

DOI: 10.18721/JPM.11306

УДК 539.126.3

РОЖДЕНИЕ КУМУЛЯТИВНЫХ ПРОТОНОВ ПРИ ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДЕР УГЛЕРОДА НА БЕРИЛЛИЕВОЙ МИШЕНИ

Д.М. Ларионова, М.М. Ларионова, Ю.М. Митранков, В.С. Борисов, В.Н. Соловьёв, А.Я. Бердников

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

На основе модели льежского внутриядерного каскада проведено моделирование столкновения ядер углерода с ядрами бериллия при начальных кинетических энергиях ядер углерода 0,60, 0,95 и 2,00 ГэВ/нуклон. Получены инвариантные сечения рождения протонов при столкновении ядер под углом $3,5^\circ$. Показано, что зависимость экспериментальных инвариантных сечений рождения протонов от кумулятивной переменной x в диапазоне $0,9 < x < 2,4$ можно трактовать на основе учета Ферми-движения нуклонов в ядре, процессов многократного рассеяния и образования дельта-резонанса. Проведено сравнение результатов модельных расчетов с экспериментальными данными и результатами исследования, в котором данные эксперимента проанализированы в рамках модели кварковых кластеров.

Ключевые слова: кумулятивная частица, дельта-резонанс, модель льежского внутриядерного каскада, бериллиевая мишень

Ссылка при цитировании: Ларионова Д.М., Ларионова М.М., Митранков Ю.М., Борисов В.С., Соловьёв В.Н., Бердников А.Я. Рождение кумулятивных протонов при фрагментации ядер углерода на бериллиевой мишени // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 3. С. 65–73. DOI: 10.18721/JPM.11306

CUMULATIVE PROTONS PRODUCTION DURING THE CARBON NUCLEUS FRAGMENTATION ON THE BERYLLIUM TARGET

D.M. Larionova, M.M. Larionova, Yu. M. Mitrankov, V.S. Borisov, V.N. Solovov, A.Ya. Berdnikov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

The collision of carbon nuclei with beryllium targets has been simulated in the framework of the Liège Intranuclear Cascade model at the carbon nuclei initial kinetic energies of 0.60, 0.95, 2.00 GeV / nucleon. Proton production invariant cross-sections at the nuclei collision angle of 3.5 degrees were obtained. It was shown that the dependence of experimental invariant cross-sections on the cumulative variable x in the range $0.9 < x < 2.4$ could be interpreted on the basis of taking into account the Fermi motion of nucleons in nuclei, multiple scattering processes, and the formation of delta resonance. The calculation results were compared with experimental data and findings of investigation where data was analyzed in the context of the quark cluster model.

Key words: cumulative particle, delta resonance, Liège Intranuclear Cascade model, beryllium target.

Citation: D.M. Larionova, M.M. Larionova, Yu.M. Mitrankov, V.S. Borisov, V.N. Solovev, A.Ya. Berdnikov, Cumulative protons production during the carbon nucleus fragmentation on the beryllium target, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (3) (2018) 65–73. DOI: 10.18721/JPM.11306

Введение

Под кумулятивным рождением частиц в ядро-ядерных соударениях подразумевается их рождение в кинематической области, запрещенной для свободных нуклон-нуклонных столкновений [1, 2].

Для характеристики кумулятивных частиц вводится безразмерная величина x — порядок кумулятивности (кумулятивная переменная) [3].

Существуют различные способы определения этой величины [1, 2]; в данной работе кумулятивная переменная x используется в виде отношения импульса p регистрируемого протона к импульсу p_0 нуклона в ядре углерода [4], в лабораторной системе координат (система покоя ядра мишени ${}^9\text{Be}$):

$$x = p / p_0.$$

В настоящее время известны две принципиально разные точки зрения на образование кумулятивных частиц.

Первая — это учет Ферми-движения, многократного рассеяния внутри ядра, когда адронный снаряд или продукты его фрагментации испытывают несколько последовательных перерассеяний [1], и процессов, связанных с образованием резонансов. В результате в последнем внутриядерном столкновении становится возможным рождение частицы в области, кинематически недоступной при рассеянии на одиночном свободном нуклоне.

Вторая точка зрения берет за основу процессы, протекающие на расстояниях, много меньших характерных ядерных расстояний [5]. К наиболее распространенным моделям, описывающим такие процессы, относятся флуктонные [5] и модель нуклонных корреляций на коротких расстояниях [6, 7].

При этом флуктонные модели разделяют на два подкласса: «холодные» и «горячие». Первые предполагают, что флуктоны всегда существуют в начальном ядре [1, 5,

8, 9]; согласно же вторым, они формируются в процессе столкновения [10].

В эксперименте «фрагм» (название происходит от термина «фрагментация») на ускорительно-накопительном комплексе тяжелых ионов ТВН-ИТЭФ [11] (создан в Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва) измерены выходы протонов под углом $3,5^\circ$ при фрагментации ионов углерода с энергиями 0,60, 0,95 и 2,00 ГэВ/нуклон на бериллиевой мишени. Полученные данные представлены в виде зависимостей инвариантного сечения выхода протонов от кумулятивной переменной x в диапазоне $0,9 < x < 2,4$.

В работе [4] экспериментальные данные [11] были проанализированы на основе модели кварковых кластеров [8]. Согласно этой модели, в ядре существуют кластеры, состоящие из $3k$ ($k = 1, 2, 3$) валентных кварков. Обычным нуклонам ядра соответствует значение $k = 1$.

Однако в работе [4] не учитывали вклад процессов, не связанных с образованием кварковых кластеров, а именно — Ферми-движения нуклонов в ядре, многократного рассеяния, а также образования резонансов.

Целью данной работы является расчет сечений рождения кумулятивных протонов в инклюзивной реакции



где 1p — протон, X — все остальные продукты реакции.

В качестве исходных данных принималось, что начальные кинетические энергии ионов углерода составляют 0,60, 0,95 и 2,00 ГэВ/нуклон. Расчетная модель учитывала фермиевское движение нуклонов, многократное перерассеяние и образование резонансов. Гипотеза же о кварковых кла-

стерах при этом привлекаться не должна.

Методика моделирования

Для оценки вклада процессов движения Ферми, многократного рассеяния и образования дельта-резонансов в сечение рождения протонов в реакции (1) использовалась расширенная модель льежского внутриядерного каскада [12] (Extension of the Liège Intranuclear Cascade Model).

Согласно модели внутриядерного каскада, столкновение двух нуклонов приводит либо к упругому, либо к неупругому рассеянию.

Полные сечения нуклон-нуклонного рассеяния $\sigma_{tot,pp}$ в миллибарнах (мб) были вычислены с использованием следующих формул [13, 14]:

$$\sigma_{tot,pp}^I = 34 \left(\frac{p_{lab}}{0,4} \right)^{-2,104} \quad \text{при } p_{lab} < 0,44;$$

$$\sigma_{tot,pp}^{II} = 23,5 + 1000(p_{lab} - 0,7)^4$$

при $0,44 < p_{lab} < 0,80$; (3)

$$\sigma_{tot,pp}^{III} = 23,5 + \frac{24,6}{1 + \exp\left(-\frac{p_{lab} - 1,2}{0,1}\right)}$$

при $0,8 < p_{lab} < 1,5$; (4)

$$\sigma_{tot,pp}^{IV} = 41 + 60(p_{lab} - 0,9) \exp(-1,2 p_{lab})$$

при $1,5 < p_{lab} < 3,0$; (5)

$$\sigma_{tot,pp}^V = 45,6 - 219 p_{lab}^{-4,23} +$$

$$+ 0,41 \log^2(p_{lab}) - 3,41 \log(p_{lab})$$

при $p_{lab} > 3,0$; (6)

$$\sigma_{tot,np}^I = 6,3555 \exp[-3,2481 \log(p_{lab}) -$$

$$- 0,377 \log^2(p_{lab})]$$

при $p_{lab} < 0,446$; (7)

$$\sigma_{tot,np}^{II} = 33 + 196 |p_{lab} - 0,95|^{2,5}$$

при $0,446 < p_{lab} < 1,000$; (8)

$$\sigma_{tot,np}^{III} = 24,2 + 8,9 p_{lab}$$

при $1 < p_{lab} < 1,924$; (9)

$$\sigma_{tot,np}^{IV} = 48,9 - 33,7 p_{lab}^{-3,08} +$$

$$+ 0,619 \log^2(p_{lab}) - 5,12 \log(p_{lab})$$

при $1,924 < p_{lab}$, (10)

где p_{lab} , ГэВ/с, – импульс в лабораторной системе координат.

Сечения нуклон-нуклонного упругого рассеяния $\sigma_{el,pp}$ в расширенной модели вычисляются с использованием следующих формул:

$$\sigma_{el,pp}^I = \sigma_{tot,pp} \quad \text{при } p_{lab} < 0,8; \quad (11)$$

$$\sigma_{el,pp}^{II} = \frac{1250}{p_{lab} + 50} - 4(p_{lab} - 1,3)^2$$

при $0,8 < p_{lab} < 2,0$; (12)

$$\sigma_{el,pp}^{III} = \frac{77}{p_{lab} + 1,5}$$

при $2,000 < p_{lab} < 3,096$; (13)

$$\sigma_{el,pp}^{IV} = 11,2 - 22,5 p_{lab}^{-1,12} +$$

$$+ 0,151 \log^2(p_{lab}) - 1,62 \log(p_{lab})$$

при $2,096 < p_{lab}$; (14)

$$\sigma_{el,np}^I = \sigma_{tot,np} \quad \text{при } p_{lab} < 0,85; \quad (15)$$

$$\sigma_{el,np}^{II} = \frac{31}{\sqrt{p_{lab}}} \quad \text{при } 0,85 < p_{lab} < 2,00; \quad (16)$$

$$\sigma_{el,np}^{III} = \frac{77}{p_{lab} + 1,5} \quad \text{при } 2,00 < p_{lab}. \quad (17)$$

Сечения образования неупругих процессов можно вычислять как разности между полным сечением нуклон-нуклонного рассеяния и сечением упругого рассеяния.

Расчетное исследование

Результаты моделирования внутриядерного каскада представлены на рис. 1 в виде зависимости инвариантного сечения рождения протонов в исследуемой реакции (σ_{inv}) от кумулятивной переменной x . Инвариантное сечение рождения протонов вычислялось по формуле

$$\sigma_{inv} = \frac{E}{p_0} \frac{d^2 \sigma}{dx d(p_t)^2},$$

где σ – полное сечение реакции; p_0 – импульс, приходящийся на нуклон налетающего ядра; E , p_t – полная энергия и поперечный импульс протона в лабораторной системе координат [4].

На рис. 1 – 3 представлены результаты моделирования без учета (то есть исключительно за счет Ферми-движения и многократного рассеяния) и с учетом образования дельта-резонансов $\Delta(1232)$. Также на

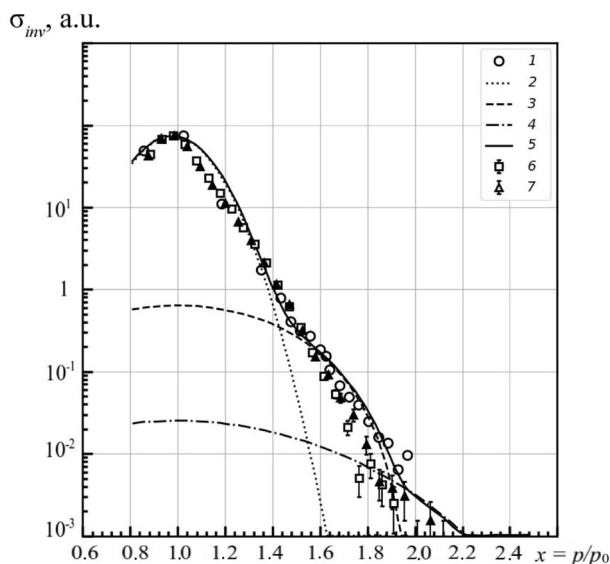


Рис. 1. Экспериментальные (символы \square) [11] и модельные (2 – 7) зависимости сечения рождения протонов в реакции (1) (угол $3,5^\circ$) от кумулятивной переменной, при начальной энергии 0,60 ГэВ/нуклон.

При обработке данных использована расширенная модель льежского внутриядерного каскада [12] без учета (6) и с учетом (7) образования дельта-резонанса, а также модель кварковых кластеров (2 – 5); в рамках последней рассмотрены вклады одно- (2), двух- (3), трех- (4) нуклонных и суммарный вклад (5) кварковых кластеров

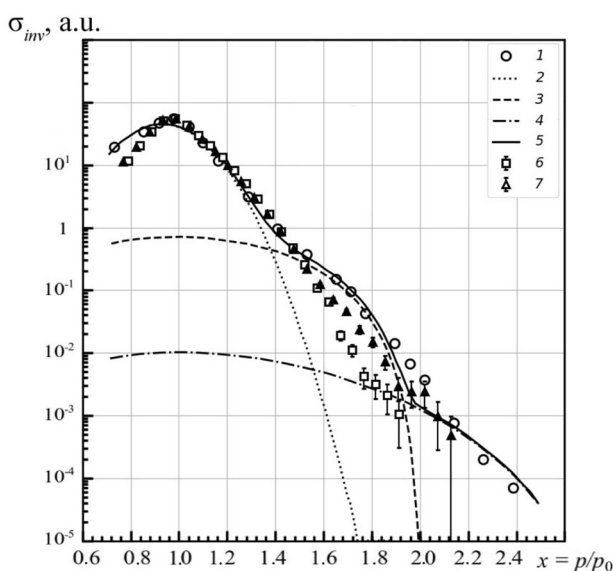


Рис. 2. Представленные данные аналогичны таковым на рис. 1, но получены при начальной энергии 0,95 ГэВ/нуклон

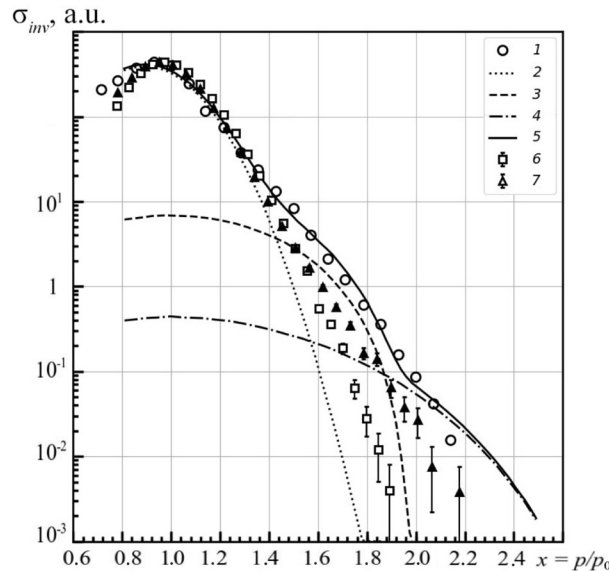


Рис. 3. Представленные данные аналогичны таковым на рис. 1 и 2, но получены при начальной энергии 2,00 ГэВ/нуклон

рис. 1 – 3 приведено сравнение данных моделирования внутриядерного каскада с экспериментальными данными и результатами, полученными в рамках модели кварковых кластеров.

Обсуждение результатов

Как следует из данных, представленных на рис. 1 – 3, одновременный учет Ферми-движения, процессов многократного рассеяния и образования дельта-резонансов приводит к образованию кумулятивных частиц в диапазоне $x > 1$.

На рис. 4 приведены примеры процессов, приводящих к образованию кумулятивных частиц.

Пример 1 (рис. 4, *a*). Рассмотрим способ образования кумулятивной частицы за счет процессов Ферми-движения нуклонов в налетающем ядре и многократного рассеяния. В этом конкретном примере события был зарегистрирован кумулятивный протон со значением $x = 1,58$.

Импульс нуклонов налетающего ядра может превышать значение p_0 в результате Ферми-движения в данном ядре. Согласно модели льежского внутриядерного каскада, импульсы нуклонов в ядре подчиняются распределению Гаусса, для которого среднеквадратичное значение (Root Mean

Square) величины выражается как

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{3}{5}} p_F,$$

где $p_F = 270 \text{ МэВ}/c$ – импульс Ферми [15].

На первой стадии (1) рассматриваемого события протон с индексом 0 и импульсом 1603 МэВ/с упруго сталкивается с нейтроном 1, в результате чего импульс протона 0 уменьшается до значения 1337 МэВ/с (протон теряет энергию в результате упругого столкновения). Второй стадией (2) является упругое столкновение протона 3, импульс которого 1421 МэВ/с, с протоном 0, импульс которого 1337 МэВ/с. Вследствие такого столкновения, импульс протона 0 увеличивается до значения 1925 МэВ/с. Этот протон и регистрируется в данном событии как кумулятивный, причем импульсу 1925 МэВ/с соответствует значение кумулятивной переменной $x = 1,58$.

Пример 2 (рис. 4, *b*). Рассмотрим событие с образованием дельта-резонанса. На первой стадии (1) такого события протон с индексом 1 и импульсом 1346 МэВ/с сталкивается с протоном 0, в результате чего рождается дельта-резонанс 0 с импульсом 1098 МэВ/с. Второй стадией (2) является столкновение протона 2, чей импульс 1108 МэВ/с, с дельта-резонансом. После

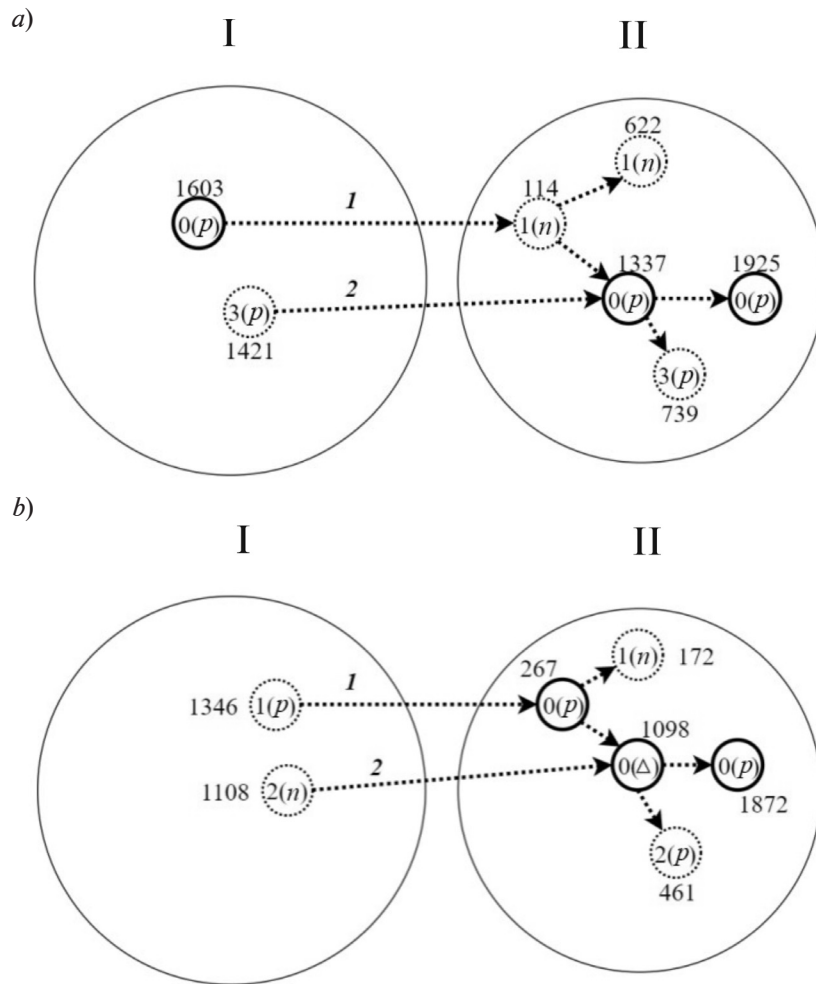


Рис. 4. Примеры событий, возникающих при столкновении ядер С (I) и Ве (II), без образования (a) и с образованием (b) дельта-резонанса $0(\Delta)$; 1, 2 – стадии процессов. Внутрядерные нуклоны показаны малыми окружностями, рядом с которыми приведены их импульсы в единицах МэВ/с; (n), (p) – нейтрон и протон; 0, 1, 2, 3 – их индексы. Образованные в процессах кумулятивные частицы показаны малыми сплошными окружностями

этого образуется протон 0 с импульсом 1872 МэВ/с, который и регистрируется в данном событии как кумулятивный. Причем импульсу 1872 МэВ/с соответствует значение кумулятивной переменной $x = 1,53$.

Из выражений (4) и (5) следует, что при импульсах на нуклон ядра углерода, меньших 0,8 ГэВ/(с · нуклон), сечение неупругих процессов, в том числе и образования дельта-резонансов, равно нулю.

Таким образом, полученные в результате моделирования сечения, как учитывающие образование дельта-резонансов, так и не учитывающие их образование, совпадают в области $x < 0,8/0,6 \approx 1,3$.

Благодаря учету процессов образования дельта-резонансов в области $x > 1,6$, инвариантное сечение увеличивается и становится ближе к экспериментальным значениям.

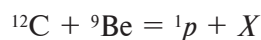
Проведем сравнение результатов моделирования, выполненного в настоящей работе, с предсказаниями гипотезы, основанной на существовании кварковых кластеров в ядрах (см. рис. 1 – 3).

Видно, что процессы многократного рассеяния и образования дельта-резонансов в области $x < 1,4$ так же хорошо описывают экспериментальные данные, как и подход кварковых кластеров, однако в области

$x > 1,4$ дают более низкие значения инвариантных сечений. При увеличении начальной кинетической энергии ионов углерода отклонение полученных результатов от экспериментальных данных становится все значительнее.

Заключение

Получены распределения инвариантных сечений по кумулятивной переменной с учетом процессов многократного рассеяния и образования резонансов, без привлечения гипотезы о кварковых кластерах в инклюзивной реакции (1)



при начальных кинетических энергиях ионов углерода 0,60, 0,95, 2,00 ГэВ/нуклон.

Показано, что процессы многократного рассеяния и образования дельта-резонансов приводят к образованию кумулятивных частиц и дают существенный вклад в сечение рождения кумулятивных частиц. При начальной кинетической энергии ионов углерода 0,60 ГэВ/нуклон полученные результаты согласуются с экспериментальными данными. С увеличением энергии в области $x > 1,4$ полученные значения оказываются ниже, чем экспериментальные, что говорит о возможном появлении новых механизмов рождения кумулятивных частиц, например таких, как учет других нуклонных резонансов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственное задание 3.1498.2017 / 4.6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ефремов А.В.** Кварк-партоновая картина кумулятивного рождения // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1982. Т. 13. № 3. С. 613–634.
2. **Ставинский В.С.** Предельная фрагментация ядер – кумулятивный эффект // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1979. Т. 10. № 5. С. 949–995.
3. **Ставинский В.С.** Единый алгоритм вычисления инклюзивных сечений рождения частиц с большими поперечными импульсами и адронов кумулятивного типа // Краткие сообщения ОИЯИ. 1986. Т. 18. № 86. С. 5–17.
4. **Абрамов Б.М., Алексеев П.Н., Бородин Ю.А. и др.** Проявление кварковых кластеров в образовании кумулятивных протонов в эксперименте по фрагментации ионов углерода // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2013. Т. 97. № 8. С. 509–513.
5. **Блохинцев Д.И.** О флуктуациях ядерного вещества // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1958. Т. 33. Вып. 5. С. 1295–1299.
6. **Tang A., Watson J.W., Aclander J., et al.** $n-p$ Short-range correlations from $(p, 2p + n)$ measurements // Physical Review Letters. 2003. Vol. 90. No. 4. P. 042301.
7. **Tang A., Alster J., Asryan G., et al.** $n-p$ Short-range correlations from $(p, 2p + n)$ measurements // AIP Conf. Proc. 2000. Vol. 549. No. 1. Pp. 451–454.
8. **Ефремов А.В., Кайдалов А.Б., Ким В.Т., Лыкасов Г.И., Славин Н.В.** Образование кумулятивных адронов в кварковых моделях фрагментации флуктонов // Ядерная физика. 1988. Т. 47. Вып. 5. С. 1364–1374.
9. **Braun M.A., Vechernin V.V.** Cumulative phenomena in the QCD approach // Nuclear Physics. B. Proc. Suppl. 2001. Vol. 92. No. 1–3. Pp. 156–161.
10. **Motornenko A., Gorenstein M.I.** Cumulative production of pions by heavy baryonic resonances in proton-nucleus collisions // arXiv:1604.04308v1 [hep-ph] 14 Apr. 2016. Pp. 1–21.
11. **Абрамов Б.М., Бородин Ю.А., Булычев С.А. и др.** Кумулятивные протоны в реакции ${}^9\text{Be} ({}^{12}\text{C}, p)$ при 0,2–3,2 ГэВ/нуклон // Известия РАН. Сер. физическая. 2011. Т. 75. № 4. С. 536–540.
12. **Pedoux S.** Extension of the Liège intranuclear-cascade model to the 2–15 GeV incident energy range. PhD thesis. Liège: University of Liège, 2011–2012.
13. **Aoust Th.** Amélioration du modèle de cascade intranucleaire de Liège en vue de l'étude de cibles de spallation pour les systèmes hybrides. PhD thesis. Liège: University of Liège, 2006–2007.
14. **Baldini A., Flaminio V., Moorhead W.G., Morrison D.R.O.** Numerical data and functional relationships in science and technology. New series. Group 1. No. 12. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1988.
15. **Mancusi D., Boudard A., Cugnon J., et al.** Extension of the Liège intranuclear-cascade model to reactions induced by light nuclei // Phys. Rev. C. 2014. Vol. 90. No. 5. P. 054602.

Статья поступила в редакцию 05.06.2018, принята к публикации 07.06.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛАРИОНОВА Дарья Максимовна – лаборант-исследователь Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
dlar@bk.ru

ЛАРИОНОВА Мария Максимовна – лаборант-исследователь Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
mlario@bk.ru

МИТРАНКОВ Юрий Михайлович – лаборант-исследователь Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
mitrankovy@gmail.com

БОРИСОВ Владислав Сергеевич – лаборант-исследователь Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vl-borisof@yandex.ru

СОЛОВЬЁВ Владимир Николаевич – лаборант-исследователь Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
hydraca39@gmail.com

БЕРДНИКОВ Александр Ярославич – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
alexber@phmf.spbstu.ru

REFERENCES

- [1] A.V. Efremov, Quark-parton picture of the cumulative production, *Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei*. 13(3) (1982) 613–634.
- [2] V.S. Stavinsky, Limiting fragmentation of nuclei – the cumulative effect, *Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei*. 10(5) (1979) 949–995.
- [3] V.S. Stavinskij, Unique algorithm for calculation of inclusive cross sections of particle production with big transverse momenta and of cumulative Type Hadrons, *JINR Rapid Communications*. 5 (18) (1986) 5–17.
- [4] B.M. Abramov, P.N. Alekseev, Yu.A. Borodin, et al., Manifestation of quark clusters in the emission of cumulative protons in the experiment of the fragmentation of carbon ions, *JETP Letters*. 97(8) (2013) 439–443.
- [5] D.I. Blokhintsev, On the fluctuations of nuclear matter, *JETP*. 6(5) (1958) 995–999.
- [6] A. Tang, J.W. Watson, J. Aclander, et al., $n-p$ Short-range correlations from $(p, 2p + n)$ measurements, *Physical Review Letters*. 90 (4) (2003) 042301.
- [7] A. Tang, J. Alster, G. Asryan, et al., $n-p$ Short-range correlations from $(p, 2p + n)$ measurements, *AIP Conf. Proc.* 549 (1) (2000) 451–454.
- [8] A.V. Efremov, A.B. Kaidalov, V.T. Kim, et al., Cumulative hadron production in quark models of flucton fragmentation, *Sov. J. Nucl. Phys.* 47 (5) (1988) 1364–1374.
- [9] M.A. Braun, V.V. Vechernin, Cumulative phenomena in the QCD approach, *Nuclear Physics*,



B, Proc. Suppl. 92 (1–3) (2001) 156–161.

[10] **A. Motornenko, M.I. Gorenstein**, Cumulative production of pions by heavy baryonic resonances in proton-nucleus collisions, arXiv:1604.04308v1[hep-ph] 14 Apr. 2016. Pp. 1–21.

[11] **B.M. Abramov, Yu.A. Borodin, S.A. Bulychev, et al.**, Cumulative protons in the ${}^9\text{Be}$ (${}^{12}\text{C}, p$) reaction at 0.2 – 3.2 GeV/nucleon, Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 75 (4) (2011) 500–504.

[12] **S. Pedoux**, Extension of the Liège intranuclear cascade model to the 2 –15 GeV incident energy range, PhD thesis, University of Liège, Liège (2011–2012).

[13] **Th. Aoust**, Amélioration du modèle de cascade intranucleaire de Liège en vue de l'étude de cibles de spallation pour les systèmes hybrides, PhD thesis, University of Liège, Liège (2006–2007).

[14] **A. Baldini, V. Flaminio, W.G. Moorhead, D.R.O. Morrison**, Numerical data and functional relationships in science and technology, New series Group 1, No. 12, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1988.

[15] **D. Mancusi, A. Boudard, J. Cugnon, et al.**, Extension of the Liège intranuclear-cascade model to reactions induced by light nuclei, Phys. Rev. C. 90 (5) (2014) 054602.

Received 05.06.2018, accepted 07.06.2018.

THE AUTHORS

LARIONOVA Dariya M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
dlar@bk.ru

LARIONOVA Mariya M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
mlario@bk.ru

MITRANKOV Yuriy M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
mitrankovy@gmail.com

BORISOV Vladislav S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
vl-borisof@yandex.ru

SOLOVEV Vladimir N.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
hydraca39@gmail.com

BERDNIKOV Aleksandr Ya.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
alexber@phmf.spbstu.ru