НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ДВУХЗАРЯДНЫХ ФРАГМЕНТОВ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ЯДЕР ЗОЛОТА С ФОТОЭМУЛЬСИЕЙ ПРИ 10.6 А ГЭВ. ПОПЕРЕЧНЫЕ ИМПУЛЬСЫ

У.У. Абдурахманов, К.Г. Гуламов, В.В. Луговой, В.Ш. Навотный

Физико-технический институт НПО "Физика-Солнце" АН РУз, Ташкент, Узбекистан
u.abduarakhmanov@gmail.com
(Получена 11.09.2019)

10.6 А ГэВ олтин ядроларининг оғир эмульсия ядролари билан ўзаро таъсирида, снаряднинг икки зарядли фрагментларининг кўндаланг импульсларининг хусусиятлари ўрганилади. Кичик зарба параметрлари билан тўқнашганда, снаряднинг икки зарядли фрагментларининг ўртача кўндаланг импульсларининг ўртача қийматини ўсиш тенденцияси кузатмоқда.

Во взаимодействиях ядер золота с энергией 10.6 А ГэВ с тяжелыми ядрами эмульсии изучены характеристики поперечных импульсов двухзарядных фрагментов снаряда. В столкновениях при малых параметрах удара наблюдается тенденция к увеличению среднего значения среднего поперечного импульса двухзарядных фрагментов снаряда.

In the interactions of 10.6 А GeV gold nuclei with heavy emulsion nuclei, the characteristics of the transverse momenta of double-charged projectile fragments are studied. In collisions with small impact parameters, there is a tendency to increase the average value of the average transverse momentum of double-charged projectile fragments.

I. ВВЕДЕНИЕ

Процессы фрагментации ядер всегда оставались в поле зрения физиков. Как правило, такие исследования проводятся на относительно легких ядрах и при низких энергиях, н-р, [1-3]. С появлением пучков ультрарелятивистских, и, что очень важно, тяжелых ядер открылись новые возможности в исследовании процессов мультифрагментации. Особенно важным представляется изучение свойств двухзарядных фрагментов, в основном альфа-частиц. Это обусловлено тем, что в легких ядрах, вплоть до O^{16} , обнаружена альфа кластерная структура [4, 5]. Исследований для тяжелых ядер при высоких энергиях практически не проводилось. Это обусловлено тем, что крупные современные эксперименты – ALICE, CMS, STAR [6], направлены, прежде всего, на обнаружение КГП и поиск бозона Хиггса.

В настоящем исследовании анализируются свойства двухзарядных фрагментов, образовавшихся во взаимодействиях ядер золота с ядерной фотоэмульсией. Работа выполнена на экспериментальном материале, полученном в рамках международного сотрудничества EMU-01.

II. ЭКСПЕРИМЕНТ

В ядерной фотоэмульсии, облученной на ускорителе BNL/AGS ядрами золота с кинетической энергией 10.6 А ГэВ, было найдено 1057 неупругих взаимодействий.

В каждом событии в зависимости от ионизации все треки вторичных заряженных частиц, испущенных при взаимодействии, подразделялись на следующие категории: черные (b -треки), серые (g -треки), релятивистские (s -треки), а также фрагменты снаряда с зарядом $z \geq 2$. Критерии разделения различных категорий треков приведены, например, в работе [7]. Для всех перечисленных категорий частиц были измерены полярные θ и азимутальные ϕ углы испускания. Фрагменты снаряда с зарядом $z=2$ идентифицировались визуально. Ионизация на треках таких частиц постоянна на большой длине и равна $J \approx 4J_0$, где J_0 - минимальная ионизация на треках однозарядных частиц.

Для анализа были отобраны 340 событий неупругого взаимодействия ядер золота с тяжелыми (Ag, Br) ядрами эмульсии при средних параметрах удара. Эти события удовлетворяли следующим критериям отбора: число фрагментов мишени $n_g + n_b \geq 8$; число фрагментов снаряда с зарядом $z = 2$, $N(z=2) \geq 3$.

В отобранных событиях число $\text{He}_{(z=2)}$ -фрагментов снаряда изменялось от 3 до 16. Средняя множественность $\text{He}_{(z=2)}$ -фрагментов снаряда в рассматриваемом ансамбле событий составляла $(n_{\text{He}}) = 5.75 \pm 0.12$.

III. СРЕДНИЙ ПОПЕРЕЧНЫЙ ИМПУЛЬС НА НУКЛОН He -ФРАГМЕНТОВ СНАРЯДА В ИНДИВИДУАЛЬНОМ СОБЫТИИ

Изучение образования He -фрагментов снаряда проводили с помощью величин, характеризующих индивидуальные события. Одной из таких величин является средний поперечный импульс на нуклон He -фрагментов снаряда в индивидуальном событии

$$\langle (P_T / A)_{\text{He}} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{T_i} / A)_{\text{He}}}{n}, \quad (1)$$

где n – число He -фрагментов в индивидуальном событии. В предположении, что каждый i -ый He -фрагмент снаряда имеет продольный импульс на нуклон как первичное ядро, величина поперечного импульса на нуклон i -го He -фрагмента снаряда определяется как $(P_{T_i} / A)_{\text{He}} = P_0 |\tan \theta_i|$, где θ_i – полярный угол испускания He -фрагмента и P_0 – импульс, приходящийся на нуклон налетающего ядра.

Экспериментальное распределение по $\langle (P_T / A)_{\text{He}} \rangle$, среднему поперечному импульсу на нуклон He -фрагментов снаряда в индивидуальном событии, показанное на рис. 1, не согласуется с распределением, полученным в рамках модели FRITIOF-M [8].

В модели FRITIOF-M осуществлено полное моделирование взаимодействий ядер золота с энергией 10.6 А ГэВ с ядрами фотоэмульсии, и сгенерированные события подвергали отбору, имитирующему экспериментальную ситуацию. Модель FRITIOF-M представляет собой комбинированную модель, где первая стадия реакций разыгрывается с помощью феноменологического подхода [9], используемого в модифицированной версии модели FRITIOF [10], а распад ядер-остатков по статистической модели мультифрагментации ядер [11]. В модели FRITIOF-M учтены законы сохранения энергии-импульса и предполагается статистически изотропный распад ядер-остатков, находящихся в покое, но не заложены корреляции, обусловленные какими-либо другими причинами.

Рис. 1. Распределение по среднему поперечному импульсу на нуклон He-фрагментов снаряда в индивидуальных актах взаимодействия ядер золота с энергией 10.6 А ГэВ с Ag, Br ядрами эмульсии при средних параметрах удара. Сплошная линия – эксперимент, пунктир – модель FRITIOF-M.

В таблице приведены величины

$$\langle \langle (P_T / A)_{He} \rangle \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle (P_T / A)_{He} \rangle_i, \quad (2)$$

усредненные по N событиям ансамбля значений средних поперечных импульсов на нуклон He-фрагментов снаряда в индивидуальных актах взаимодействия ядер золота с энергией 10.6 А ГэВ с ядрами эмульсии при средних параметрах удара, и ряда подансамблей, дающих информацию о зависимости $\langle \langle (P_T / A)_{He} \rangle \rangle$ от прицельного параметра взаимодействия (характеризующегося величиной связанного заряда ядра-остатка z_{bound} , т.е. суммарного заряда фрагментов снаряда с зарядом $z \geq 2$) и от степени дезинтеграции фрагментирующего ядра (характеризующейся величиной максимального заряда z_{max} продуктов его распада).

Таблица. Усредненные по N событиям ансамбля значения средних поперечных импульсов на нуклон He-фрагментов снаряда индивидуального события, а также $\langle g'_1 \rangle$ – средние значения показателей асимметрии величин поперечных импульсов.

Ансамбль	$\langle \langle (P_T / A)_{He} \rangle \rangle$, МэВ/с		$\langle g'_1 \rangle$	
	эксперимент	FRITIOF-M	эксперимент	FRITIOF-M
<i>весь</i>	116 ± 3	61 ± 1	0.21 ± 0.03	0.05 ± 0.04
$6 \leq z_{bound} < 30$	131 ± 6	59 ± 1	0.30 ± 0.05	0.12 ± 0.04
$30 \leq z_{bound} < 50$	109 ± 4	64 ± 1	0.18 ± 0.04	-0.07 ± 0.07
$z_{bound} \geq 50$	106 ± 4	70 ± 1	0.14 ± 0.05	-0.28 ± 0.13
$2 \leq z_{max} < 10$	126 ± 6	55 ± 1	0.28 ± 0.05	0.15 ± 0.06
$10 \leq z_{max} < 30$	114 ± 4	64 ± 1	0.22 ± 0.04	0.07 ± 0.05
$z_{max} \geq 30$	104 ± 4	66 ± 1	0.08 ± 0.06	-0.24 ± 0.09

Как видно из таблицы, экспериментальное значение $\langle\langle(P_T/A)_{\text{He}}\rangle\rangle$ растет при переходе к более центральным взаимодействиям (с уменьшением z_{bound}), а также растет с уменьшением z_{max} , в то время как в модели FRITIOF-M наблюдается падение этой величины с уменьшением параметра удара.

Одной из причин несогласия формы модельного и экспериментального распределений (рис. 1), а также повышенного по сравнению с модельным экспериментального значения $\langle\langle(P_T/A)_{\text{He}}\rangle\rangle$ (см. таблицу), по-видимому, является коллективное движение ядра-остатка, как целого, в поперечной плоскости взаимодействия, не учитываемое в модели FRITIOF-M.

IV. ПОКАЗАТЕЛЬ АСИММЕТРИИ ВЕЛИЧИН ПОПЕРЕЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ НЕ-ФРАГМЕНТОВ В ИНДИВИДУАЛЬНОМ СОБЫТИИ

Помимо среднего поперечного импульса, другой величиной, характеризующей индивидуальный акт испускания Не-фрагментов, может служить величина $\langle g'_1 \rangle$ – показатель асимметрии расположения Не-фрагментов в шкале величин их поперечных импульсов [12]:

$$g'_1 = \frac{\sqrt{n-1}}{n-2} \frac{m_3}{\sqrt{m_2^3}}, \quad (3)$$

где m_l – центральный момент l -порядка

$$m_l = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^l, \quad \langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4)$$

n – число Не-фрагментов в событии; $x_i = P_0 |\tan \theta_i|$ – величина поперечного импульса на нуклон i -го Не-фрагмента снаряда.

Если в событии $(n-1)$ Не-фрагментов снаряда имеют одинаковые значения величины (P_T/A) , равные a , а для одного Не-фрагмента $(P_T/A) = b$, то

$$g'_1 = -1 \quad \text{при } a > b \quad (5)$$

при любом значении a и b ($a \neq b$) независимо от n .

Указанные значения (5) величины g'_1 соответствуют событиям с наивысшей степенью асимметрии величин поперечных импульсов. При симметричном расположении величин поперечных импульсов $g'_1 = 0$. На рис. 2 показаны характерные картины расположения Не-фрагментов снарядов в шкале поперечных импульсов индивидуального события в случае экстремальной асимметрии (a, b) и в случаях симметрии (ϵ, ζ, δ). Отметим, что величина g'_1 является параметрически инвариантной, т.е. не зависит от сдвига начала отсчета и изменения масштаба шкалы поперечных импульсов индивидуального события. Экспериментальное распределение событий по величине g'_1 заключено в интервале $-1 \div +1$.

В распределении экспериментальных событий по величине g'_1 (рис. 3) преобладают события с положительными значениями g'_1 , т.е. события с такой асимметрией, когда большинство Не-фрагментов смещено к началу шкалы упорядоченных в порядке возрастания их поперечных импульсов индивидуального события. Как видно из приведенных в таблице значений $\langle g'_1 \rangle$, усредненных по N

событиям ансамблей, эффект асимметрии относительно $g'_1 = 0$ экспериментального распределения по g'_1 усиливается с ростом центральности столкновений. Форма распределения по величине g'_1 в модели FRITIOF-M (рис. 3) не соответствует экспериментальной.

Рис. 2. Примеры расположения Не-фрагментов в шкале величин их поперечных импульсов индивидуальных события и соответствующие этим конфигурациям значения показателя асимметрии g'_1 .

Рис. 3. Распределения событий по величине g'_1 – показателя асимметрии Не-фрагментов снаряда в шкале величин их поперечных импульсов. Сплошная линия – эксперимент, пунктир – модель FRITIOF-M.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во взаимодействиях ядер золота с энергией 10.6 А ГэВ с Ag, Вг ядрами эмульсии изучены особенности испускания Не-фрагментов снаряда с помощью характеристик индивидуального события: среднего поперечного импульса, показателя асимметрии величин поперечных импульсов, показателя азимутальной асимметрии векторов поперечных импульсов. Показано, что средние значения этих характеристик растут с ростом центральности столкновений и с ростом степени дезинтеграции фрагментирующего ядра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Антонов и др., Письма в ЖЭТФ **101**, № 10, 746-749 (2015).
2. B. Abramov *et al.*, Physics of Atomic Nuclei **79**, № 5, 700-707 (2016).
3. Bonnet *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 142701 (2010).
4. К. Олимов и др., ЯФ **75**, 293 (2012).
5. V. Bradnova *et al.*, Nuclear Phys A **734**, E92 (2004).
6. В. Шильцев, УФН **182**, № 10, 1033 (2012).
7. M.I. Adamovich *et al.*, (EMU-01 Collab.) Eur. Phys. J. A **2**, 61 (1998).
8. M.I. Adamovich *et al.*, (EMU-01/12 Collab.) Z. Phys. A **359**, 277 (1997).
9. Kh. El-Waged, V.V. Uzhinskii, ЯФ **60**, 925 (1997).
10. M.I. Adamovich *et al.*, (EMU-01/12 Collab.) Z. Phys. A **358**, 337 (1997).
11. J.P. Bondorf, A.S. Botvina *et al.*, Phys. Rep. **257**, 133 (1995).
12. Ш. Абдужамиллов и др., ЯФ **25**, 575 (1977).