

УДК 539.12

А. Х. АРГЫНОВА, А. Ш. ГАЙТИНОВ, И. А. ЛЕБЕДЕВ, А. А. ЛОКТИОНОВ, П. Б. ХАРЧЕВНИКОВ

(Физико-технический институт, Алматы, Казахстан)

ОБРАЗОВАНИЕ МНОГОЗАРЯДНЫХ ФРАГМЕНТОВ ЯДЕР *Au* (10 А·ГэВ) И *Pb* (158 А·ГэВ) ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ С ЯДРАМИ ФОТОЭМУЛЬСИИ

Аннотация. Целью работы является изучение образования многозарядных фрагментов ядер *Au* (10,7 А·ГэВ) и *Pb* (158 А·ГэВ), взаимодействующих с ядрами фотоэмульсии. При этом используется метод толстослойной фотоэмульсии. Анализ полученных экспериментальных данных позволил выявить следующие особенности: вероятность наблюдения событий с одним многозарядным фрагментом для ядер *Pb* оказалась существенно меньше (полтора раза), чем для ядер *Au*, что, по-видимому связано с особой устойчивостью ядра *Pb* (дважды магическое); доля событий, в которых процесс фрагментации взрывного типа, оказалась практически одинаковой для обоих ядер; среднее число фрагментов с зарядами 1 и 2 для ядер *Pb*, оказалось систематически меньше, чем для ядер *Au*. Сравнительный анализ результатов является весьма полезным для понимания процесса фрагментации релятивистских ядер в целом.

Ключевые слова: ядро, взаимодействие, фрагментация, заряд, устойчивость ядра.

Тірек сөздер: ядро, әрекеттестік, фрагментация, заряд, ядро тұрақтылығы.

Key words: nucleus, interaction, fragmentation, charge, stability of a nucleus.

Введение. Во взаимодействиях ядер с ядрами в фотоэмульсии наряду с фрагментами с зарядом один и два образуются многозарядные фрагменты (МЗ) с зарядами $Z \geq 3$.

События с одним многозарядным фрагментом нами изучались ранее [1-3]. Были найдены критерии выделения событий, в которых реализуется фрагментация испарительного типа (при малых передачах энергии происходит последовательное испускание фрагментов с зарядами $Z=1$ и $Z=2$) и взрывного типа, когда все фрагменты образуются одновременно с любым зарядом).

Здесь также используется фотоэмульсионный метод, который обладает рядом преимуществ: возможность изучать процессы в условиях 4π-геометрии, идентифицировать образованные частицы, производить измерения с микронной точностью, на основе измерения плотности δ-электронов на следах фрагментов и числа разрывов на них определять их заряд.

Настоящая работа является продолжением исследований фрагментации ядер – выявление закономерностей, связанные с образованием любого числа многозарядных фрагментов ($n_{\text{МЗ}} \geq 1$). Слои фотоэмульсии облучались ядрами *Au* на ускорителе в Брукхейвене (США) и ядрами *Pb* – в ЦЕРНе (Женева).

Результаты и их обсуждение

В таблицах 1 и 2 представлены для ядер ${}_{79}\text{Au}^{197}$ (10,7 А·ГэВ) и ${}_{82}\text{Pb}^{208}$ (158 А·ГэВ) процентное содержание событий (вероятность) с различным числом многозарядных фрагментов ($n_{\text{МЗ}}$).

Таблица 1 – Вероятность (%) образования событий с различным числом многозарядных фрагментов ($n_{\text{МЗ}}$) и средние числа однозарядных ($\langle n_{Z=1} \rangle$), двухзарядных ($\langle n_{Z=2} \rangle$) и всех фрагментов ($\langle n_{\text{ф}} \rangle$) для ядер *Au*

$\langle n \rangle$ $n_{\text{МЗ}}$	$\frac{1}{N_{\text{с}}} \frac{dN_{\text{с}}}{dn_{\text{МЗ}}} (\%)$	$\langle n_{Z=1} \rangle$	$\langle n_{Z=2} \rangle$	$\langle n_{\text{ф}} \rangle$
1	38,2±2,1	6,2±0,2	3,1±0,1	10,3±0,3
2	25,3±1,7	9,7±0,3	5,1±0,2	15,8±0,4
3	15,4±1,3	10,9±0,3	5,4±0,2	19,3±1,3
4	8,6±0,7	10,8±0,4	5,9±0,3	20,8±0,5
5	3,1±0,5	12,1±0,6	6,2±0,4	23,3±0,7
6	1,3±0,2	11,1±1,0	5,7±0,5	24±1,4

Таблица 2 – Вероятность (%) образования событий с различным числом многозарядных фрагментов ($n_{мз}$) и средние числа однозарядных ($\langle n_{z=1} \rangle$), двухзарядных ($\langle n_{z=2} \rangle$) и всех фрагментов ($\langle n_f \rangle$) для ядер *Pb*

$\langle n \rangle$ $n_{мз}$	$\frac{1}{N_c} \frac{dN_c}{dn_{мз}}$ (%)	$\langle n_{z=1} \rangle$	$\langle n_{z=2} \rangle$	$\langle n_f \rangle$
1	58,1±4,8	2,5±0,3	1,5±0,1	5,0±0,4
2	17,6±2,3	6,6±0,8	3,3±0,3	11,9±1,0
3	8,8±1,6	7,3±1,0	4,3±0,4	14,7±1,2
4	4,2±1,0	10,3±1,2	5,0±0,5	19,4±1,5
5	2,5±0,8	9,5±1,1	5,5±0,7	20,9±1,5
6	0,35±0,3	10,5±4,0	4,5±2,5	21,0±5,7

Для сравнения результатов, относящихся к ядрам, близкими по массе, но значительно отличающимися по первичной энергии, имеет смысл привести и соответствующие рисунки.

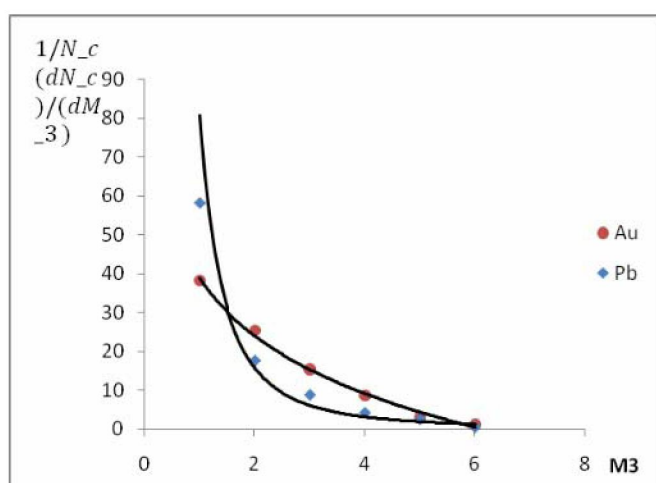


Рисунок 1 – Зависимость вероятности (доли %) образования событий от числа многозарядных фрагментов ($n_{мз}$)

Из табличных данных и рисунка 1 видно, что вероятность наблюдения событий с одним многозарядным фрагментом ($n_{мз}=1$) для ядер *Pb* существенно отличается, чем для *Au* - в полтора раза больше. А если еще учесть, что эти события (для обоих ядер) подавляющем большинстве относятся к событиям, в которых процесс фрагментации происходит испарительного типа: (90,1% - *Pb* и 73,3% - *Au*), то ядро *Pb* как бы сдерживает образование событий взрывного типа, что, по-видимому, связано с особой устойчивостью этого ядра, как ядра дважды магического, содержащего 82 протона и 126 нейтрона.

Что же касается событий с числом многозарядных фрагментов $n_{мз} \geq 2$, то как видно из таблицы 1 и рисунка 1, вероятность наблюдения этих событий для *Pb* систематически меньше, чем для *Au*. Здесь сказывается значительное превышение событий с $n_{мз}=1$ для ядер *Pb*, чем -*Au*.

Если же рассмотреть события с процессом фрагментации только взрывного типа [1], то из данных таблицы 3 видно, что доля событий с одинаковым числом многозарядных фрагментов ($n_{мз}$) для обоих ядер в пределах ошибок совпадают. Совпадают также их средние числа: $\langle n_{мз} \rangle = 2,58 \pm 0,11$ (*Au*) и $\langle n_{мз} \rangle = 2,53 \pm 0,24$ (*Pb*)

Таблица 3 – Доля событий (%) с процессом фрагментации взрывного типа при $n_{мз} \geq 1$

$n_{мз}$	Доля событий (%)	
	<i>Au</i>	<i>Pb</i>
1	15,9±1,6	13,5±3,1
2	39,6±2,8	44,9±6,5
3	24,1±2,0	22,4±4,2
4	13,5±1,5	10,9±2,8
5	4,9±0,8	6,4±3,3
6	2,1±0,5	1,2±0,7

Рассмотрим теперь поведение средних значений фрагментов с зарядами 1 и 2 ($\langle n_{z=1} \rangle$, $\langle n_{z=2} \rangle$) в событиях с различным числом многозарядных фрагментов ($n_{M3} \geq 1$).

В таблицах 1 и 2 и на рисунках 2 и 3 представлены полученные значения этих величин.

Рисунок 2 – Зависимость $\langle n_{z=1} \rangle$ от числа многозарядных фрагментов (n_{M3})

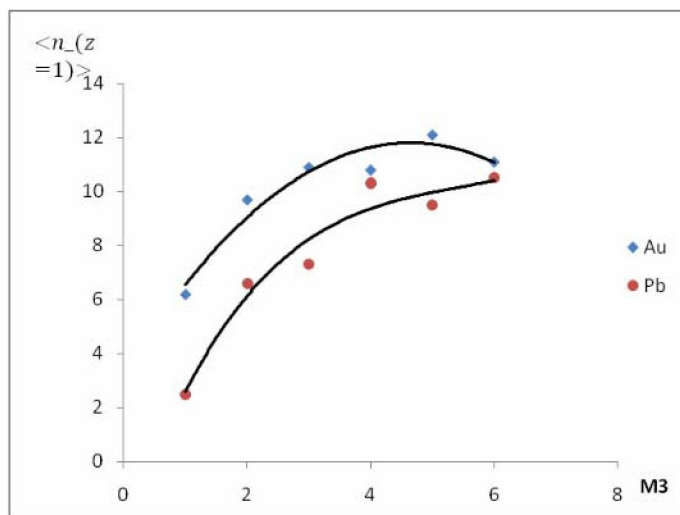


Рисунок 3 – Зависимость $\langle n_{z=2} \rangle$ от числа многозарядных фрагментов (n_{M3})

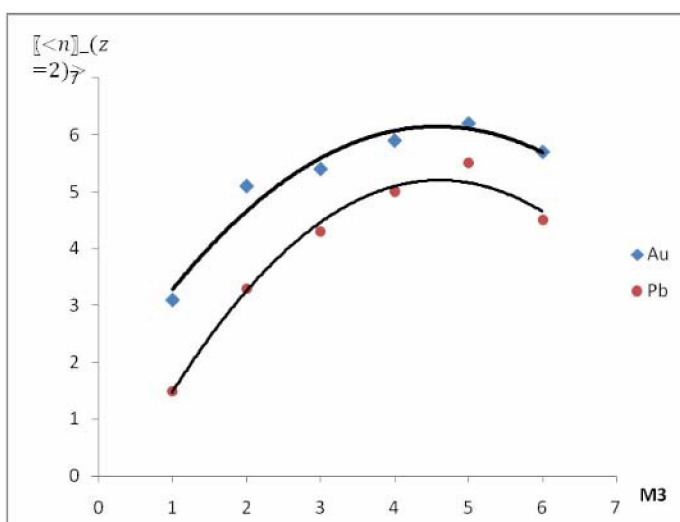
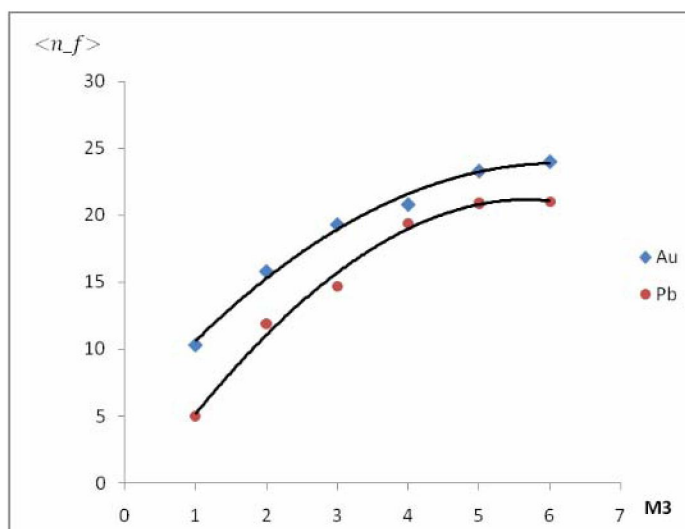


Рисунок 4 – Зависимость среднего числа всех фрагментов ($\langle n_f \rangle$) от числа многозарядных фрагментов (n_{M3})



Для обоих ядер *Au* и *Pb* значения $\langle n_{z=1} \rangle$ и $\langle n_{z=2} \rangle$ с увеличением $n_{мз}$ возрастает до $n_{мз}=4$, а затем выравнивается. Следует отметить, что значения $\langle n_{z=1} \rangle$ и $\langle n_{z=2} \rangle$ в событиях для ядер *Pb* меньше, чем для ядер *Au*, причем наиболее заметно (~ 2 раза), в событиях с $n_{мз}=1$. Здесь опять же сказывается то обстоятельство, что в событиях с $n_{мз}=1$ для ядер *Pb* в основном происходит процесс фрагментации испарительного типа, а следовательно, малая передача энергии остаточному ядру, что ведет к меньшему числу фрагментов с $Z=1$ и $Z=2$. Что касается для событий с $n_{мз} \geq 2$, в которых $\langle n_{z=1} \rangle$ и $\langle n_{z=2} \rangle$ для *Pb* систематически меньше, чем для ядер *Au*, по-видимому связано с особой устойчивостью ядер *Pb*.

Рассмотрим теперь поведение среднего значения полного числа фрагментов, образованных в каждом событии: $n_f = n_{z=1} + n_{z=2} + n_{мз}$.

В таблице 1 и на рисунке 4, где представлены полученные результаты, видно, что $\langle n_f \rangle$ с увеличением $n_{мз}$ заметно возрастает. Это не удивительно: во-первых, с увеличением $n_{мз}$ возрастает число многозарядных фрагментов в событиях и, во-вторых, возрастает, как было указано выше, значение $\langle n_{z=1} \rangle$ и $\langle n_{z=2} \rangle$. Здесь также сохраняется закономерность, как и для фрагментов с зарядами 1 и 2, то есть $\langle n_f \rangle$ систематически меньше в событиях для ядер *Pb*, чем для ядер *Au*. Причина последнего была отмечена выше.

В таблице 4, где представлены средние значения множественностей s-, g- и b- частиц в событиях с различным числом многозарядных фрагментов, следует:

- как и следовало ожидать, для ядер *Pb* со значительно большей энергией значения $\langle n_s \rangle$ заметно выше, чем для ядер *Au*, причем для событий с $n_{мз} \geq 2$ оказались в пределах ошибок одинаковыми и больше, чем для событий с $n_{мз}=1$ (более периферическое взаимодействие);
- во всех событиях ($n_{мз} \geq 1$) для обоих ядер значение $\langle n_g \rangle$, отражающее число провзаимодействовавших протонов ядра-снаряда, оказались одинаковыми в пределах ошибок, что не удивительно, так как массы этих ядер близки по величине и ядра-мишени одинаковы;
- во всех событиях ($n_{мз} \geq 1$) для обоих ядер значение $\langle n_b \rangle$ (фрагменты ядер-мишеней) практически оказались одинаковыми по той же причине, что указано в предыдущем пункте.

Таблица 4 – Среднее число s, g- и b- частиц, образованных во взаимодействиях ядер *Au* и *Pb* с ядрами фотоэмульсии с различным числом $n_{мз}$

<i>Au</i>				<i>Pb</i>		
$\langle n \rangle$ $n_{мз}$	$\langle n_s \rangle$	$\langle n_g \rangle$	$\langle n_b \rangle$	$\langle n_s \rangle$	$\langle n_g \rangle$	$\langle n_b \rangle$
1	46±4	4,5±0,4	3,4±0,2	83±12	3,4±0,4	4,2±0,4
2	60±5	5,3±0,5	3,6±0,3	172±31	3,8±0,8	3,2±0,4
3	68±6	5,4±0,7	4,2±0,5	160±36	4,0±1,2	3,9±0,9
4	58±7	5,1±0,8	3,3±0,5	180±58	5,1±1,8	3,2±1,1
5	51±9	6,3±1,5	4,5±1,1	158±61	5,3±2,5	4,3±2,6
6	64±14	5,3±3,0	4,5±2,1	149±56	5,0±2,6	4,5±2,4

Заключение. Анализ характеристик многозарядных фрагментов, образованных во взаимодействиях двух близких по массе $^{79}Au^{197}$ (10,7 А·ГэВ) и $^{82}Pb^{208}$ (158 А·ГэВ и существенно разных по энергии с ядрами фотоэмульсии позволил выявить следующее:

- события с одним многозарядным фрагментом ($n_{мз}=1$) для ядер *Pb* в полтора раза превосходит, чем для ядер *Au*, что, по-видимому, связано особой устойчивостью для этого ядра;
- доля событий, в которых происходит процесс фрагментации взрывного типа, и с равным числом многозарядных фрагментов ($n_{мз}$), оказалась одинаковой в пределах ошибок;
- среднее число фрагментов с зарядами 1 и 2 ($\langle n_{z=1} \rangle$ и $\langle n_{z=2} \rangle$) и всех фрагментов в событиях $\langle n_f \rangle$ для ядра *Pb* при всех $n_{мз} \geq 1$, особенно при $n_{мз}=1$, систематически меньше, чем для ядра *Au*;
- средние значения множественностей частиц ядра-мишени g- и b-частиц оказались практически одинаковыми, за исключением генерированной s-частицы – для ядра *Pb* существенно больше, чем для *Au*, что связано значительным превышением его первичной энергии (158 А·ГэВ).

ЛИТЕРАТУРА

1 Аргынова А.Х., Гайтинов А.Ш., Лебедев И.А., Локтионов А.А., Скоробогатова В.И., Харчевников П.Б. Механизмы фрагментации тяжелых ядер Au (10,7 А·ГэВ) и Pb (158 А·ГэВ) во взаимодействиях с ядрами фотоэмульсии // Вестник КазНАЕН. – 2011. – № 4. – С. 26-30.

2 Аргынова А.Х., Гайтинов А.Ш., Лебедева А.И., Лебедев И.А., Локтионов А.А., Харчевников П.Б. Особенности характеристик фрагментации легких ядер (${}_{14}Si^{28}$ – 14 А·ГэВ, ${}_{16}S^{32}$ – 200 А·ГэВ) и тяжелых (${}_{79}Au^{197}$ – 10,7 А·ГэВ, ${}_{82}Pb^{208}$ – 158 А·ГэВ) во взаимодействиях с ядрами фотоэмульсии // Вестник КазНАЕН. – 2013. – № 1. – С. 68-72.

3 Аргынова А.Х., Гайтинов А.Ш., Локтионов А.А., Харчевников П.Б. Многозарядные фрагменты ядер Au (10,7 А·ГэВ), образованные во взаимодействиях с ядрами фотоэмульсии // Доклады 9-ой межд. конф. ICNRP'13 "Nuclear and Radiation Physics" 24-27 сентября 2013. – С. 231-233.

REFERENCES

1 Argynova A.H., Gajtinov A.Sh., Lebedev I.A., Loktionov A.A., Skorobogatova V.I., Harchevnikov P.B. Mechanizmy fragmentacii tzhzhelyh jader Au (10,7 A·GjeV) i Pb (158 A·GjeV) vo vzaimodejstvijah s jadrami fotojemul'sii. Vestnik KazNAEN. 2011. № 4. S. 26-30.

2 Argynova A.H., Gajtinov A.Sh., Lebedeva A.I., Lebedev I.A., Loktionov A.A., Harchevnikov P.B. Osobennosti harakteristik fragmentacii legkih jader (${}_{14}Si^{28}$ – 14 A·GjeV, ${}_{16}S^{32}$ – 200 A·GjeV) i tzhzhelyh (${}_{79}Au^{197}$ – 10,7 A·GjeV, ${}_{82}Pb^{208}$ – 158 A·GjeV) vo vzaimodejstvijah s jadrami fotojemul'sii. Vestnik KazNAEN. 2013. № 1. S. 68-72.

3 Argynova A.H., Gajtinov A.Sh., Loktionov A.A., Harchevnikov P.B. Mnogozarjadnye fragmenty jader Au (10,7 A·GjeV), obrazovannye vo vzaimodejstvijah s jadrami fotojemul'sii. Doklady 9-oj mezhd. konf. ICNRP'13 "Nuclear and Radiation Physics" 24-27 sentjabrja 2013. S. 231-233.

Резюме

А. Х. Аргынова, А. Ш. Гайтинов, И. А. Лебедев, А. А. Локтионов, П. Б. Харчевников

(Физика-техникалық институты, Алматы, Қазақстан)

ФОТОЭМУЛЬСИЯ ЯДРОЛАРЫМЕН ӘРЕКЕТТЕСУІНДЕГІ Au (10 А·ГэВ)
ЖӘНЕ Pb (158 А·ГэВ) КӨП ЗАРЯДТЫ БӨЛІКТЕР ЯДРОЛАРЫНЫҢ ТҮЗІЛУІ

Жұмыстың мақсаты Au (10,7 А·ГэВ) және Pb (158 А·ГэВ) көп зарядты бөліктер ядроларының, фотоэмульсия ядроларымен әрекеттесуіндегі түзілуін зерттеу. Бұл ретте қалыңқабатты фотоэмульсияның әдісі пайдаланылады. Алынған эксперименталды деректердің талдауы келесі ерекшеліктерді анықтауға мүмкіндік берді: Pb ядролары үшін, бір көп зарядты фрагменттік оқиғаларды бақылаудың ықтималдығы Au ядроларына қарағанда айтарлықтай аз болып шықты (бір жарым рет), бұл Pb ядроларының ерекше тұрақтылығымен байланған (екі ретті тылсымды); жарылу түрдегі фрагментация процесстердегі оқиғалардың сыбағасы іс жүзінде бірдей болып шықты; Pb ядролары үшін, 1 және 2 зарядты фрагменттердің орташа саны, Au ядроларына қарағанда жүйелі түрде аз болып шақты. Массасы бойынша жақын және энергиясы бойынша айтарлықтай айырмашылығы бар екі нәтиженің салыстырмалы талдауы, бүтін релятивисті ядролардың фрагментация процесін түсіну үшін әбден пайдалы болып табылады.

Тірек сөздер: ядро, әрекеттестік, фрагментация, заряд, ядро тұрақтылығы.

Summary

A. Kh. Argynova, A. Sh. Gajtinov, I. A. Lebedev, A. A. Loctionov, P. B. Harchevnikov

(Institute of Physics and technology, Almaty, Kazakhstan)

FORMATION OF MULTICHARGING FRAGMENTS OF NUCLEUS (10A GeV) AND
(158A GeV) IN INTERACTIONS WITH PHOTOEMULSION NUCLEUS

The purpose of the work is studying of formation of multicharging fragments of nucleus of Au (10,7 A·GeV) and Pb (158 A·GeV), interacting with photoemulsion nucleus. The method of a thick-layer photoemulsion is used. The analysis of the obtained experimental data allowed to reveal the following features: the probability of supervision of events with one multicharging fragment for nucleus of Pb appeared significantly less (one and a half times), than for Au nucleus that, it is connected with special stability of a nucleus of Pb (twice magic); share of events in which process of fragmentation of belong to explosive type, almost identical to both nucleus; the average of fragments with charges 1 and 2 for Pb nucleus, appeared systematically less, than for Au nucleus. The comparative analysis of results of two relatives is very useful for understanding of process of fragmentation of relativistic nucleus as a whole.

Keywords: nucleus, interaction, fragmentation, charge, stability of a nucleus.

Поступила 05.05.2014 г.