и трехнуклонных кластеров. Величина w_2 равна 0.18 ± 0.03 , а w_3 равна 0.004 ± 0.001 . Необходимо заметить, что теоретическое предсказание имеет «ступенчатую» форму, плохо описывающую экспериментальные данные, что было учтено при вычислении ошибок w_2 и w_3 . Скорее всего различие связано с неучтенными в модели факторами, например, внутренним движением кластеров в ядре.

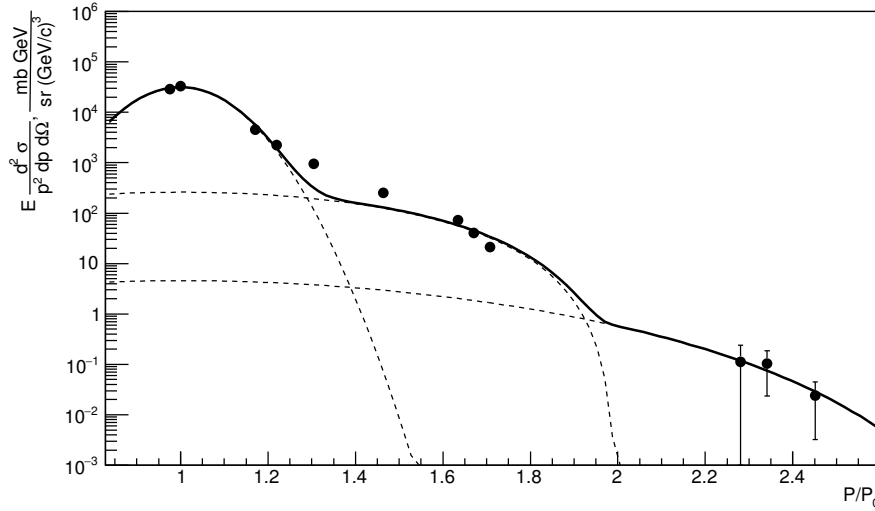


Рис. 7. Инвариантное сечение образования протонов в углерод - углеродных столкновениях при энергии 19.6 ГэВ/нуклон в зависимости от отношения импульса протона в лабораторной системе к среднему импульсу нуклона в ядре пучка. Пунктирными линиями показаны вклады от одно-, двух- и трехнуклонных вкладов в кварк-кластерной модели, сплошной — суммарное распределение.

Этот результат выше чем полученный в [4]: $w_2 = 0.098 \pm 0.018$, $w_3 = 0.006 \pm 0.001$, и довольно близок к [33]: $w_2 = 0.193 \pm 0.041$, $w_3 = 0.0055 \pm 0.0017$.

Заключение

В работе представлены результаты эксперимента на ускорительном комплексе ИФВЭ по образованию заряженных адронов под нулевым углом вперед в углерод - углеродных взаимодействиях с кинетической энергией частиц пучка 19.6 ГэВ/нуклон.

Получены сечения образования π^+ , π^- , k^- , p и \bar{p} в диапазоне импульсов от 8 до 48 ГэВ/с, которые существенно дополняют результаты экспериментов при более низких энергиях ядерных пучков.

Совместный анализ с существующими экспериментальными данными показывает, что поведение сечений в зависимости от минимальной энергии сталкивающихся конститuentов, необходимой для рождения инклюзивной частицы, совпадает при малых и больших энергиях сталкивающихся ядер.

Сравнение измеренных сечений с теоретическими предсказаниями некоторых моделей, показывает существенные расхождения в области больших импульсов адронов.

Данная работа поддержана грантом РФФИ № 19-02-00278.

$p, GeV/c$	$\sigma, (mb GeV)/(sr(GeV/c)^3)$		
	π^-	k^-	\bar{p}
8.0	$3.51e+02 \pm 8.56e-01$	$9.12e+00 \pm 4.07e-01$	$1.70e+00 \pm 6.33e-02$
11.0	$1.21e+02 \pm 3.07e-01$	$2.23e+00 \pm 8.19e-02$	$5.80e-01 \pm 2.27e-02$
16.0	$1.70e+01 \pm 5.57e-02$	$3.40e-01 \pm 1.23e-02$	$5.51e-02 \pm 5.11e-03$
21.0	$2.55e+00 \pm 9.71e-03$	$4.61e-02 \pm 1.80e-03$	$8.20e-03 \pm 1.17e-03$
26.0	$3.53e-01 \pm 5.04e-03$	$6.65e-03 \pm 9.90e-04$	$2.27e-03 \pm 1.15e-03$
31.0	$3.43e-02 \pm 7.41e-04$	$1.14e-03 \pm 2.08e-04$	$1.00e-04 \pm 4.80e-05$
36.0	$2.04e-03 \pm 1.16e-04$	$4.19e-05 \pm 7.13e-05$	
39.0	$6.45e-04 \pm 7.76e-05$		
42.0	$2.67e-04 \pm 4.25e-05$		
46.0	$1.99e-04 \pm 1.23e-04$		

Таблица 1. Сечения отрицательно заряженных частиц, приведены только статистические ошибки.

$p, GeV/c$	$\sigma, (mb GeV)/(sr(GeV/c)^3)$	
	p	π^+
20.0	$2.88e+04 \pm 1.47e+02$	$4.62e+00 \pm 1.81e+00$
20.5	$3.32e+04 \pm 1.17e+02$	
24.0	$4.55e+03 \pm 2.80e+01$	
25.0	$2.23e+03 \pm 1.59e+01$	$8.52e-01 \pm 3.14e-01$
26.8	$9.44e+02 \pm 1.24e+01$	
30.0	$2.51e+02 \pm 8.65e+00$	
33.5	$7.22e+01 \pm 2.97e+00$	
34.2	$4.03e+01 \pm 2.51e+00$	
35.0	$2.13e+01 \pm 2.08e+00$	
46.8	$1.13e-01 \pm 1.28e-01$	
48.0	$1.05e-01 \pm 8.12e-02$	
50.5	$2.42e-02 \pm 2.10e-02$	

Таблица 2. Сечения положительно заряженных частиц, приведены только статистические ошибки.

Список литературы

- [1] D. Greiner, P. Lindstrom, H. Heckman, B. Cork, F. Bieser, (1975). Lawrence Berkeley National Laboratory. LBL-3651. <https://escholarship.org/uc/item/61d374rt>.
- [2] L. Anderson, W. Bruckner, E. Moller, S. Nagamiya, S. Nissen-Meyer, L. Schroeder, G. Shapiro and H. Steiner, *Phys. Rev. C.* **28**, 1224 (1983). doi:10.1103/PhysRevC.28.1224.
- [3] L. Anderson, W. Bruckner, E. Moller, S. Nagamiya, S. Nissen-Meyer, L. Schroeder, G. Shapiro and H. Steiner, *Phys. Rev. C.* **28**, 1246 (1983). doi:10.1103/PhysRevC.28.1246.
- [4] Б.М. Абрамов, П.Н. Алексеев, Ю.А. Бородин, С.А. Булычев, И.А. Духовской, А.П. Крутенкова, В.В. Куликов, М.А. Мартемьянов, М.А. Мацюк, Е.Н. Турдакина, А.И. Ханов, Письма в ЖЭТФ, т. **97**, вып. 8, с. 509 (2013). doi:10.1134/S002136401308002X.
- [5] В.М. Abramov, P.N. Alekseev, Yu.A. Borodin, S.A. Bulychjov, I.A. Dukhovskoy, A.P. Krutenkova, V.V. Kulikov, M.A. Martemianov, M.A. Matsyuk, S.G. Mashnik, E.N. Turdakina, A.I. Khanov, *Phys. Atom. Nucl.* **78**, no. 3, 373 (2015). doi:10.1134/S1063778815020039.
- [6] A.V. Efremov, A.B. Kaidalov, G.I. Lykasov, N.V. Slavin, *Phys. Atom. Nucl.* **57**, 874 (1994).
- [7] M. Aoki, J. Beatty, D. Beavis, J.B. Carroll, J. Chiba, H.J. Crawford, R. Debbe, T. Doke, J. Engelage, L. Greiner, R.S. Hayano, T.J. Hallman, H.H. Heckman, T. Kashiwagi, J. Kikuchi, P.N. Kirk, P.J. Lindstrom, S. Nagamiya, P. Stankus, К.Н. Tanaka, Y. Shimizu, Z.F. Wang, *Phys. Rev. Lett.* **69** (1992) 2345, doi:10.1103/PhysRevLett.69.2345.
- [8] A. Shor, E.F. Barasch, J.B. Carroll, T. Hallman, G. Igo, G. Kalnins, P. Kirk, G.F. Krebs, P. Lindstrom, M.A. McMahan, V. Perez-Mendez, S. Trentalange, F.J. Urban, Z. F. Wang, *Phys. Rev. Lett.* **63** (1989) 2192, doi:10.1103/PhysRevLett.63.2192.
- [9] М.Ю. Боголюбский, А.Ю. Бордин, А.А. Волков, Д.К. Елуманов, В.П. Ефремов, А.А. Иванюк, А.Ю. Калинин, А.Н. Кричитин, В.И. Крышкин, Н.В. Кулагин, Д.И. Патакха, В.В. Скворцов, В.В. Талов, Л.К. Турчанович, *Phys. Atom. Nucl.* **80**, no. 3, 455 (2017), doi:10.1134/S1063778817020090.
- [10] А.Г. Афонин и др., Препринт ИФВЭ 90-38, Протвино 1990.
- [11] В.В. Абрамов, Б.Ю. Балдин, А.Ф. Бузулуцков, А.А. Волков, В.Ю. Глебов, П.И. Гончаров, А.Н. Гуржиев, А.С. Дышкант, В.Н. Евдокимов, А.О. Ефимов,

- Ю.П. Корнеев, А.Н. Криницын, В.И. Крышкин, М.И. Мутафян, В.М. Подставков, А.И. Ронжин, Р.М. Суляев, Л.К. Турчанович, Приборы и техника эксперимента, т. 35, № 6, с. 75-88 (1992).
- [12] <http://geant4.cern.ch/support/ReleaseNotes4.10.2.html>
- [13] <http://geant4.cern.ch/support/procmocatalog/models/hadronic/FTFP.html>
- [14] V. Uzhinsky, Proceedings of SNA + MC2010: Joint international conference on supercomputing in nuclear applications + Monte Carlo 2010 Tokyo, p. 1630, Japan.
- [15] A.A. Baldin, Phys. Atom. Nucl. **56(3)**, 385-388, (1993).
- [16] А.М. Балдин, Краткие сообщения по физике, №1, с. 35-39, 1971 г.
- [17] Ю.Д. Баюков, Л.С. Воробьев, Г.А. Лексин, В.Л. Столин, В.Б. Федоров, В.Д. Хованский, Ядерная физика, 1973, т.18, вып. 6, с. 1246-1250.
- [18] В.С. Ставинский, Краткие сообщения ОИЯИ №18-86, с. 5, 1986.
- [19] A. G. Afonin, V. N. Gres and V. I. Terekhov, Proceedings, 6th European conference, EPAC'98, Stockholm, Sweden, June 22-26, 1998, pp 1613-1614.
- [20] М.Ю. Боголюбовский, А.А. Волков, Д.К. Елумахов, А.А. Иванилов, А.Ю. Калинин, А.Н. Криницын, В.И. Крышкин, Н.В. Кулагин, Д.И. Паталаха, К.А. Романишин, В.В. Скворцов, В.В. Талов, Л.К. Турчанович, Препринт НИЦ "Курчатовский институт ИФВЭ 2018-12, Протвино, 2018, принято в ПТЭ.
- [21] V.V. Abramov, A.V. Alekseev, B.Yu. Baldin, V.G. Vasil'chenko, A.A. Volkov, Yu.N. Vrazhnov, A.O. Efimov, Yu.P. Korneev, V.I. Kryshkin, V.E. Rakhmatov, A.I. Ronzhin, V.I. Rykalin, R.M. Sulyaev, Nucl. Instrum. Meth. A **235**, 497 (1985), doi:10.1016/0168-9002(85)90099-3.
- [22] A.A. Volkov, A.Y. Kalinin, A.V. Korablev, A.N. Krinitsyn, V.I. Kryshkin, V.V. Skvortsov, V.V. Talov and L.K. Turchanovich, Instrum. Exp. Tech. **53**, 500 (2010), doi:10.1134/S0020441210040056.
- [23] М.Ю. Боголюбовский, Д.К. Елумахов, А.А. Иванилов, А.Н. Криницын, Препринт НИЦ «Курчатовский Институт» - ИФВЭ 2018-13, направлено в ПТЭ.
- [24] В.К. Лукьянов, А.И. Титов, Физика элементарных частиц и атомного ядра, **10**, 815 (1979).
- [25] В.К. Бондарев, Физика элементарных частиц и атомного ядра, **28**, 13 (1997).
- [26] J. V. Geaga, S. A. Chessin, J. Y. Grossiord, J. W. Harris, D. L. Hendrie, L. S. Schroeder, R. N. Treuhaft and K. Van Bibber, Phys. Rev. Lett. **45** (1980) 1993, doi:10.1103/PhysRevLett.45.1993.

- [27] В.Г. Аблеев, Д.В. Анчишкин, Х. Димитров, С.А. Запорожец, А.П. Кобушкин, Л.В. Малинина, А.А. Номофилов, Н.М. Пискунов, И.М. Ситник, Е.А. Строковский, Л.Н. Струнов, В.И. Шаров, *Письма в ЖЭТФ*, **43**(10), 467-469 (1987).
- [28] S. V. Bekh, A. P. Kobushkin and E. A. Strokovsky, *Ukr. J. Phys.* **62** (2017) no.11, 927 doi:10.15407/ujpe62.11.927, [arXiv:1704.07662 [nucl-th]].
- [29] M.Kh. Anikina, G.L. Vardenga, A.I. Golokhvastov, V.P. Kondratev, L.V. Krasnov, Yu.A. Lakomkin, V.F. Litvin, Yu.R. Lukstinsh, E.O. Okonov, I.V. Stepanov, S.A. Khorozov, I.E. Shevchenko, I.G. Yatsyshin, *Sov. J. Nucl. Phys.* **43**, 780 (1986).
- [30] T. Odeh *et al.* [ALADIN Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 4557, doi:10.1103/PhysRevLett.84.4557.
- [31] B.M. Abramov, P.N. Alexeev, Yu.A. Borodin, S.A. Bulychjov, K.K. Gudima, I.A. Dukhovskoy, A.P. Krutenkova, V.V. Kulikov, M.A. Martemianov, M.A. Matsyuk, E.N. Turdakina, A.I. Khanov, *Phys. Atom. Nucl.* **81** (2018) no.3, 330, doi:10.1134/S106377881803002.
- [32] A. V. Efremov, A. B. Kaidalov, G. I. Lykasov and N. V. Slavin, *Phys. Atom. Nucl.* **57** (1994) 874.
- [33] K. S. Egiyan *et al.* [CLAS Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **96** (2006) 082501, doi:10.1103/PhysRevLett.84.4557.

Рукопись поступила 29 июля 2019 г.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

А.Г. Афонин и др.

Измерение сечений инклюзивного образования заряженных адронов в переднем направлении в углерод - углеродных столкновениях при кинетической энергии пучка 19.6 ГэВ на нуклон.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л^AT_EX**.

Подписано к печати 31.07.2019. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 80. Заказ 5. Индекс 3649.

НИИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

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

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2019–4,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2019
