Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 9, с. 593 – 597

Энергетические характеристики спектров p, $\pi^{\pm}$, $K^{\pm}$ и $\bar{p}$, рожденных с поперечным импульсом $p_T > 1$ ГэВ/с в протон-ядерных взаимодействиях при энергии пучка 50 ГэВ

Н. Н. Антонов[+], *И. А. Васильев*[+], *В. А. Викторов*[+], *В. А. Гапиенко*[+1)], *Г. С. Гапиенко*[+], *А. Ф. Прудкогляд*[+], *Ф. Н. Новоскольцев*[+], *И. П. Солодовников*[+], *В. И. Терехов*[+], *М. Н. Уханов*[+], $\boxed{\text{С. С. Шиманский}^*}$

[+]*Институт физики высоких энергий, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 142281 Протвино, Россия*

[*]*Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия*

Поступила в редакцию 24 февраля 2026 г.
После переработки 17 марта 2026 г.
Принята к публикации 30 марта 2026 г.

В диапазоне поперечных импульсов 1–2.7 ГэВ/с были измерены спектры кумулятивных p, $\pi^{\pm}$, $K^{\pm}$ и $\bar{p}$, рожденных под углом 40° (лаб. сист.) в протон-ядерных взаимодействиях при начальной энергии 50 ГэВ. Спектры кумулятивных частиц рассмотрены как функции кинетической энергии. Данные получены в эксперименте СПИН при облучении четырех ядерных мишеней C, Al, Cu и W протонным пучком, выведенным из ускорителя У70 (ИФВЭ, Протвино).

DOI: 10.7868/S3034576626050016

Эксперимент СПИН (Search for Peculiarities Inside Nuclei) проводит систематическое исследование образования кумулятивных частиц с большими поперечными импульсами в $p + A$ и $A + A$ взаимодействиях на пучках протонов и ядер, выведенных из ускорителя У70 (ИФВЭ, Протвино). Под кумулятивными частицами понимают частицы, рождающиеся с кинематическими параметрами, запрещенными для взаимодействий со свободными нуклонами, а сами взаимодействия, в которых наблюдается образование кумулятивных частиц, называются кумулятивными процессами. Общая цель проводимых экспериментом исследований состоит в том, чтобы, изучая спектры и состав вторичных частиц, рожденных с большими поперечными импульсами (p_T), получить информацию как о механизме образования таких частиц, так и о структуре барионной материи ядра. Согласно теоретическим оценкам [1], основной вклад в кинематическую область, которую изучает эксперимент СПИН, дают жесткие взаимодействия с многонуклонными (многокварковыми) конфигурациями ядра.

Установка эксперимента представляет собой [2] узкоапертурный магнитный одноплечевой спектрометр, отбирающий для анализа заряженные частицы, вылетающие из мишени под фиксированным углом (θ). Если предыдущие усилия эксперимента (например, [3]) были направлены на изучение рождения легких ядерных фрагментов (d, t), то в настоящей работе рассматривается рождения кумулятивных p, $\pi^{\pm}$, $K^{\pm}$ и $\bar{p}$ под углом $\theta = 40°$ (лаб. сист.) в протон-ядерных взаимодействиях при энергии пучка протонов 50 ГэВ. При выбранном угле регистрации спектрометр позволяет измерять импульсы (p) и идентифицировать заряженные частицы в диапазоне $p = 1{-}4.2$ ГэВ/с. В качестве мишеней использовались тонкие пластины из углерода, алюминия, меди и вольфрама.

Большинство имеющихся к настоящему времени данных по кумулятивным процессам во взаимодействиях разных частиц с ядрами получены в "области фрагментации ядер", (например, [4–6]), когда регистрировались частицы, вылетающие из ядра (A) с импульсом $p \leq 2$ ГэВ/с в заднюю полусферу (лаб. сист.). При этом, одним из интересных явлений было наблюдение эффекта "ядерного скейлинга": инклюзивные спектры кумулятивных частиц, рассмотренные как функции от кинетической энергии (T), хорошо описываются экспоненциальной зависимостью, $\sim \exp(-T/T_0)$, где параметр T_0 соответствует наклону спектра. В работах [7] ядерный скейлинг объясняется присутствием в ядрах сверхплотных сгустков материи, флуктонов (многокварковая компонента ядерной материи). Взаимодействие налетающей частицы (a) с флуктоном и его последующая фрагментация порождает наблюдаемые кумулятивные частицы. В рамках такой модели было предпо-

1)e-mail: Vladimir.Gapienko@ihep.ru

ложено, что при начальной энергии E_0, много большей массы нуклона, $T_0 \neq T_0(E_0, a, A)$. Другая попытка [8] объяснить эффект состоит в предположении, что частица, влетевшая в ядро, может в первом же взаимодействии сжать ядерное вещество и образовать “горячий объект” (файербол) с последующим движением этого объекта внутри ядра, взаимодействием с ядерной материей и затем с фрагментацией в адроны. И в модели [7], и в модели [8], характеристики вторичных продуктов оказываются связанными с энергией (“температурой”) изначального объекта (флуктона, файербола). Отметим неспособность файербольной модели описать кумулятивный эффект в процессах рассеянии лептонов на ядрах, когда отсутствует возможность образовать “горячий объект” в первом столкновении.

Скейлинговое поведение кумулятивных спектров, как оказалось при детальном изучении, выполняется лишь с некоторой точностью. Так, в статье [6], где приводятся спектры протонов, антипротонов, $\pi^{\pm}$ и $K^{\pm}$ под углами 97° в $p + \mathrm{Cu}$ взаимодействии при начальной энергии ~ 10 ГэВ, показано, что величины T_0 демонстрируют зависимость как от массы ядра-мишени, так и от типа вторичной частицы.

Оценки [9, 10] показывают, что искажения в области $\theta > 90°$ могут быть весьма существенны за счет взаимодействий в конечном состоянии. В настоящей работе сделана попытка взглянуть на энергетические спектры кумулятивных частиц, рождающихся с большими поперечными импульсами в $p + A$ взаимодействиях в кинематической области, отличной от области фрагментации мишени.

Если в $p + A$ взаимодействии все частицы,вылетевшие из ядра под углом $\theta > 90°$ (лаб. сист.), априори считаются кумулятивными, то для определения степени кумулятивности в нашем случае был использован формализм [11] В. С. Ставинского, призванный рассчитывать рождение частицы с большим p_T через жесткое столкновение части налетающей частицы и части мишени. Ставинский ввел переменные X_1 и X_2, описывающие участвующие в квазибинарной реакции доли от первоначальных 4-импульсов налетающей частицы и мишени соответственно. Для однозначного определения величин X_1 и X_2, кроме требования сохранения барионного числа, имеется дополнительное условие, чтобы инвариантная энергия квазибинарной реакции была бы минимальной. Пример использования переменных Ставинского X_1 и X_2 для описания инклюзивных сечений в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях можно найти в [12].

Величина X_2, определенная в соответствии с [11, 12], в нашем случае считалась минимальной массой мишени (определяемой в единицах массы нуклона), необходимой для образования частицы под углом 40°. Примеры рассчитанных значений X_2 для антипротонов, протонов, K^--мезонов и π-мезонов показаны на рис. 1 в зависимости от поперечного импульса частицы.

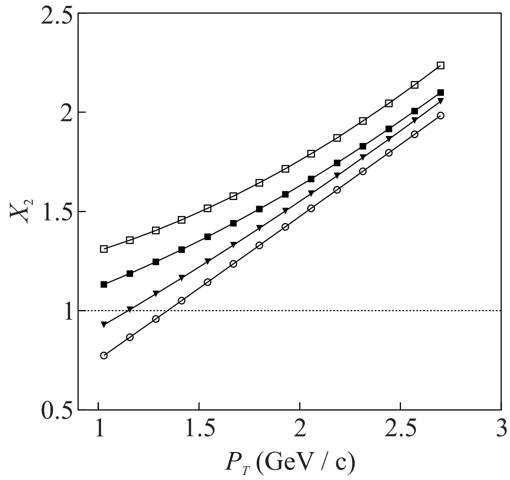

Рис. 1. Минимальная масса мишени, X_2, необходимая для рождения под углом 40° антипротона (светлые квадраты), протона (черные квадраты), K^--мезона (треугольники) и π-мезона (светлые кружки)

Инклюзивные сечения для $\pi^{\pm}$, $K^{\pm}$, протонов и антипротонов представлены на рис. 2 как функции от кинетической энергии. При построении этого рисунка использовались только величины, полученные при выполнении условия рождения частицы с участием массы мишени большей массы нуклона, т.е.при $X_2 > 1$. Для удобства восприятия данных на рис. 2, величины сечений для протонов были предварительно умножены на коэффициент 10. На 4-х квадрантах рисунка показаны результаты раздельно для всех четырех использованных мишеней: C, Al, Cu и W. Кривые на рис. 2 есть результат аппроксимации данных экспоненциальной функцией, параметры наклонов, полученные при этом, приведены в табл. 1. Ошибки в определении величин T_0, при которых спектры описываются наилучшим способом, не превышают 2 %. Качество описания данных экспонентой характеризуется величинами $\chi^2/ndf < 1$ для протонов, антипротонов и K^- , $\chi^2/ndf < 2$ для π^- и $1 < \chi^2/ndf \leq 3$ для π^+ и K^+.

Выводы. Общее поведение спектров выглядит похожим для всех четырех использованных в эксперименте мишеней, C, Al, Cu и W. Кумулятивные частицы, рождающиеся в протон-ядерных взаимодействиях под углом 40° с поперечным импульсом

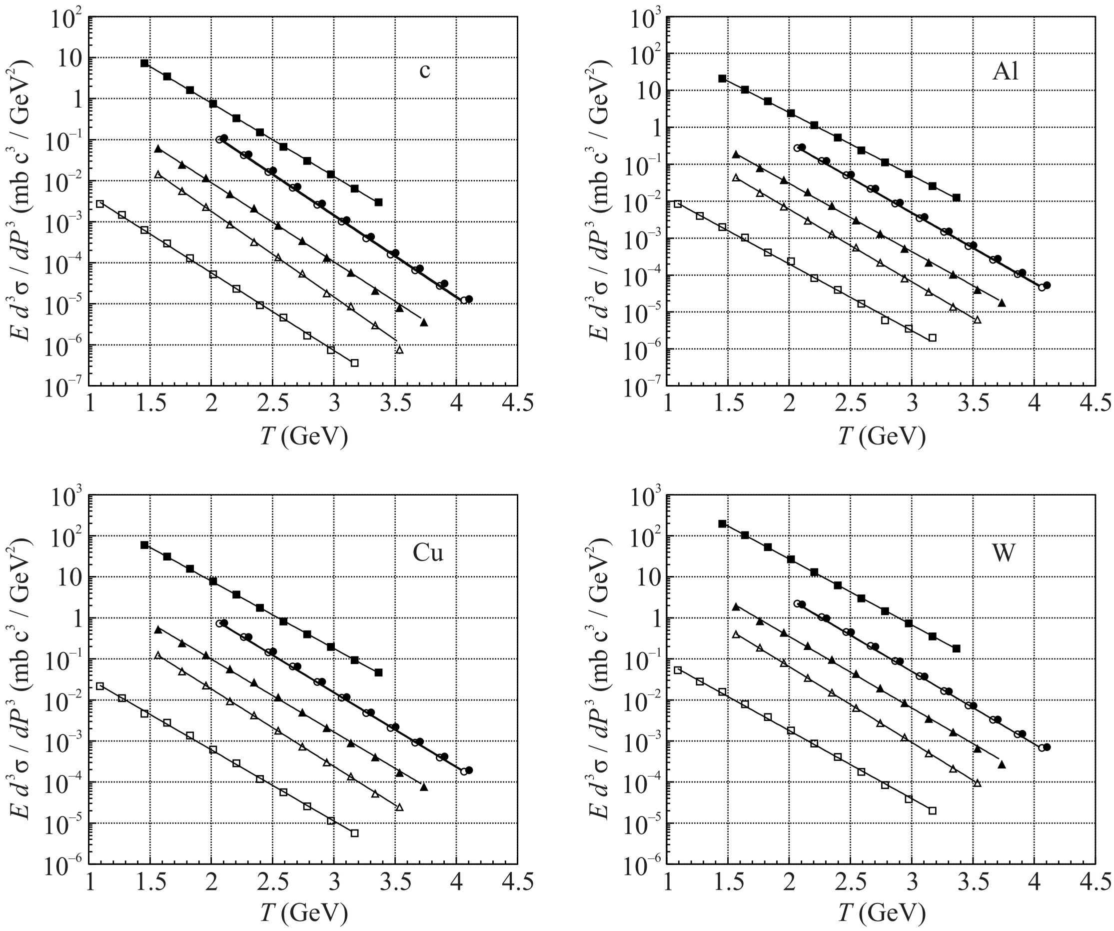

Рис. 2. Инклюзивные спектры как функции кинетической энергии, измеренные для протонов (черные квадраты), антипротонов (светлые квадраты), π^+ (черные кружки), π^- (светлые кружки), K^+ (черные треугольники), K^- (светлые треугольники). Величины сечений для протонов были предварительно умножены на 10. Кривыми показаны результаты аппроксимации точек экспоненциальной функцией

Таблица 1. Параметр наклона T_0, МэВ

Target	p	π^+	π^-	K^+	K^-	$\bar{p}$
C	242	218	218	225	208	231
Al	253	229	228	236	222	241
Cu	263	239	239	245	230	253
W	268	246	245	249	238	262

$p_T > 1$ ГэВ/с, демонстрируют экспоненциальную зависимость инклюзивных спектров от кинетической энергии, как это наблюдается [4–6] и для частиц с углом вылета $\theta > 90^\circ$ (лаб. сист.).

Величины T_0 (табл. 1) существенно превышают значения 50–100 МэВ, характерные для кумулятивных частиц, летящих в лабораторной системе в заднюю полусферу, что объясняется в [8] тем, что при фиксированном угле регистрируются продукты фрагментации подвижного объекта, которому налетевшая частица задала импульс движения.

В пределах ошибок измерений,инклюзивные сечения кумулятивных π^+ и π^- совпадают между собой для всех использованных мишеней.

Для всех частиц наблюдается рост измеренных величин T_0 с ростом массы ядра-мишени.

Для всех мишеней наклоны спектров антипротонов заметно отличаются от наклонов мезонных спектров, что, возможно, противоречит идее [13] о едином механизме образования кумулятивных мезонов и антипротонов.

Авторы благодарны А. А. Семаку за помощь в подготовке результатов к публикации и за ряд критических замечаний, позволивших улучшить качество представления данных. Авторы также благодарят Головина А.Т. за неоценимую техническую поддержку при подготовке установки СПИН к проведению измерений.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института физики высоких энергий, Научно исследовательский центр "Курчатовский институт". Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. А. В.Ефремов, В. Т. Ким, Г. И. Лыкасов, "Жесткие адрон-ядерные процессы и многокварковые конфигурации в ядрах", ЯФ **44**, 241(1986) [A. V. Efremov, V. T. Kim, and G. I. Lykasov, "Hard Hadron – Nucleus Processes and Multi – Quark Configurations in Nuclei", Sov. J. Nucl. Phys. **44**, 151 (1986)].
2. Н. Н. Антонов, В. А. Викторов, В. А. Гапиенко, Г. С. Гапиенко, В. Н. Гресь, А. Ф. Прудкогляд, В. А. Романовский, А. А. Семак, И. П. Солодовников, В. И. Терехов, М. Н. Уханов, "Установка СПИН на У-70. Описание аппаратуры", Приборы и техника эксперимента **5**, 43 (2022) [N. N. Antonov, V. A. Viktorov, V. A. Gapienko, G. S. Gapienko, V. N. Gres', A. F. Prudkoglyad, V. A. Romanovskii, A. A. Semak, I. P. Solodovnikov, V. I. Terekhov, and M. N. Ukhanov, "The SPIN Setup at U-70: Description of the Equipment", Instruments and Experimental Techniques **65**(5), 723 (2022)].
3. Н. Н. Антонов, В. А. Викторов, В. А. Гапиенко, Г. С. Гапиенко, В. Н. Гресь, А. Ф. Прудкогляд, В. А. Романовский, А. А. Семак, И. П. Солодовников, В. И. Терехов, М. Н. Уханов, С. С. Шиманский, "Рождение дейтронов и тритонов с большими поперечными импульсами под углом 40° в pA взаимодействиях при энергии пучка 50 ГэВ", Ядерная физика **85**(3), 209 (2022) [N. N. Antonov, V. A. Viktorov, V. A. Gapienko, G. S. Gapienko, V. N. Gres', A. F. Prudkoglyad, V. A. Romanovskii, A. A. Semak, I. P. Solodovnikov, V. I. Terekhov, M. N. Ukhanov, and S. S. Shimanskii, "Production of High-Transverse-Momentum Deuterons and Tritons at an Angle of 40° in Proton–Nucleus Interactions at a Beam Energy of 50 GeV", Physics of Atomic Nuclei **85**(3), 282 (2022)].
4. N. A. Nikiforov, Y. D. Bayukov, V. I. Efremenko, G. A. Leksin, Y. M. Zaitsev, S. Frankel, W. Frati, Gazzaly, and C. F. Perdrisat, "Backward production of pions and kaons in the interaction of 40° GeV protons with nuclei", Phys. Rev. C **22**(2), 700 (1980).
5. A. M. Baldin, V. K. Bondarev, N. Ghiordanescu, A. N. Khrenov, A. G. Litvinenko, A. N. Manyatovsky, N. S. Moroz, Yu. A. Panebratsev, M. Pentia, S. V. Rikhvitsky, and V. S. Stavinsky, "Experimental data on inclusive cross section for cumulative production of pions, kaons, antiprotons and the quark-parton structure function of nuclei", preprint JINR E1-82-472 (Dubna, 1982).
6. С. В. Бояринов, И. И. Евсеев, Ю. Т. Киселев, Г. А. Лексин, А. Н. Мартемьянов, К. Р. Михайлов, С. А. Поздняков, Ю. В. Терехов, В. И. Ушаков, В. А. Шейнкман, "Выходы p, $\bar{p}$, $\pi^{\pm}$ и $K^{\pm}$ из ядер под углом 97° в л.с. под действием протонов с энергией 10.14 ГэВ", Ядерная физика **57**(8), 1452 (1994) [S. V. Boyarinov, I. I. Evseev, Yu. T. Kiselev, G. A. Leksin, A. N. Martem'yanov, K. R. Mikhailov, S. A. Pozdnyakov, Yu. V. Terekhov, V. I. Ushakov, V. A. Sheinkman, "Yields of p, anti-p, $\pi^{\pm}$, and $K^{\pm}$ emitted at an angle of 97-degrees in the laboratory system from nuclei irradiated by 10.14-GeV protons", Phys. Atom. Nucl. **57**, 1379 (1994).
7. Г. А. Лексин, "Ядерный скейлинг", Материалы XVIII Международной Конференции по физике высоких энергий, Тбилиси **1**, A6-3 (1976) (издательство ОИЯИ, Дубна, 1977) [G. A.Leksin, "Nuclear scailing", Proc. of XVIII International Conference on High Energy Physics, Tbilisi **1**, A6-3 (1976) (JINR, Dubna, 1977)].
8. М. И. Горенштейн, Г. М. Зиновьев, "Файербольная модель кумулятивного эффекта", Труды V международного семинара по проблемам физики высоких энергий (издательство ОИЯИ, Дубна 1978), с. 438 [M. I. Gorenstein and G. M. Zinovev, "Fireball model of cumulative effect", Proc. of V International Seminar on Problems in High Energy Physics (JINR, Dubna, 1978), p. 438].
9. V. F. Peresedov and L. S. Zolin, "Distortions of the Spectra of Cumulative Mesons by Multiscattering in Nuclei", Phys. Scr. **48**, 210 (1993).
10. V. B. Kopeliovich, G. K. Matushko, and I. K. Potashnikova, "Buddha's light" of cumulative particles", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **41**, 125107 (2014).
11. В. С. Ставинский, "Единый алгоритм вычисления инклюзивных сечений рождения частиц с большими поперечными импульсами и адронов кумулятивного типа", Краткие сообщения ОИЯИ **18**, 5 (1986) [V. S. Stavinskii, "Unified algorithm for calculating inclusive cross sections for the production of particles with large transverse momenta and cumulative-type hadrons", JINR Rapid Commun. **18**, 5 (1986).
12. А. А. Балдин, "Возможен ли единый подход к подпороговым и кумулятивным процессам в релятивистских ядерных столкновениях?", Краткие сообщения ОИЯИ **3**(54), 27 (1992) [A. A. Baldin, "Is a unified approach to subthreshold and cumulative processes in relativistic nuclear collisions possible?", INR Rapid Commun. **3**(54), 27 (1992)].
13. Г. А. Лексин, "Пути исследования ядерного вещества в условиях, характерных для его перехода в кварк-глюонную плазму", ЯФ **65**(11), 2042 (2002) [G. A. Leksin, "Methods for Investigating Nuclear Matter under the Conditions Characteristic of Its Transition to Quark-Gluon Plasma", Physics of Atomic Nuclei **65**(11), 1985 (2002).