Uzbek Journal of Physics

Vol.22(№2) 2020 PP.79-85

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ДВУХЗАРЯДНЫХ ФРАГМЕНТОВ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ЯДЕР ЗОЛОТА С ФОТОЭМУЛЬСИЕЙ ПРИ 10.6 А ГэВ. АЗИМУТАЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ

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

Физико-технический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан;
u.abdurakhmanov@gmail.com
(Получена 11.09.2019)

10.6 А ГэВ олтин ядроларининг оғир эмульсия ядролари билан ўзаро таъсирида, снаряднинг икки зарядли фрагментларнинг кўндаланг импулсларининг хусусиятлари ўрганилди. Кичик зарба параметрлари билан тўқнашганда, снаряднинг икки зарядли фрагментларининг ўртача кўндаланг импулсларининг ўртача қийматини ўсиш тенденцияси кузатилмоқда. Азимутал текисликда қолдиқ ядроларнинг ҳаракат ўналиши изотропмаслиги топилди. Текис бурчакларга нисбатан етарлича каттароқ бўлган чуқурлик бурчакларнинг ўлчашдаги хатолар туфайли мавжуд бўлиши мумкин бўлган азимутал текисликда қолдиқ ядроларнинг ҳаракатланишнинг танланган ~90° ва ~270° йўналишлари снаряд фрагментларининг азимутал ассиметрияси таъсирини кучайтиради. Кичик зарба параметрлари билан тўқнашганда, снаряднинг икки зарядли фрагментларининг ўртача кўндаланг импульсларининг ўртача қийматини ўсиш тенденцияси кузатилмоқда.

Во взаимодействиях ядер золота с энергией 10.6 *A* ГэВ с тяжелыми ядрами эмульсии изучены характеристики двухзарядных фрагментов снаряда. Обнаружена неизотропность направления движения ядер-остатков в азимутальной плоскости. Показано, что выделенность направлений движения ядер-остатков в азимутальной плоскости при ~90° и ~270°, возможная из-за существенно больших ошибок измерения глубинных углов, чем плоских, усиливает эффекты азимутальной асимметрии фрагментов снаряда. В столкновениях при малых параметрах удара наблюдается тенденция к увеличению среднего значения среднего поперечного импульса двухзарядных фрагментов снаряда.

In the interactions of gold nuclei with the energy of 10.6 A GeV with heavy emulsion nuclei, the characteristics of double-charged projectile fragments were studied. The nonisotropy of the direction of motion of residual nuclei in the azimuthal plane was found. It is shown that the distinguished directions of motion of the residual nuclei in the azimuthal plane at ~90° and ~270°, which is possible due to significantly larger errors in the measurement of depth angles than plane ones, enhanced the effects of azimuthal asymmetry of the shell fragments. 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. ЭКСПЕРИМЕНТ

В ядерной фотоэмульсии, облучённой на ускорителе BNL/AGS ядрами золота с кинетической энергией 10.6 АГэВ, было найдено 1057 неупругих взаимодействий. В каждом событии в зависимости от ионизации все треки вторичных заряженных частиц, испущенных при взаимодействии, подразделяли 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 [1]. Для всех перечисленных категорий частиц были

измерены полярные θ и азимутальные φ углы испускания. Фрагменты снаряда с зарядом z=2 идентифицировали 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 $He_{(z=2)}$-фрагментов снаряда изменялось от 3 до 16. Средняя множественность $He_{(z=2)}$-фрагментов снаряда в рассматриваемом ансамбле событий составляла $(n_{He}) = 5.75 \pm 0.12$.

II. АЗИМУТАЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ He-ФРАГМЕНТОВ СНАРЯДА

Для исследования азимутальных корреляций, типа асимметрии векторов поперечных импульсов He-фрагментов снаряда, использовали величину β_1 [2]:

$$\beta_1 = \left[\left(\sum_{i=1}^{n} \cos(\varphi_i) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} \sin(\varphi_i) \right)^2 - n \right]. \quad (1)$$

Здесь n – число He-фрагментов в одном событии, φ_i – азимутальный угол i-го He-фрагмента. Величина β_1 не зависит от выбора начальной оси отсчета углов φ_i. Она ограничена и может принимать значения, лежащие в интервале:

$$-\sqrt{n/(n-1)} \leq \beta_1 \leq \sqrt{n(n-1)}. \quad (2)$$

Максимальное значение, равное $\sqrt{n(n-1)}$, величина β_1 принимает только в случае $\varphi_1 = \varphi_2 = \ldots \varphi_n$. При равномерном распределении каждого из углов φ_i в интервале $(0, 2\pi)$ и взаимной независимости этих углов величина $\langle\beta_1\rangle$, усредненная по N событиям, имеет нормальное распределение с математическим ожиданием, равным нулю, и стандартным отклонением

$$\sigma\left[\langle\beta_1\rangle\right] = 1/\sqrt{N}. \quad (3)$$

При отсутствии азимутальных корреляций величина $\langle\beta_1\rangle$ с вероятностью, близкой к единице, должна лежать в интервале

$$-2/\sqrt{N} < \left(\langle\beta_1\rangle\right) < 2/\sqrt{N}. \quad (4)$$

Поэтому, если значение $\left|\langle\beta_1\rangle\right|\sqrt{N}$ окажется больше двух, то можно сделать вывод о возможной азимутальной корреляции частиц.

В таблице приведены $\left\langle\left(\beta_1\right)_{He}\right\rangle$ средние значения показателей азимутальной асимметрии векторов поперечных импульсов He-фрагментов снаряда, а также $\left\langle\left(\beta_1\right)_{He}\right\rangle\sqrt{N}$ отклонения величин от их математических ожиданий, равных нулю, в единицах стандартного отклонения для всего ансамбля взаимодействий ядер золота с энергией 10.6 А ГэВ с Ag, Br ядрами эмульсии при средних параметрах удара и ряда подансамблей, в которых события имели определенные значения величин связанного заряда ядра-остатка z_{bound} и максимального заряда z_{max} продуктов его распада. Наблюдаемые в эксперименте, отличные от нуля, положительные

значения $\left\langle(\beta_1)_{\text{He}}\right\rangle$ указывают на наличие эффектов азимутальной асимметрии, причем статистическая обеспеченность эффектов, характеризуемая величиной $\left\langle(\beta_1)_{\text{He}}\right\rangle\sqrt{N}$, растет с уменьшением $z_{\max}$, т.е. с увеличением степени дезинтеграции фрагментирующего ядра. В модели FRITIOF-M эффектов азимутальной асимметрии He-фрагментов не обнаружено.

Таблица. Средние значения показателей азимутальной асимметрии векторов поперечных импульсов He-фрагментов снаряда, а также $\left\langle(\beta_1)_{\text{He}}\right\rangle\sqrt{N}$ – отклонения величин $\left\langle(\beta_1)_{\text{He}}\right\rangle$ от их математического ожидания, равного нулю, в единицах стандартного отклонения.

Ансамбль	$\left\langle(\beta_1)_{\text{He}}\right\rangle$	$\left\langle(\beta_1)_{\text{He}}\right\rangle\sqrt{N}$	$\left\langle(\beta_1)_{\text{He}}\right\rangle$	$\left\langle(\beta_1)_{\text{He}}\right\rangle\sqrt{N}$
	Эксперимент		FRITIOF-M	
весь	0.523 ± 0.070	9.64	0.019 ± 0.052	0.34
$6 \le z_{bound} < 30$	0.692 ± 0.120	7.55	0.050 ± 0.063	0.76
$30 \le z_{bound} < 50$	0.370 ± 0.112	4.02	–0.003 ± 0.112	–0.02
$z_{bound} \ge 50$	0.505 ± 0.130	5.12	–0.198 ± 0.167	–1.02
$2 \le z_{\max} < 10$	0.662 ± 0.124	7.28	0.153 ± 0.094	1.55
$10 \le z_{max} < 30$	0.432 ± 0.100	4.94	–0.036 ± 0.072	–0.47
$z_{\max} \ge 30$	0.469 ± 0.145	4.40	–0.078 ± 0.128	-0.57

III. ДВИЖЕНИЕ ЯДРА-ОСТАТКА КАК ЦЕЛОГО В АЗИМУТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

В работе [3] в эксперименте была обнаружена сильная азимутальная асимметрия продуктов распада ядра-остатка $\left\langle(\beta_1)_f\right\rangle = 14.5$, в то время как в модели FRITIOF-M такого эффекта не обнаружено, $\left\langle(\beta_1)_f\right\rangle = -2.6$. К продуктам распада ядра-остатка (группа *f*) относились фрагменты снаряда с зарядом $z \ge 2$ и однозарядные фрагменты с углами испускания θ<1°. Наблюдаемая в эксперименте азимутальная асимметрия свидетельствует о наличии у фрагментирующего ядра-остатка значительного поперечного импульса, т.е. об отклонении направления движения ядра-остатка как целого от направления движения ядра-снаряда. В азимутальной плоскости направление движения ядра-остатка как целого определяется вектором асимметрии группы *f*, т.е. вектором, направленным по сумме единичных векторов, направленных по поперечным импульсам фрагментов, на которые распадается ядро-остаток. В азимутальной плоскости угол φ′ между вектором асимметрии и осью *Y*, направленной параллельно плоскости эмульсии, вычисляется по формулам [4]:

$$\begin{aligned} &\tan\varphi' = \sum_{i=1}^{n}\sin\varphi_i \Big/ \sum_{i=1}^{n}\cos\varphi_i' \\ &0 \le \varphi' < 2\pi \\ &\cos\varphi'\sum_{i=1}^{n}\cos\varphi_i + \sin\varphi'\sum_{i=1}^{n}\sin\varphi_i > 0 \end{aligned} \quad . \qquad (5)$$

В ансамбле событий угол φ' вектора асимметрии группы частиц в азимутальной плоскости в интервале $0 - 2\pi$ в лабораторной системе координат должен быть распределен равномерно. Это обеспечивает согласие инклюзивного распределения азимутальных углов в наборе событий с равномерным распределением в том же интервале. Отклонение от гипотезы равномерного распределения инклюзивного спектра азимутальных углов любых частиц в лабораторной системе координат свидетельствует о возможных методических искажениях.

Распределения по углу φ'_f в эксперименте и в модели FRITIOF-M показаны на рис. 1. Каждое распределение сопоставлено с равномерным. Приведены значения χ^2 при числе интервалов l и их отклонения $\xi = \left[\chi^2 - (l-1)\right] / \sqrt{2(l-1)}$ от математического ожидания, равного (l–1), в единицах стандартного отклонения. Экспериментальное распределение по углу φ'_f вектора асимметрии группы фрагментов снаряда отличается от равномерного, наблюдаемого в модели FRITIOF-M (рис. 1). Виден избыток экспериментальных событий в областях, близких к 90° и 270°, по сравнению с моделью FRITIOF-M. В модели FRITIOF-M предполагается статистически изотропный распад ядра-остатка, находящегося в покое, но не заложены корреляции, обусловленные динамическими причинами либо методическими искажениями. Во всех фотоэмульсионных экспериментах, использующих облучение вдоль эмульсионного слоя, инклюзивное распределение

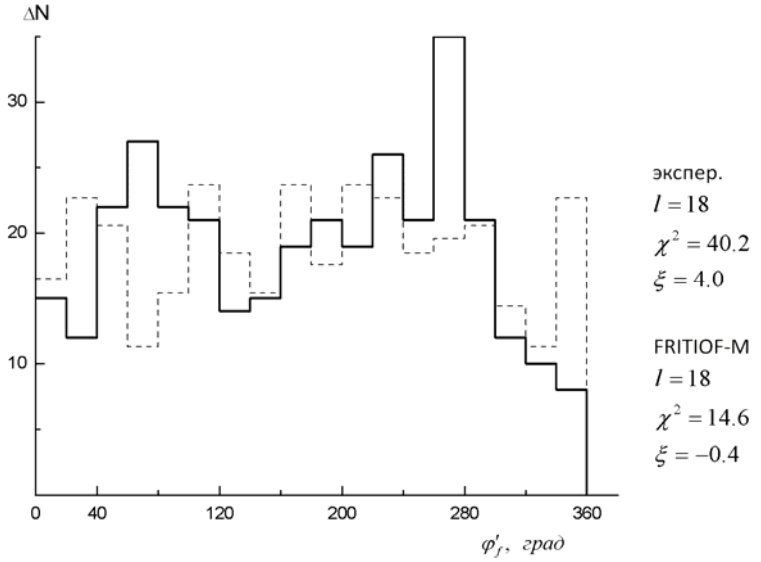


Рис. 1. Распределения событий по углу φ'_f вектора асимметрии группы фрагментов снаряда, определяющего направления движения ядра-остатка как целого в азимутальной плоскости. Сплошная линия – эксперимент, пунктир – модель FRITIOF-M.

по азимутальному углу искажено тем, что точность измерения углов в плоскости эмульсии и в перпендикулярной ей плоскости сильно различаются [5]. Ошибки измерения глубинных углов существенно большие, чем плоских, могут привести к смещению узкого конуса фрагментов снаряда "вверх" или "вниз" относительно

импульса снаряда в азимутальной плоскости [6]. φ'_f – коллективная характеристика фрагментов снаряда в отдельном событии. Её наиболее вероятное значение равно $\varphi'_f = 90°$ при смещении конуса фрагментов "вверх" или $\varphi'_f = 270°$ при смещении "вниз".

IV. О ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДИВИДУАЛЬНЫХ АКТОВ ИСПУСКАНИЯ ФРАГМЕНТОВ СНАРЯДА ОТ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЯДЕР-ОСТАТКОВ В АЗИМУТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Выделенность направлений движения ядер-остатков в азимутальной плоскости в рассматриваемом ансамбле взаимодействий ядер золота с энергией 10.6 А ГэВ с Ag, Br ядрами эмульсии при средних параметрах удара влияет на наблюдаемые эффекты азимутальной асимметрии фрагментов снаряда. На рис. 2а показана зависимость величины $\left\langle (\beta_1)_f \right\rangle > N$, статистисческой обеспеченности эффекта азимутальной асимметрии фрагментов снаряда, от угла φ', т.е. от направления движения ядра-остатка в азимутальной плоскости. Двугорбая форма экспериментальной зависимости свидетельствует об увеличении эффекта азимутальной асимметрии фрагментов снаряда в области углов φ', близких к 90° и 270°. Таким образом, неизотропность направления движения ядер-остатков в азимутальной плоскости усиливает эффект азимутальной асимметрии фрагментов снаряда, и в наблюдаемые эффекты азимутальных корреляций вносят вклад "ложные" эффекты, обусловленные методическими искажениями.

На рис. 2б приведена зависимость статистической обеспеченности эффекта азимутальной асимметрии Не-фрагментов снаряда от угла φ' вектора асимметрии всех фрагментов снаряда. Наибольший эффект азимутальной асимметрии Не-фрагментов снаряда наблюдается при $\varphi' \sim 90°$.

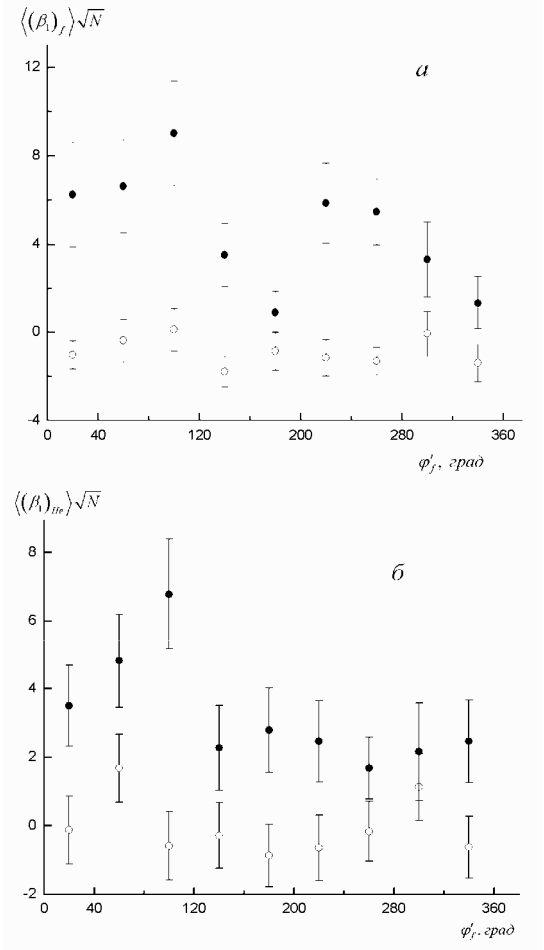


Рис. 2. Зависимости величины статистической обеспеченности эффекта азимутальной асимметрии всех фрагментов снаряда (*а*) и Не-фрагментов снаряда (*б*) от угла φ'_f, определяющего направление движения ядра-остатка как целого в азимутальной плоскости: ● – эксперимент, ○ – модель FRITIOF-M.

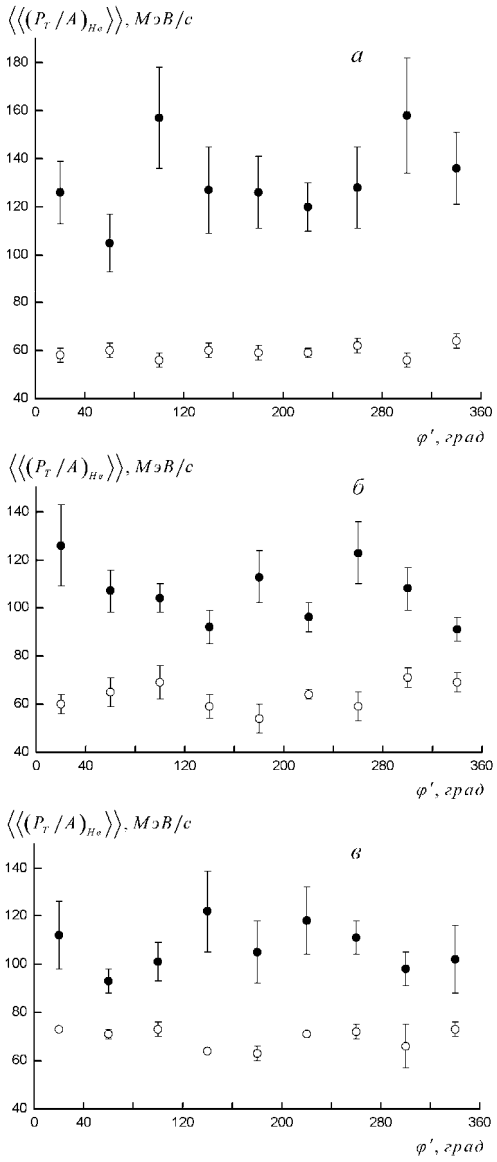


Рис. 3. Зависимость $\left\langle\left\langle\left(P_T / A\right)_{\text{He}}\right\rangle\right\rangle$ от угла φ'_f в ансамблях событий с $6 \le z_{bound} < 30$ (*а*); $30 \le z_{bound} < 50$ (*б*); $z_{bound} \ge 50$ (*в*): ● – эксперимент, ○ – модель FRITIOF-M.

Влияние неизотропности направлений движения ядер-остатков в азимутальной плоскости на величину $\left\langle\left\langle\left(P_T / A\right)_{\text{He}}\right\rangle\right\rangle$ видно из рис. 3, где приведены зависимости $\left\langle\left\langle\left(P_T / A\right)_{\text{He}}\right\rangle\right\rangle$ от угла φ′ для ансамблей событий с определенными значениями величины z_{bound}, характеризующей степень центральности столкновений. В ансамбле экспериментальных событий с $6 \le z_{bound} < 30$ (рис. 3а) наблюдается тенденция к увеличению среднего значения среднего поперечного импульса He-фрагментов снаряда индивидуального события при значениях φ′, близких к 90° и 270°, т.е. в местах выделенности направлений движения ядер-остатков. Эта тенденция не проявляется в ансамбле событий с меньшей степенью центральности ($z_{bound} \ge 50$) (рис. 3в). В ансамбле Au+(Ag, Br) столкновений с $6 \le z_{bound} < 30$ в выборке событий, попадающих в места выделенности направлений движения ядер-остатков в азимутальной плоскости ($80° \le \varphi' \le 120°$ и $280° \le \varphi' \le 320°$), $\left\langle\left\langle\left(P_T / A\right)_{\text{He}}\right\rangle\right\rangle$=(157±16) МэВ/с, в то время как в совокупности остальных событий этого ансамбля $\left\langle\left\langle\left(P_T / A\right)_{\text{He}}\right\rangle\right\rangle$=(122±5) МэВ/с.

Анализ Au+(Ag, Br) столкновений с $6 \le z_{bound} < 30$ также показал, что распределение по показателю асимметрии величин поперечных импульсов He-фрагментов снаряда индивидуального события в выборке событий, попадающих в места выделенности направлений движения ядер-остатков в азимутальной плоскости, не согласуется с распределением в выборке событий вне мест выделенности (при $l = 6$, $\chi^2 = 23.37$, $\xi = 5.81$). Среднее значение показателя асимметрии величин поперечных импульсов He-фрагментов снаряда индивидуального события в выборке событий, попадающих в область ($80° \le \varphi' \le 120°$

и 280°≤φ′≤320°), $\left\langle \left(g_1'\right)_{\mathrm{He}} \right\rangle = 0.188 \pm 0.108$, в то время как в выборке всех остальных событий $\left\langle \left(g_1'\right)_{\mathrm{He}} \right\rangle = 0.334 \pm 0.052$.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во взаимодействиях ядер золота с энергией 10.6 А ГэВ с Ag, Br ядрами эмульсии при средних параметрах удара обнаружена неизотропность направления движения ядер-остатков в азимутальной плоскости. Выделенность направлений движения ядер-остатков в азимутальной плоскости при 90° и 270°, возможная из-за существенно больших ошибок измерения глубинных углов, чем плоских, усиливает эффекты азимутальной асимметрии фрагментов снаряда.

Особенности испускания He-фрагментов снаряда изучены с помощью показателя азимутальной асимметрии векторов поперечных импульсов индивидуального события. Показано, что среднее значение растет с ростом центральности столкновений и с ростом степени дезинтеграции фрагментирующего ядра. Изучены зависимости характеристик индивидуальных актов испускания He-фрагментов снаряда от направления движения ядер-остатков в азимутальной плоскости. Наблюдена тенденция к увеличению среднего значения среднего поперечного импульса He-фрагментов снаряда индивидуального события в местах выделенности направлений движения ядер-остатков в азимутальной плоскости в ансамбле событий с малыми параметрами удара ($6 \le z_{bound} < 30$).

ЛИТЕРАТУРА

1. M.I. Adamovich et al., (EMU-01 Collab.), Eur. Phys. J. A **2**, 61 (1998).
2. Ш. Абдужамилов и др., ЖЭТФ **45**, 407 (1963).
3. У.У. Абдурахманов и др., ЯФ **73**, 126 (2010).
4. У.У. Абдурахманов и др., ЯФ **71**, 544 (2008).
5. M.I. Adamovich et al., (EMU-01/12 Collab.), Z. Phys. A **359**, 277 (1997).
6. У.У. Абдурахманов и др., ЯФ **72**, 1533 (2009).