

**NEWS**

**OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN  
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES**

ISSN 1991-346X

Volume 2, Number 312 (2017), 30 – 37

**E.A.Grushevskaya, I.A.Lebedev, A.T. Temiraliev, A.I. Fedosimova**

Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan

**STUDY ON EVENTS WITH COMPLETE DESTRUCTION  
OF PROJECTILE NUCLEUS IN INTERACTIONS  
OF ASYMMETRIC NUCLEI**

**Abstract.** The characteristics of the events with the complete destruction of the projectile nucleus in the interactions of asymmetric nuclei are investigated. For the experimental study of nucleus-nucleus interactions, the method of nuclear emulsion is used. The search for the events with complete destruction of the projectile nucleus is based on an analysis of the distributions of secondary particles in terms of the number of interacted protons of the projectile nucleus. In the interactions of sulfur nuclei with heavy photoemulsion nuclei at 200 AGeV an anomalously high number of events with complete destruction of the projectile nucleus, is observed. They have the following distinctive features. The appearance of such events depends on the interaction energy (they are not found in the interactions of sulfur nuclei with the emulsion nuclei at 3.7 AGeV) and on the degree of asymmetry of the interacting nuclei (they are not found in interactions of heavy nuclei of gold and lead in interactions with nuclear emulsion). The events of complete destruction of the projectile nucleus are characterized by a high multiplicity of shower particles and narrow mean angular distribution at large angles (a narrow peak in the region of small values of mean pseudorapidity).

**Key words:** nucleus-nucleus interactions, multiparticle processes, fragmentation, nuclear emulsion, pseudorapidity distribution

УДК 539.12; 539.1

**Е.А. Грушевская, И.А. Лебедев, А.Т. Темиралиев, А.И. Федосимова**

Физико-технический институт, Алматы, Казахстан

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОБЫТИЙ ПОЛНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЯДРА  
СНАРЯДА ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ АСИММЕТРИЧЕСКИХ ЯДЕР**

**Аннотация.** Проведено исследование характеристик событий с полным разрушением ядра снаряда во взаимодействиях асимметрических ядер. Для экспериментального исследования ядро-ядерных взаимодействий в данной работе применен метод ядерной эмульсии. Поиск событий полного разрушения основан на анализе распределений вторичных частиц по числу провзаимодействовавших протонов ядра снаряда. Обнаружено, что во взаимодействиях ядер серы с тяжелыми ядрами фотоэмульсии при энергии 200 АГэВ наблюдается anomalously высокое количество событий полного разрушения ядра снаряда. Эти события имеют следующие отличительные особенности. Появление таких событий зависит от энергии взаимодействия (не обнаруживается во взаимодействиях ядер серы с ядрами фотоэмульсии при энергии 3.7 АГэВ) и степени асимметрии взаимодействующих ядер (не обнаруживается во взаимодействиях тяжелых ядер золота и свинца во взаимодействиях с ядерной эмульсией). События полного разрушения налетающего ядра характеризуются высокой множественностью ливневых частиц и усконаправленным средним угловым распределением на большие углы (узким пиком в области малых значений средней псевдобыстроты).

**Ключевые слова:** ядро-ядерные взаимодействия, множественные процессы, фрагментация, ядерная фотоэмульсия, псевдобыстротные распределения.

## Введение

Поиск фазового перехода вещества из адронного состояния в кварк-глюонную плазму (КГП) составляет одну из ключевых проблем физики высоких энергий [1-4]. В ядерной материи в состоянии кварк-глюонной плазмы кварки и глюоны находятся в квазисвободном состоянии, то есть наблюдается процесс деконфайнмента. Экспериментально процесс деконфайнмента может быть обнаружен по общему признаку фазовых переходов – усилению флуктуаций параметров исследуемой системы вблизи точки ожидаемого фазового перехода. В частности фазовый переход кварк-глюонной фазы к адронной фазе приводит к существенным флуктуациям в распределениях вторичных частиц [5-6].

Сложность идентификации формирования кварк-глюонной плазмы связана главным образом с тем, что КГП образуется на большом фоне, обусловленном обычными процессами сильного взаимодействия [7].

В связи с этим, для поиска экспериментальных проявлений процессов деконфайнмента в первую очередь исследуются взаимодействия с характеристиками, существенно отличными от среднего: события с большими множественностями и с большими поперечными импульсами Вторичных частиц, с высокой плотностью частиц на единичный интервал распределения по псевдобыстроте, события полного разрушения ядра снаряда или ядра мишени и т.д. [8].

Неоднозначность начального состояния, о котором обычно очень мало прямой экспериментальной информации, также приводит к существенным особенностям в распределении фрагментов и множественности ливневых частиц [9].

В данной работе анализируются особенности распределений вторичных частиц в событиях полного разрушения налетающего ядра в терминах числа провзаимодействовавших протонов ядра снаряда.

## Экспериментальные данные

Анализируемый набор включал экспериментальные данные EMU-01 коллаборации: взаимодействия ядер серы  $^{32}\text{S}$  с энергией 200 А·ГэВ и 3.7 А·ГэВ, ядер золота  $^{197}\text{Au}$  с энергией 10.7 А·ГэВ и ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  с энергией 158 А·ГэВ с ядрами фотоэмульсии.

Стопки ядерной эмульсии *Em* типа NIKFI BR-2, размером (10 x 20 x 0.06) см<sup>3</sup> облучались горизонтальным пучком 200 А·ГэВ  $^{32}\text{S}$  и 158 А·ГэВ  $^{208}\text{Pb}$  на ускорителе SPS в Европейском центре ядерных исследований (CERN), пучком 10.7 А·ГэВ  $^{197}\text{Au}$  на ускорителе AGS Брукхевенской национальной лаборатории США (BNL) и пучком  $^{32}\text{S}$  3.7 А·ГэВ на синхрофазотроне ОИЯИ [10-12].

Метод ядерной эмульсии по сравнению с подходами, исследующими взаимодействия встречных пучков ядер, является наиболее информативным. Ядерная фотоэмульсия имеет высокую пространственную разрешающую способность, позволяет наблюдать акт соударения в 4□-геометрии эксперимента [13].

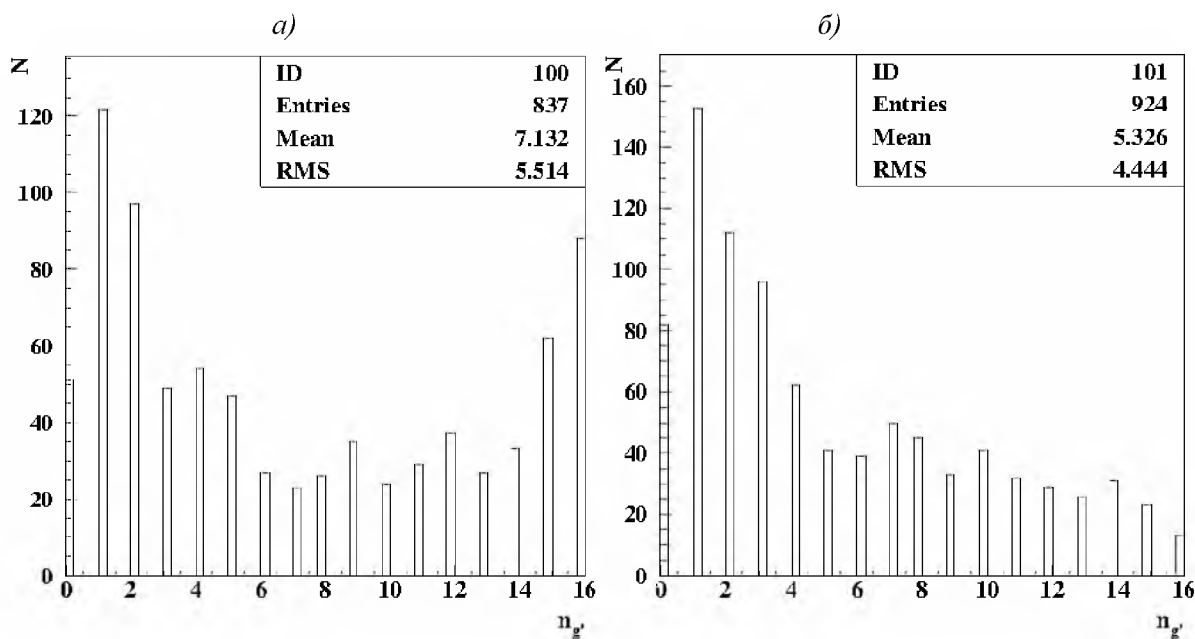
Классификация вторичных частиц проводилась согласно общепринятым в фотоэмульсионной методике критериям: *b*-частицы – фрагменты ядра мишени с кинетической энергией на нуклон  $E_{кин} < 26$  МэВ и пробегом  $R < 3$  мм; *g*-частицы – это в основном протоны отдачи с относительной ионизацией  $J/J_0 > 1.4$  (где  $J_0$  – минимальная ионизация, соответствующая однозарядным фрагментам ядра снаряда), с кинетической энергией  $26 \leq E_{кин} \leq 400$  МэВ и пробегом  $R > 3$  мм; *h*-частицами называется совокупность сильноионизирующих *g*- и *b*-частиц ( $N_h = n_b + n_g$ ); *s*-частицы – ливневые частицы, в основном пионы и провзаимодействовавшие протоны ядра снаряда с относительной ионизацией  $J/J_0 < 1.4$  и с кинетической энергией  $E_{кин} > 400$  МэВ; *b'*-частицы – фрагменты ядра снаряда, треки которых находятся внутри конуса с углом раствора  $\theta_{кр}$ , удовлетворяющим соотношению  $\sin \theta_{кр} = 0,2 \text{ ГэВ}/P_0$ , где  $P_0$  – первичный импульс на нуклон налетающего ядра.

## Результаты и обсуждение

В центральных взаимодействиях по сравнению с периферическими в процессе взаимодействия участвует большее число нуклонов сталкивающихся ядер, и реализуются большие передачи энергии-импульса, что в свою очередь, приводит к образованию большего числа ливневых частиц

и уменьшения числа спектаторных фрагментов и их суммарного заряда. Для оценки числа провзаимодействовавших нуклонов ядра снаряда используется вспомогательная величина  $\nu = A - A/p_p Q$ , где  $A$  и  $p_p$  – атомный вес и число протонов ядра-снаряда, а  $Q = \sum Z_f$  – сумма зарядов всех образовавшихся фрагментов налетающего ядра. Для оценки числа провзаимодействовавших протонов используется величина  $n_{g'} = \nu \cdot p_p / A$ .

На рисунке 1 представлено распределение неупругих событий по числу провзаимодействовавших протонов ядра снаряда для взаимодействий ядер серы с ядрами фотоэмульсии при энергии 200 А ГэВ и 3.7 А ГэВ.



a) –  $S+Em$  200 А ГэВ; б) –  $S+Em$  3.7 А ГэВ

Рисунок 1 – Распределение по числу провзаимодействовавших нуклонов ядра снаряда  $n_{g'}$  для взаимодействий серы с ядрами фотоэмульсии при энергиях 200 А ГэВ и 3.7 А ГэВ с числом ливневых частиц  $n_s > 0$ .

Как видно из рисунка 1а, во взаимодействиях  $S+Em$  200 А ГэВ наблюдается корытообразное распределение с увеличенным числом событий в области как малых, так и больших значений  $n_{g'}$ . При этом, в области малых значений  $n_{g'}$  увеличение вероятности событий объясняется существованием довольно большого количества периферических взаимодействий. В области больших  $n_{g'}$  наблюдаются события полного разрушения налетающего ядра. Исследование характеристик таких событий и является целью данного исследования.

Прежде всего, хотелось бы обратить внимание, что событий полного разрушения ядра снаряда довольно много во взаимодействиях  $S+Em$  200 А ГэВ. Количество таких событий составляет около 18 процентов от общего числа взаимодействий. При этом в области  $n_{g'} \geq 15$  наблюдается существенное увеличение числа событий по сравнению со средним значением в этой области.

Однако, при более низких энергиях во взаимодействиях серы с ядерной эмульсией ( $S+Em$  3.7 А ГэВ), как видно из рисунка 1б, никакого роста числа событий полного разрушения налетающего ядра не обнаруживается. Таким образом, вероятность появления таких событий критически зависит от энергии первичного ядра.

На рисунке 2 представлены распределения по числу провзаимодействовавших нуклонов ядра снаряда для взаимодействий золота  $Au$  с энергией 10.7 А ГэВ и ядер свинца  $Pb$  с энергией 158 А ГэВ с ядрами фотоэмульсии.

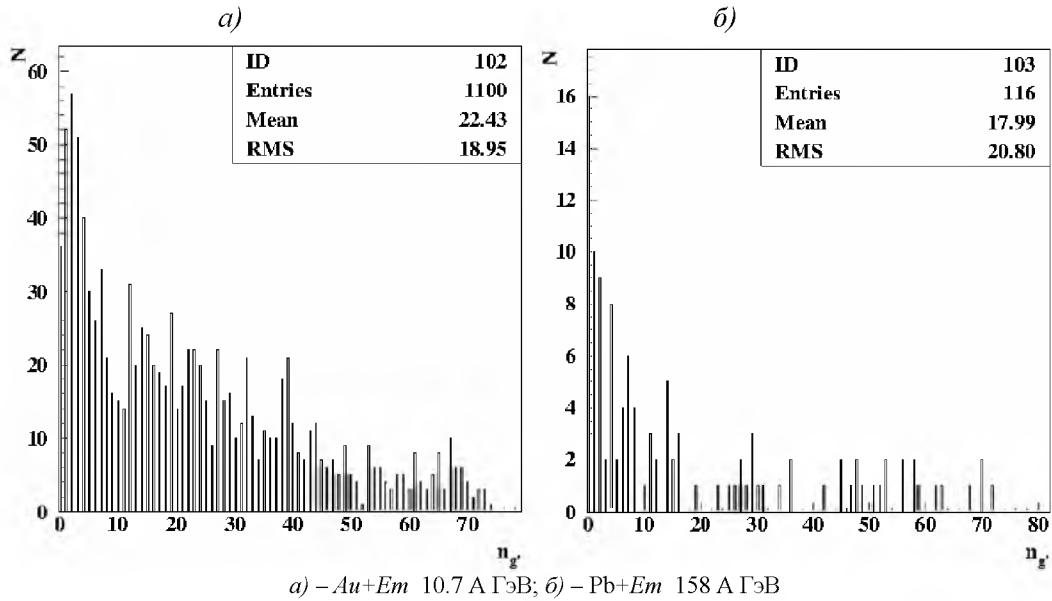


Рисунок 2 – Распределение по числу взаимодействовавших протонов ядра снаряда  $n_g$  для взаимодействий ядер золота Au с энергией 10.7 A ГэВ и ядер свинца Pb с энергией 158 A ГэВ с ядрами фотоэмульсии

Как видно из рисунка 2, рост числа событий полного разрушения ядра снаряда не обнаруживается.

Таким образом, или критичным является различие энергии между энергией свинца 158 АГэВ и серы 200 АГэВ, или на рост вероятности появления событий полного разрушения ядра снаряда влияет не только энергия взаимодействия, но и размеры налетающего ядра. Для проверки этой гипотезы рассмотрим взаимодействие S+Em 200 A ГэВ более подробно. А именно, взаимодействия ядер серы с тяжелыми и легкими ядрами фотоэмульсии отдельно.

В рассматриваемых экспериментах EMU01-коллаборации использовалась стандартная ядерная эмульсия типа BR-2. Она включает в себя водород (39.2%), ядра CNO-группы (35.3%) и ядра AgBr (25.5%).

Одним из наиболее оптимальных параметров для отделения событий с легкими и тяжелыми ядрами фотоэмульсии является зависимость числа фрагментов ядра-мишени и множественности  $n_s$  частиц. Эта корреляционная зависимость представлена на рисунке 3.

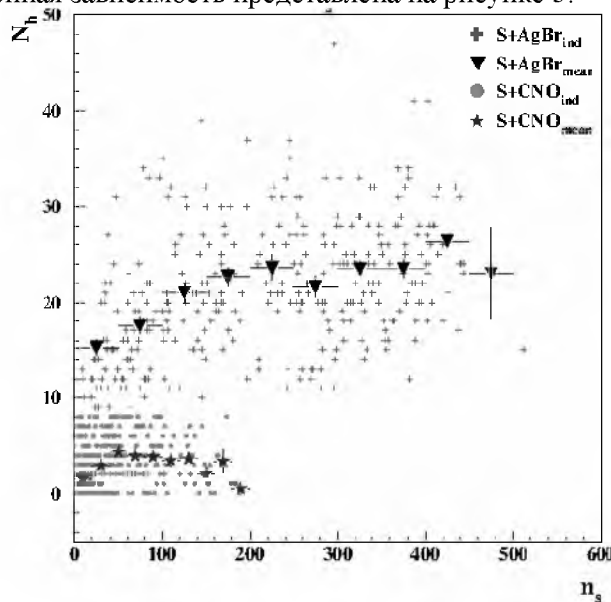


Рисунок 3 – Зависимость числа фрагментов ядра-мишени  $N_f$  и множественности  $n_s$  частиц для взаимодействий S+Em 200 АГэВ

Взаимодействия с легкими ядрами фотоэмульсии в данном случае ограничены условием  $N_h \leq 8$ , что соответствует заряду самого большого из легких ядер фотоэмульсии – ядра кислорода. Использование этого факта позволяет отделять большинство  $Au+AgBr$  событий, от  $Au+CNO$  событий.

Итак, для выяснения особенностей влияния параметров асимметричности (относительных размеров) взаимодействующей системы на вероятность появления событий полного разрушения налетающего ядра мы рассмотрели события с  $N_h \leq 8$  и с  $N_h > 8$ .

Результаты анализа представлены на рисунке 4. Причем для сравнения представлены взаимодействия  $S+Em$  и с энергией налетающего ядра 200 А ГэВ и с энергией 3.7 А ГэВ

Как видно из рисунка 4, в событиях с  $N_h \leq 8$  распределения по  $n_g$  подобны вне зависимости от энергии. Существенное отличие обнаруживается в событиях взаимодействия серы S с тяжелыми ядрами фотоэмульсии  $AgBr$ . При более низких энергиях наблюдается почти флетообразное распределение, а при энергиях 200 АГэВ обнаруживается существенный пик в области больших значений  $n_g$ .

Для понимания отличительных особенностей событий полного разрушения налетающего ядра серы мы провели сравнительный анализ распределений вторичных частиц в событиях с  $n_g \leq 14$  и  $n_g \geq 15$ .

Результаты сравнения по множественности линейных частиц  $n_s$ , множественности фрагментов ядра мишени  $N_h$  и средних псевдобыстротных распределений ливневых частиц представлены на рисунке 5.

Как видно из рисунка 5 все представленные графики критически отличаются друг от друга. Распределение по множественности линейных частиц для событий  $n_g \leq 14$  сконцентрированы в области малых значений со средним значением  $n_s = 66.83$ . Средняя множественность событий с  $n_g \geq 15$  почти в 5 раз выше.

Количество фрагментов ядра мишени в большинстве событий с  $n_g \geq 15$  больше восьми. Таким образом, в основном такие события появляются во взаимодействиях серы с тяжелыми ядрами фотоэмульсии, что подтверждает результаты представленные на рисунке 4.

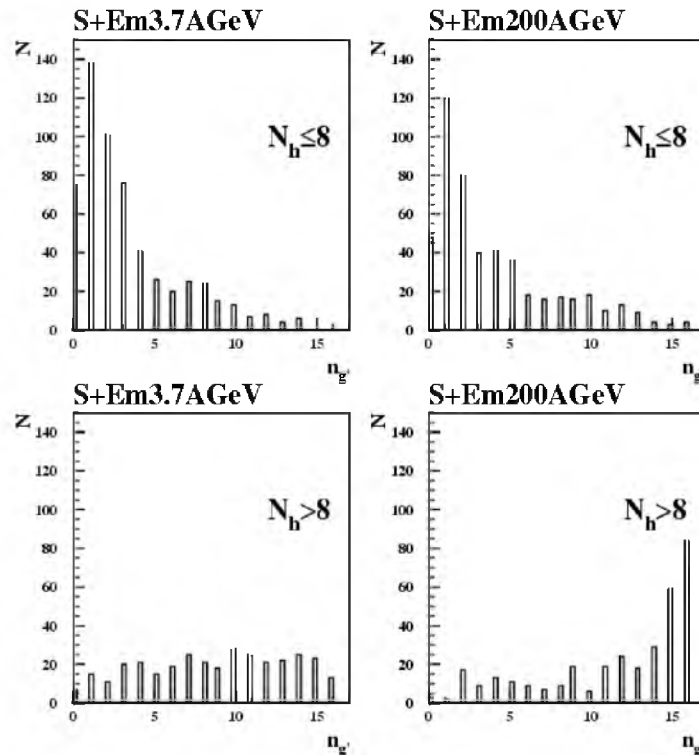


Рисунок 4– Распределение по числу провзаимодействовавших протонов ядра снаряда  $n_g$  для взаимодействий  $S+Em$  200 А ГэВ и  $S+Em$  3.7 А ГэВ с различным числом фрагментов ядра мишени  $N_h$

В то же время необходимо отметить, что в событиях с  $n_{g'} \leq 14$  присутствует довольно большая часть взаимодействий серы с тяжелыми ядрами фотоэмульсии. Таким образом, в данном случае нет жесткого разделения динамики развития процесса взаимодействия по параметру асимметрии взаимодействующих ядер.

Среднее псевдобыстротное распределение ливневых частиц в событиях с  $n_{g'} \geq 15$  характеризуется узким пиком в области малых значений  $\langle \eta \rangle$ . Дисперсия распределения в данном случае в 2.5 раза меньше, чем для событий с  $n_{g'} \leq 14$ .

### Заключение

В заключении суммируем вышеизложенное. Во взаимодействиях ядер серы с тяжелыми ядрами фотоэмульсии при энергии 200 АГэВ наблюдается аномально высокое количество событий полного разрушения ядра снаряда, имеющие следующие отличительные особенности.

Появление таких событий зависит от энергии взаимодействия (не обнаруживается во взаимодействиях ядер серы с ядрами фотоэмульсии при энергии 3.7 АГэВ) и степени асимметрии взаимодействующих ядер (не обнаруживается во взаимодействиях тяжелых ядер во взаимодействиях с ядерной эмульсией).

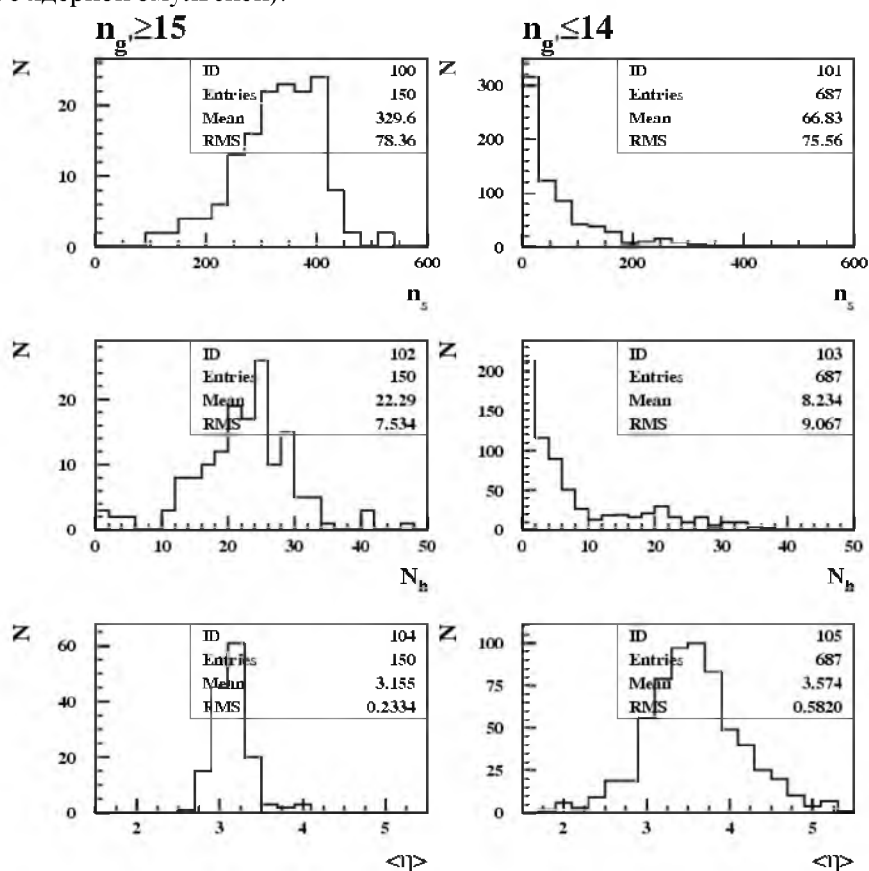


Рисунок 5 – Распределение по множественности ливневых частиц  $n_s$ , множественности фрагментов ядра мишени  $N_B$  и средних псевдобыстротных распределений  $\langle \eta \rangle$  ливневых частиц для взаимодействий  $S+Em$  200 АГэВ с различным числом провазимодействовавших протонов ядра снаряда  $n_{g'}$ .

События полного разрушения налетающего ядра характеризуются высокой множественностью ливневых частиц и усконаправленным угловым распределением на большие углы (узким пиком в области малых значений средней псевдобыстроты  $\langle \eta \rangle$ ).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Foka P., Janik M.A. (2016) An overview of experimental results from ultra-relativistic heavy-ion collisions at the CERN LHC: Hard probes. Reviews in Physics 1, 172–194.
- [2] Mishra D.K. (2016) Experimental results on charge fluctuations in heavy-ion collisions. arXiv: 1607.05613v1 nucl-ex.

- [3] Zhou Y. (2016) Review of anisotropic flow correlations in ultrarelativistic heavy-ion collisions. *arXiv: 1607.05613v1 nucl-ex*.
- [4] Andronic A. (2014) An overview of the experimental study of quark-gluon matter in high-energy nucleus-nucleus collisions. *Int.J.Mod.Phys A*, V29, N22, Art. N143004.
- [5] Ivanov Yu.B. (2013) Baryon stopping as a probe of deconfinement on set in relativistic heavy-ion collisions. *Physics Letters B*, V721, P.123–130.
- [6] Stefanek G. et al. (2016) Recent results from the search for the critical point of strongly interacting matter at the CERN SPS. *Nucl.Part.Phys.Proc.*, V273-275, P. 2596-2598.
- [7] Kumar L. (2013) STAR Results from the RHIC Beam Energy Scan-I. *Nuclear Physics A*, V904–905, P.256–263.
- [8] Melkumov G.L. (2013) Exploration of the Phase Diagram of Strongly Interacting Matter at CERN SPS. *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, V245, P.283.
- [9] Luzum M., Petersen H. (2014) Initial state fluctuations and final state correlations in relativistic heavy-ion collisions. *J.Phys.G: Nucl.Part.Phys.* Code 063102, V41, N6.
- [10] Adamovich M.I. et al. (2000) Azimutal correlations of secondary particles in  $^{32}\text{S}$  induced interactions with Ag(Br) nuclei at 4.5 GeV/c/nucleon. *Part. Nucl. Lett.*, N4(101), P.75-82.
- [11] Adamovich M.I. et al. (1989) Rapidity densities and their fluctuations in central 200 AGeV  $^{32}\text{S}$  interactions with Au and Ag. Br nuclei EMU01 collaboration. *Phys. Lett. B*, V.227, P.285-290.
- [12] Stenlund E. et al. (1995) Particle production in gold and lead induced interactions at AGS and SPS. *Nucl.Phys. A*, V590, Iss.248, P.597-600.
- [13] Zarubin P.I. (2012) Clusters in Nuclei. *Lecture Notes in Physics*, V3, P.248.

#### REFERENCES

- [1] Foka P., Janik M.A. (2016) An overview of experimental results from ultra-relativistic heavy-ion collisions at the CERN LHC: Hard probes. *Reviews in Physics* 1, 172–194.
- [2] Mishra D.K. (2016) Experimental results on charge fluctuations in heavy-ion collisions. *arXiv: 1607.05613v1 nucl-ex*.
- [3] Zhou Y. (2016) Review of anisotropic flow correlations in ultrarelativistic heavy-ion collisions. *arXiv: 1607.05613v1 nucl-ex*.
- [4] Andronic A. (2014) An overview of the experimental study of quark-gluon matter in high-energy nucleus-nucleus collisions. *Int.J.Mod.Phys A*, V29, N22, Art. N143004.
- [5] Ivanov Yu.B. (2013) Baryon stopping as a probe of deconfinement on set in relativistic heavy-ion collisions. *Physics Letters B*, V721, P.123–130.
- [6] Stefanek G. et al. (2016) Recent results from the search for the critical point of strongly interacting matter at the CERN SPS. *Nucl.Part.Phys.Proc.*, V273-275, P. 2596-2598.
- [7] Kumar L. (2013) STAR Results from the RHIC Beam Energy Scan-I. *Nuclear Physics A*, V904–905, P.256–263.
- [8] Melkumov G.L. (2013) Exploration of the Phase Diagram of Strongly Interacting Matter at CERN SPS. *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, V245, P.283.
- [9] Luzum M., Petersen H. (2014) Initial state fluctuations and final state correlations in relativistic heavy-ion collisions. *J.Phys.G: Nucl.Part.Phys.*, Code 063102, V41, N6.
- [10] Adamovich M.I. et al. (2000) Azimutal correlations of secondary particles in  $^{32}\text{S}$  induced interactions with Ag(Br) nuclei at 4.5 GeV/c/nucleon. *Part. Nucl. Lett.*, N4(101), P.75-82.
- [11] Adamovich M.I. et al. (1989) Rapidity densities and their fluctuations in central 200 AGeV  $^{32}\text{S}$  interactions with Au and Ag. Br nuclei EMU01 collaboration. *Phys. Lett. B*, V.227, P.285-290.
- [12] Stenlund E. et al. (1995) Particle production in gold and lead induced interactions at AGS and SPS. *Nucl.Phys. A*, V590, Iss.248, P.597-600.
- [13] Zarubin P.I. (2012) Clusters in Nuclei. *Lecture Notes in Physics*, V3, P.248.

ӘОЖ: 539.12; 539.1

Е.А. Ғрушевская, И.А. Лебедев, А.Т. Темірәлиев, А.И. Федосимова

Физико-техникалық институты, Алматы қ., Қазақстан

#### АСИММЕТРИЯЛЫ ЯДРОЛАРДЫҢ ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕРІНДЕ СНАРЯДТЫҢ ЯДРОСЫНЫҢ ТОЛЫҚ ТАЛҚАНДАНУ ЖАҒДАЙЛАРЫНЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

**Аннотация.** Асимметриялы ядролардың өзара әрекеттерінде снарядтың ядросының толық талқандану жағдайларының сипаттамаларын зерттеу жүргізілді. Аталған жұмыста ядро-ядролық өзара әрекеттерді

эксперименттік зерттеу үшін ядролық эмульсия әдісі қолданылды. Ұшып келуші ядроны толық талқандау жағдайларындағы екінші ретті бөлшектердің жекелеген өзара әрекет-терінің үлестірімі салынды және екінші ретті бөлшектердің орташа сипаттамаларымен аналогия-лық үлестірімінің салыстырмалы талдауы жасалды. Күкірттің ядроларының фотоэмульсияның ауыр ядроларымен 200 АГЭВ энергиядағы өзара әрекеттерінде жалпы нормадан ауытқыған жоғары мөлшердегі снарядтың ядросының толық талқандау жағдайлары байқалады, олардың төмендегідей айрықша ерекшеліктері бар. Бұндай оқиғалардың пайда болуы өзара әрекет энергиясына (3.7 АГЭВ энергиясында күкірт ядроларының фотоэмульсия ядроларымен өзара әрекеттерінде байқалмайды) және өзара әрекет ететін ядролардың асимметрия дәрежесіне (ауыр ядролардың ядролық эмульсиямен өзара әрекеттерінде байқалмайды) тәуелді болады. Ұшып келуші ядроны толық талқандау жағдайлары нөсерлі бөлшектердің өте көптігімен және үлкен бұрыштарға еңсіз бағытталған бұрыштық үлестіріммен (орташа псевдожылдамдықтың жіңішке пигіндегі шағын мәндер аумағында) сипатталады.

**Түйін сөздер:** ядролардың өзара әрекеті, көптеген пронестер, фрагментация, ядролық псевдожылдам үлестірімі.

**Сведения об авторах:**

Лебедев И.А. – д.ф.-м.н., заведующий лабораторией, Физико-технический институт, Алматы, Ибрагимова 11, тел.386-55-42, 8(777)3708643, e-mail: [lebedev692007@vandex.ru](mailto:lebedev692007@vandex.ru), [lebedev@sci.kz](mailto:lebedev@sci.kz).

Темиралиев А.Т. – к.ф.-м.н., СИС, Физико-технический институт, Алматы, Ибрагимова 11, тел.386-55-42, e-mail: [abzal@sci.kz](mailto:abzal@sci.kz);

Федосимова А.И. – инженер, Физико-технический институт, Алматы, Ибрагимова 11, тел.386-55-42, e-mail: [ananastasia@list.ru](mailto:ananastasia@list.ru);

Грушевская Е.А. – инженер, Физико-технический институт, Алматы, Ибрагимова 11, тел.386-55-42, e-mail: [grushevskaiya@bk.ru](mailto:grushevskaiya@bk.ru)