

Аннотация

"ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР ЗОЛОТА С ЯДРАМИ ФОТОЭМУЛЬСИИ ПРИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ И НЕРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЯХ "

С.Д. Богданов¹, Е.Я. Шабля¹, С. Вокал³, В.Ф. Космач¹, В.А. Плющев²

¹ – *Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия*

² – *Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, Санкт-Петербург, Россия*

³ – *Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия*

Экспериментально изучены взаимодействие ядер золота при релятивистских и нерелятивистских энергиях с ядрами фотоэмульсии. Проведено последовательное сравнение с результатами расчетов по каскадно-испарительной модели.

«INTERACTION OF NUCLEI OF GOLD AT RELATIVISTIC AND NONRELATIVISTIC ENERGY WITH NUCLEI OF PHOTOEMULSION»

S. D. Bogdanov¹, E.Y. Shablya¹, S Vokal³, V. F. Kosmach¹, V.A. Plushev²

¹ – *St-Petersburg State Polytechnical University, Russia*

² – *Radium institute of Hlopin, St-Petersburg, Russia*

³ – *United institute of nuclear studies, Dubna, Russia*

Interaction of nuclei of gold at relativistic and nonrelativistic energy with nuclei of photoemulsion is experimentally investigated. A sequential comparison results with results of calculation by cascade-evaporating model is made.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР ЗОЛОТА С ЯДРАМИ ФОТОЭМУЛЬСИИ ПРИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ И НЕРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЯХ

С. Д. Богданов¹, Е. Я. Шабля¹, С. Вокал³, В. Ф. Космач¹, В. А. Плющев²

¹ – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия

² – Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, Санкт-Петербург, Россия

³ – Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе продолжается экспериментальное и теоретическое исследование процесса прохождения тяжелых ядер-снарядов с энергией в диапазоне 100–10200 МэВ/нуклон через гомогенную среду в условиях полного опыта, предоставляемого методом ядерных эмульсий [1-5]. Получены основные экспериментальные и расчетные характеристики взаимодействий ядер золота при энергии 100-1147 и 10200 МэВ/нуклон. Рассмотрена фрагментация ядра мишени и ядра снаряда. Проведен анализ зависимостей характеристик взаимодействий от энергии и массы взаимодействующих ядер.

ЭКСПЕРИМЕНТ И РАСЧЕТ

Для получения количественных результатов в работе были использованы две фотоэмульсионные камеры, составленные из 30-40 слоев отечественной эмульсии типа БР-2 [6,7] стандартного состава (с числом ядер в 1 см³ соответственно Н-3.148×10²²; С-1.412×10²²; N-0.396×10²²; О-0.956×10²²; S-0.004×10²²; I-0.002×10²²; Br-1.031×10²²; Ag-1.036×10²²), каждая. Размеры отдельного слоя были близкими к 10×10×0.05 см³. Первая камера была облучена ядрами Au¹⁹⁷ с энергией 1147.2, вторая ядрами Au¹⁹⁷ с энергией 10200 МэВ/нуклон. Средний флюенс при облучениях составил 500-2000 частиц/см². Методика обработки взаимодействий приведена в [8-9]. В процессе обработки расщеплений определялись заряды, полярные и азимутальные углы испускания фрагментов напе-

тающего ядра, углы испускания и пробеги фрагментов ядра-мишени.

Экспериментальный материал настоящей работы для нерелятивистских ядер Au^{197} со средней энергией взаимодействия 741.2 ± 19.8 МэВ/нуклон составил 505 расщеплений, в которых был определен заряд тяжелого фрагмента ядра снаряда. Для 332 взаимодействий из этих расщеплений были определены заряды и углы испускания фрагментов ядер золота с зарядом более единицы (статистика ансамбля 6377 частиц), из них в 108 взаимодействиях были проведены угловые, ионизационные и пробеговые измерения всех вторичных заряженных частиц (статистика ансамбля 4444 частиц).

Экспериментальный материал настоящей работы для релятивистских ядер Au^{197} со средней энергией 10,2 ГэВ/нуклон представляет собой объединенный ансамбль из 90 неупругих взаимодействий и массива из 359 неупругих взаимодействий, полученных в рамках сотрудничества EMU-01 [9]. В процессе обработки данных расщеплений были определены основные экспериментальные характеристики 36314 частиц.

Расчетная статистика была получена путем генерации взаимодействий ядер Au^{197} при энергии 700 МэВ/н с отдельными ядрами, входящими в состав эмульсии (H^1 , C^{12} , N^{14} , O^{16} , Br^{80} , Ag^{107}) по методу Монте-Карло и дальнейшим суммированием с весами, соответствующими вычисленным сечениям и составу эмульсии. При этом на быстрой (первой) стадии учитывались процессы мезообразования, лоренцовское сжатие, влияние принципа Паули, эффект изменения плотности ядерной материи по мере развития каскадной стадии взаимодействия. Процесс снятия возбуждения остатков ядер после прохождения быстрой стадии (вторая – медленная стадия) описывался с помощью статистической модели. Суммарная статистика, полученная в рамках каскадно-испарительной модели (КИМ) [10,11], составила 1000 событий.

МНОЖЕСТВЕННОСТИ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Для дальнейшего анализа полученных данных все вторичные частицы были разделены на следующие типы:

$g+s$ -частицы - частицы первой стадии – совокупность однозарядных фрагментов ядра мишени с энергией $E \geq 26$ МэВ/нуклон, рожденных мезонов и однозарядных фрагментов ядра-снаряда, поперечный импульс которых превышает 222.6 МэВ/с на нуклон (соответствует $E \geq 26$ МэВ/нуклон в поперечном направлении);

b -частицы - фрагменты ядра мишени с энергией $E \leq 26$ МэВ/нуклон (пробег в эмульсии менее 3 мм), испускающиеся в основном на второй стадии реакции;

$s'+g'+b'$ -частицы – частицы с энергией $E \geq 26$ МэВ/нуклон, поперечный импульс которых меньше 222.6 МэВ/с на нуклон, включающие в себя одно (s')-, двух (g')- и многозарядные (b' , $Z_{фр} \geq 3$) фрагменты ядра снаряда.

В каждом взаимодействии были определены множественности указанных выше типов частиц, суммарное число всех вторичных заряженных частиц (N) и их суммарный заряд ($Z_{зв}$) в зарядах электрона. Это позволило получить распределения по числу частиц в расщеплении, вызванных ионами золота при энергии 0.741 и 10.2 ГэВ/А и корреляционные связи числа частиц различного типа в расщеплении.

В таблице 1 приведены значения средней множественности вторичных частиц – $\langle N_{g+s} \rangle$, $\langle N_b \rangle$, $\langle N_{s'+g'+b'} \rangle$, величины средней множественности всех вторичных заряженных частиц $\langle N \rangle$ во взаимодействиях ядер разных масс и энергии и среднее значение суммарного заряда взаимодействия $\langle Z_{зв} \rangle$. Отметим, что статистические ошибки величин, полученных в результате расчетов по каскадно-испарительной модели (приведены в скобках), примерно в три раза меньше экспериментальных и поэтому в данной работе не приводятся.

Из таблицы и полученных ранее данных по взаимодействиям более легких ядер Ne, Ar, Fe [2-5] следует, что увеличение масс сталкивающихся ядер в наибольшей степени влияет на число частиц первой стадии процесса. Для взаимодействий с энергией менее 1 ГэВ/нуклон средняя множественность $g+s$ -частиц прямо пропорциональна произведению масс взаимодействующих ядер в степени близкой к 0.7 $\langle N_{g+s} \rangle \sim (A_{нал} \cdot A_{миш})^{0.7}$. При росте энергии налетающего ядра

золота от 741 до 10200 МэВ/нуклон $\langle Ng+s \rangle$ увеличивается почти в три раза, в основном за счет рожденных мезонов. Об этом свидетельствует и увеличение суммарного заряда взаимодействия $\langle Z_{зв} \rangle$ в среднем на 25% при увеличении энергии в 10 раз.

Средняя множественность $\langle N_{s'+g'+b'} \rangle$ последовательно увеличивается при росте массы ядра-снаряда, не зависит от энергии налетающего ядра золота, но немонотонно зависит от массы ядра-мишени. При увеличении размеров взаимодействующих ядер также наблюдается увеличение суммарного заряда взаимодействия $\langle Z_{зв} \rangle$. Отметим, что $\langle Z_{зв} \rangle$ не включает в себя заряд ядра остатка мишени, который не регистрировался в эксперименте. Средняя множественность всех вторичных заряженных частиц $\langle N \rangle$ в меньшей степени, чем $\langle Ng+s \rangle$, зависит от масс взаимодействующих ядер. Для взаимодействий с энергией менее 1 ГэВ/нуклон $\langle N \rangle$ примерно пропорционально произведению $(A_{нал} \cdot A_{миш})^{0.5}$.

Средние множественности $g+s$ -, b -, $s'+g'+b'$ -частиц, средняя множественность всех вторичных заряженных частиц и суммарный заряд взаимодействия, полученные в результате расчетов по методу Монте-Карло, как следует из таблицы 1 близки к экспериментальным значениям, и описывают увеличение множественности частиц и $\langle Z_{зв} \rangle$ при увеличении масс сталкивающихся ядер.

Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами [2,3] показывает, что средняя множественность b -частиц оказалась практически не зависящей от массы ядра снаряда в диапазоне масс 20-197. Так, увеличение массы ядра снаряда в 10 раз от Ne^{20} до Au^{197} приводит всего лишь к 15% увеличению множественности b -частиц при взаимодействии с тяжелыми ядрами эмульсии, а множественность b -частиц во взаимодействиях с легкими ядрами эмульсии даже уменьшается. Вместе с тем, множественность b -частиц имеет слабую зависимость от энергии налетающего ядра золота. Так, для ядер золота при переходе от энергии 741 МэВ/нуклон к энергии 10,2 ГэВ/нуклон (изменение энергии в 10 раз) средняя множественность b -частиц для эмульсии в целом

изменяется в 1,5 раза.

Для выяснения возможных причин такого поведения множественности ν -частиц была построена корреляционная зависимость множественности ν -частиц от числа $g+s$ -частиц в расщеплении образующихся при взаимодействии ядер Au^{197} с энергией 0.741 ГэВ/н (рисунок 1). Там же приведены результаты расчетов по КИМ ядер Au^{197} с энергией 0.7 ГэВ/н и результаты работ [2,3] по взаимодействиям ядер Ne^{20} с энергией 0.28 ГэВ/н и Ar^{40} с энергией 0.27 ГэВ/н.

Из рисунка следует, что во взаимодействиях золота до $Ng+s \approx 40$ наблюдается примерно линейный рост $\langle Nb \rangle$ от числа $Ng+s$. Испускание каждой $g+s$ -частицы (частицы покинувшие ядра на быстрой стадии) приводит к дополнительному испусканию 0.2-0.3 ν -частицы. В диапазоне изменения параметра $Ng+s > 40$ для тяжелого ядра-мишени наблюдается уменьшение множественности ν -частиц при увеличении числа $g+s$ -частиц в расщеплении. Эксперименты с легкими налетающими ядрами Ne^{20} и Ar^{40} описывают увеличение Nb при росте $Ng+s$. Однако (см. рис. 1) уменьшение Nb при дальнейшем росте $Ng+s$ на корреляционных зависимостях не наблюдалась, так как отсутствовали взаимодействия с $Ng+s > 40$. Отметим также, что при взаимодействии протонов с энергией 660 МэВ с тяжелыми ядрами эмульсии число $g+s$ -частиц, выбиваемых во взаимодействиях, не превышает 3, а этом средняя множественность составляет 1.03 частиц/взаимодействие [11].

При релятивистских взаимодействиях диапазон изменения $Ng+s$ увеличился до 410 по сравнению с 125 для нерелятивистских взаимодействий. При увеличении энергии ядра снаряда до 10,2 ГэВ/нуклон примерно линейный рост $\langle Nb \rangle$ от числа $Ng+s$ наблюдается во взаимодействиях золота до $Ng+s \approx 80$. В диапазоне изменения параметра $Ng+s > 80$ для тяжелого ядра-мишени также наблюдается уменьшение множественности ν -частиц при увеличении числа $g+s$ -частиц в расщеплении. Такое изменение $Ng+s$ по сравнению с нерелятивистскими взаимодействиями может объясняться рождением достаточно большого количества мезонов.

Наиболее простым объяснением наблюдаемого вида корреляции $\langle Nb \rangle (Ng+s)$, которая характеризует связь между медленной и быстрой стадиями реакции, является учет эффекта "конечности" тяжелого ядра-мишени. Потеря тяжелым ядром мишенью ${}_{47}\text{Ag}^{107}$ в процессе быстрой стадии реакции 35-47 протонов, приведет к отсутствию заметного остатка ядра-мишени и, соответственно, отсутствию большой множественности ν -частиц. Наблюдаемый эффект "конечности" тяжелого ядра-мишени не отмечался ранее в диапазоне масс налетающего иона от 2 до 56 атомных единиц массы, так как малые размеры налетающих ионов не позволяли выбить необходимое число нуклонов из тяжелого ядра фотозэмульсии. На наш взгляд экспериментально наблюдаемое уменьшение средней множественности ν -частиц во взаимодействии с легкими ядрами при переходе от налетающих ядер неона к ядрам золота, также может быть объяснено эффектом конечности. Большая часть нуклонов легких ядер при столкновении с нуклонами золота переходит в энергетическую область более 26 МэВ/н.

Результаты расчетов, полученных по каскадно-испарительной модели, изображены на рисунке сплошной линией. Легко заметить, что примененная модель довольно хорошо описывает сложную экспериментальную зависимость $\langle Nb \rangle (Ng+s)$ включая эффект "конечности" тяжелого ядра-мишени, наблюдаемый в эксперименте.

ФРАГМЕНТАЦИЯ ЯДРА МИШЕНИ

В рамках данной работы для каждого фрагмента ядра мишени (ν -частицы) были определены полярный (θ) и азимутальный (ψ) угол испускания, пробег этой частицы в фотозэмульсии. В предположении, что все ν -частицы являются протонами, были получены угловые, энергетические и импульсные характеристики для каждой ν -частицы. Средние значения множественности $\langle Nb \rangle$, полярного угла испускания, отношения количества частиц, летящих в переднюю полусферу к количеству частиц, летящих в заднюю полусферу (вперед/назад), продольного $\langle P_{\parallel} \rangle$ и поперечного $\langle P_{\perp} \rangle$ импульсов для взаимодействий ядер зо-

лота со средней энергией 741 МэВ/А и 10200 МэВ/А приведены в таблице 2. Результаты расчетов по КИМ приведены в скобках. В двойных скобках приведены результаты расчетов по двухпараметрической модели, описанной ниже.

Из таблицы 2 видно, что изменение массы мишени при нерелятивистских взаимодействиях почти в семь раз (при переходе от CNO к AgBr) приводит к увеличению множественности b -частиц (почти в 12 раз), энергии (в 1.8 раза), поперечного импульса (в 1.3 раза). При этом уменьшается направленность вперед - отношение вперед/назад уменьшается почти в 3.5 раза, уменьшается P_{\parallel} (в 1.5 раза) и увеличивается полярный угол испускания (в 1.2 раза). При росте энергии более чем в 10 раз характер изменений параметров b -частиц при увеличении массы ядра-мишени сохраняется, однако степень влияния массы ядра мишени уменьшается в среднем в два раза.

Данные расчетов по КИМ удовлетворительно согласуются с характеристиками b -частиц во взаимодействиях с тяжелыми ядрами фотоэмульсии отличаясь в среднем на 5-10%. Расчеты качественно описывают зависимость множественности, энергии и поперечного импульса низкоэнергетических протонов в зависимости от массы ядра мишени.

Для анализа влияния скорости налетающего снаряда на характеристики b -частиц вся имеющаяся нерелятивистская статистика взаимодействий с тяжелыми ядрами эмульсии была разделена на две группы энергия взаимодействия Евз менее 873 МэВ/н и Евз превышает 873 МэВ/н (ансамбли с одинаковым количеством b -частиц). Характеристики b -частиц из этих ансамблей также представлены в таблице 2. Видно, что при уменьшении скорости, наблюдается увеличение направленности вперед b -частиц и увеличение в 1,5 раза продольной составляющей импульса. Средний угол вылета уменьшается на 20%. Данный эффект наблюдался и ранее в работах [2-5]. В этих работах эффект объясняется вкладом частиц первой стадии процесса в энергетическую область $E < 26$ МэВ, при этом этот вклад увеличивается при уменьшении энергии ядра снаряда. При переходе от релятивистских взаимодействий к нерелятивистским данная тен-

денция сохраняется.

Экспериментальные измерения пробегов, азимутального и полярного угла испускания позволили определить компоненты 3-импульса для каждой из b -частиц. Для анализа были выбраны компоненты P_z (P_{\parallel}) – компонента импульса, направленная вдоль движения ядра снаряда и P_x ($P_{\perp} \cos \psi$) – проекция импульса на ось в азимутальной плоскости, перпендикулярной направлению движения ядра снаряда.

На рисунке 2 представлены экспериментальные (2а, 2б, 2в, 2г) и расчетные по КИМ (2д и 2е) распределения b -частиц по указанным компонентам 3-импульса. Эти распределения как в случае эксперимента, так и в случае расчета, близки к распределениям Гаусса, что позволяет ввести в рассмотрение систему, испускающую частицы изотропным образом с характерной температурой и скоростью движения. Оценку "эффективной" температуры системы, испускающей частицы, можно получить, предполагая, что распределение однозарядных частиц по каждому компоненту 3-импульса соответствует распределению Гаусса с параметром $\sigma = (2/\pi)^{0,5} \cdot \langle P_{\perp} \rangle$, а дисперсия связана с температурой как $T_0 = \sigma^2/m$. Проведенные оценки дают значения "эффективной" температуры испускания частиц в случае взаимодействий с тяжелыми ядрами порядка 6 МэВ как в случае нерелятивистских, так в случае релятивистских взаимодействий и скоростью движения $\langle \beta_{\parallel} \rangle = 0.025$ скорости света, как для эксперимента, так и для расчетных по КИМ событий для нерелятивистских взаимодействий и $\langle \beta_{\parallel} \rangle = 0.006$ скорости света для релятивистских взаимодействий.

Для сравнения распределений по выбранным для анализа компонентам 3-импульса (P_x и P_z) с распределением Гаусса была введена в рассмотрение двухпараметрическая модель. Суть данной модели заключается в генерации нормального распределения на основе двух параметров. В среде Mathcad при помощи встроенного генератора случайных чисел методом Монте Карло, на основе заданных величин генеральных средних и дисперсий, моделировались нормальные распределения. В качестве генеральной средней для компоненты

R_x был выбран ноль, генеральная средняя для компоненты R_z принималась на основе скорости источника. Генеральные дисперсии соответствуют температуре источника. Для каждого случая разыгрывалось 10000 испускаемых частиц. Поскольку разыгрываемая статистика заметно превышает экспериментальную, то в таблице 2 статистические ошибки для двухпараметрической модели не приводятся. Результаты, полученные на основе двухпараметрической модели, представлены на рисунке 2 пунктиром. Как видно из таблицы 2 и рисунка 2 данные расчетов по двухпараметрической модели удовлетворительно согласуются с характеристиками b -частиц во взаимодействиях с тяжелыми ядрами фотоэмульсии, отличаясь не более чем на 5%, что указывает на возможную применимость двухпараметрической модели для описания импульсных, энергетических и угловых характеристик медленных частиц, испускаемых ядром-мишенью.

ФРАГМЕНТАЦИЯ ЯДРА СНАРЯДА

На рисунке 3 приведен зарядовый спектр вторичных фрагментов из взаимодействий Au^{197} с $E=741$ МэВ/нуклон, $E=10,2$ ГэВ/нуклон и $E=700$ МэВ/нуклон (по каскадно-испарительной модели) с ядрами фотоэмульсии. В таблице приведены средние множественности фрагментов с атомным номером ($Z_{фр}$) более 2.

Из рисунка следует, что в теоретических и экспериментальных данных при $E \approx 700$ МэВ/нуклон, наблюдаются две области различия - в области зарядов фрагментов близких к заряду налетающего ядра ($Z_{фр}=70-79$) - расчетные данные значительно превышают эксперимент и в области зарядов фрагментов ($Z_{фр}=3-20$) - в этом случае расчет предсказывает меньший выход фрагментов по сравнению с наблюдаемым на практике. Так, например, в области зарядов фрагментов $Z_{фр}=70-79$ при энергиях снаряда около 700 МэВ/нуклон адекватные расчетные данные для нашей статистики (1000 событий) должны были составить всего 60 фрагментов вместо полученных в расчете 445. То есть в этой области атомных номеров фрагментов различие достигает коэффициента 7. Близкие коэффициенты различия между экспериментом и расчетом наблюда-

ются и в области $Z_{фр}=3-20$.

Изменение энергии налетающего ядра Au^{197} от 0,7 до 10,2 ГэВ/нуклон слабо сказывается на зарядовом спектре быстрых фрагментов. В обоих случаях наблюдаются пики распределений при зарядах $Z_{фр}=3-10$ и постепенное уменьшение вероятности выхода фрагментов с большим атомным номером.

Полученные различия в экспериментальных и расчетных данных показывают, что примененная модель слабо учитывает процессы мультифрагментации возбужденных сверхтяжелых ядер остатков. Как следствие, в расчетах практически отсутствуют взаимодействия с испусканием двух и более тяжелых фрагментов налетающего ядра. Средняя множественность тяжелых фрагментов налетающего ядра Au^{197} в экспериментах составила $1,7 \div 2,7$ фрагментов/взаимодействие (см. таблица), в то время как расчетное значение близко к 1. Увеличение в модели вероятности процессов мультифрагментации возбужденных осколков ядер снарядов привело бы к увеличению множественности фрагментов в области зарядов фрагментов $Z_{фр}=3-10$ и увеличило бы множественность фрагментов с $Z_{фр} \geq 3$ во взаимодействиях ядер в целом, что привело бы к более адекватному описанию эксперимента.

Кроме этого в эксперименте наблюдаются взаимодействия с присутствием двух фрагментов с $Z_{фр}$ более 20, что свидетельствует о наличии «делительных» процессов в экспериментальных ансамблях. Для выделения делительных событий из массива обработанных расщеплений ядер Au^{197} с энергией 10,2 ГэВ/нуклон были отобраны 16 событий, имевших, как минимум, два быстрых фрагмента налетающего ядра с зарядами $Z_{фр} \geq 20$ элементарных единиц заряда каждый. То есть, отношение поперечного сечения образования двух массивных осколков к полному неупругому поперечному сечению составило величину $0,035 \pm 0,009$. Эта величина оказалась весьма близкой к вероятности двойного деления ядер Au^{197} протонами больших энергий составляющую 3 – 5% [11].

В расчете подобных взаимодействия не наблюдается, поскольку в алгоритме использованной версии каскадно-испарительной модели процессы «деле-

ния» отсутствовали.

Аналогично фрагментам ядра мишени, для однозарядных (s' -частиц) и двухзарядных (g' -частиц) фрагментов ядра снаряда были построены распределения по проекции R_x для взаимодействий с тяжелыми ядрами эмульсии (рисунок 4). Проведенные оценки дают значения "эффективной" температуры испускания частиц в случае взаимодействий с тяжелыми ядрами порядка 10 МэВ для s' -частиц как в случае нерелятивистских, так в случае релятивистских взаимодействий. Для g' -частиц значения "эффективной" температуры испускания частиц составляет порядка 25 МэВ как в случае нерелятивистских, так в случае релятивистских взаимодействий. Также как и для фрагментов ядра мишени, для описания характеристик фрагментов ядра снаряда была использована двухпараметрическая модель. В качестве генеральной средней для компоненты R_x был выбран ноль. Генеральные дисперсии соответствуют температуре источников. Как видно из рисунка 4, результаты расчетов по двухпараметрической модели удовлетворительно согласуются с характеристиками однозарядных и двухзарядных фрагментов ядер снарядов во взаимодействиях с тяжелыми ядрами фотоэмульсии, отличаясь в среднем не более чем на 5%. Данные расчетов по КИМ совпадают с экспериментальными данными как для s' -частиц так и для g' -частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые экспериментальные и расчетные данные по множественности, угловым, энергетическим и импульсным характеристикам вторичных заряженных частиц различного типа, образующихся в результате неупругого взаимодействия ядер золота с ядрами фотоэмульсии при энергии 100-1147 МэВ/нуклон и 10,2 ГэВ/нуклон. Рассмотрена фрагментация ядра мишени и ядра снаряда. Проведен анализ зависимостей характеристик взаимодействий от энергии взаимодействующих ядер.

Для частиц, испускаемых на медленной стадии, обнаружен эффект "конечности" тяжелых ядер фотоэмульсии при их взаимодействии с ионами золота.

Этот эффект не наблюдался ранее в диапазоне масс налетающего ядра от 2 до 56 атомных единиц массы.

Поведение частиц второй стадии процесса, испускаемых как из ядер мишени, так и из ядер снарядов достаточно точно может быть описано при помощи двухпараметрической модели изотропного испускания частиц системами с “эффективными” температурами T_0 и скоростями движения, оцениваемыми из эксперимента.

Результаты расчетов по двухпараметрической модели описывают полученные экспериментальные величины с точностью 5%. Результаты расчетов по каскадно-испарительной модели качественно и количественно (с точностью 10-15%) описывают полученные экспериментальные величины, включая корреляционные зависимости, угловые, энергетические и импульсные характеристики вторичных заряженных частиц от массы ядра мишени и типа частиц.

При исследовании тяжелых фрагментов ядра снаряда обнаружено, что отличия экспериментальных и расчетных по КИМ данных заключается в малой (по сравнению с экспериментом) вероятности появления расщеплений быстрого ядра с несколькими фрагментами $Z \geq 3$ в расчетных результатах и, как следствие, искажению зарядовых спектров фрагментов Au^{197} в расчете.

В заключении авторы выражают благодарность сотрудникам Бэватрона в Беркли и ЛВЭ ОИЯИ в Дубне, подготовившим и предоставившим наш фотоэмульсионный материал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов С.Д., Богданов С.С., Космач В.Ф., Лихачев А.Ю., Молчанов В.М., Силанов В.А., Хассан Д.Х., Дудкин В.Е., Нefeldов Н.А., Вокал С., Богданов В.Г., Фокин А.Б. Фрагментация ядер Ne и Ar при энергии 0.1-3.6 А ГэВ при взаимодействии с ядрами фотоэмульсии и каскадно-испарительная модель. // Известия АН, сер.физ., 1996. Т. 60. № 11. С. 132-134.
2. Dudkin V.E., Kovalev E.E., Nefedov N.A. (Moscow, Space Res. Inst.), Antonchik V.A., Bogdanov S.D., Kosmach V.F., Likhachev A.Yu, Hassan J. (St. Petersburg U.), Benton E.V. (San Francisco U.), Crawford H.J. (UC, Berkeley). Multiplicities of secondaries in nuclear interactions, induced by ne-20, ar-40 and fe-56 nuclei at 0.1-gev/nucleon to 0.5-gev/nucleon. // Nucl. Phys., 1994. A 568. P. 906-916.
3. Богданов С.Д., Космач В.Ф., Молчанов В.М., Плющев В.А. Множественности вторичных частиц при расщеплении легких ядер фотоэмульсии ядрами Ne, Ar и Fe с энергией 0.2-0.5 ГэВ/нуклон // Известия АН, сер.физ., 1999. Т. 63. № 2. С. 427-429. (проект РФФИ 98-02-18173).
4. Бакаев В.А., Богданов С.Д., Богданов С.С., Космач В.Ф., Журкин Е.Е., Молчанов В.М. Страгглинги пробега тяжелых ионов и их зарядовая различимость // Известия АН, сер.физ., 2000. Т. 64. № 11. С. 2144-2147. (проект РФФИ 98-02-18173).
5. Bogdanov S.D., Bogdanov S.S., Dudkin V.E., Hassan J., Ivanov D.P., Zhurkin E.E., Kosmach V.F., Likhachev A.Yu., Nefedov N.A., Potapov Yu.V.. Ranges of 0.2-1.0 GeV/nucleon heavy ions in nuclear photoemulsion // Radiation Measurements, 1995. V. 25. № 1-4. P.111-114.
6. Богданов С.Д., Богданов С.С., Журкин Е.Е., Космач В.Ф. Исследования прохождения сверхтяжелых ионов через однородные среды при энергиях 100-1000 МэВ на нуклон// ЖЭТФ, 1999. Т. 115. в.2. С. 1-12.
7. Bakaev V.A., Bogdanov S.D., Bogdanov S.S., Dudkin V.E., Zhurkin E.E., Kosmach V.F., Kuzmin V.A., Nefedov N.A., Plustchev V.A., Hassan J.

Experimental studi of heavy ion beams // Surface Investigation, 1998. V. 13. P. 681-684.

8. Богданов С.Д., Богданов С.С., Космач В.Ф., Молчанов В.М., Шабля Е.Я. Средняя длина пробега быстрых ионов до неупругого взаимодействия // Поверхность, 2003. Вып. 4. С. 41.
9. M.I.Adamovich, M.M. Aggarwal, R. Arora, et al. // Europ. Phys. J. A. 1999. V.5(4). P.429.
10. Богданов С.Д., Богданов С.С., Космач В.Ф., Молчанов В.М., Шабля Е.Я. Фрагментация быстрых ионов// Поверхность, 2004. Вып. 4. С. 45-47.
11. Барашенков В.С. Тонеев В.Д. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и ядер с ядрами. // М., Атомиздат, 1972. С. 153-181.

К статье С.Д. Богданова и др. "Взаимодействия ядер золота с ядрами фото-эмульсии при релятивистских и нерелятивистских энергиях"

Адрес для переписки:

проф. д.ф.м.н. Богданов Сергей Дмитриевич

аспир. Шабля Егор Ярославович

Работа: Санкт-Петербургский государственный технический университет
195251, СПб, Политехническая ул. 29. К-89.

раб. тел. (812) 552-75-31

FAX (812) 5526086

E-mail shey79@mail.ru

E-mail sbogdanov@phmf.spbstu.ru

Дом: 197343 С.-Петербург Ланское шоссе 18 кв.60

дом. тел. (812) 246-61-20

К статье С.Д. Богданова и др. "Взаимодействия ядер золота с ядрами фотоэмульсии при релятивистских и нерелятивистских энергиях"

Таблица 1.

Множественность вторичных заряженных частиц, образующихся при взаимодействии ядер Au^{197} с ядрами фотоэмульсии

Ядро-мишень	$\langle Ng+s \rangle$, част/вз	$\langle Nb \rangle$, част/вз	$\langle Nb'+g'+s' \rangle$, част/вз	$\langle N \rangle$, част/вз	$\langle Z_{zv} \rangle$, эл. зар/вз
Au, E=741 МэВ/нуклон					
Em	21,71 ± 0,45 (19,06)	3,24 ± 0,09 (3,94)	16,24 ± 0,39 (13,04)	41,19 ± 0,81 (36,03)	91,92 ± 0,92 (95,08)
H	15,39 ± 0,61 (1,34)	0,49 ± 0,11 (0,02)	6,27 ± 0,76 (4,14)	7,18 ± 0,81 (5,49)	80,00 ± 2,69 (80,02)
CNO	13,39 ± 0,57 (10,74)	5,84 ± 0,32 (1,75)	20,51 ± 0,71 (15,26)	34,39 ± 0,92 (27,75)	82,51 ± 1,42 (87,56)
Ag Br	31,91 ± 0,76 (35,52)	5,88 ± 0,00 (7,85)	15,07 ± 0,52 (16,33)	52,86 ± 0,97 (59,70)	101,25 ± 1,34 (118,40)
Au, E=10200 МэВ/нуклон					
Em	63,23 ± 0,38	3,93 ± 0,09	13,89 ± 0,18	80,11 ± 0,42	128,88 ± 2,88
H	4,49 ± 0,24	0,39 ± 0,07	5,61 ± 0,27	10,49 ± 0,37	82,47 ± 0,40
CNO	37,31 ± 0,51	0,90 ± 0,08	17,70 ± 0,35	55,68 ± 0,63	102,89 ± 1,47
Ag Br	98,24 ± 0,65	6,95 ± 0,17	14,24 ± 0,25	117,73 ± 0,71	159,93 ± 4,63

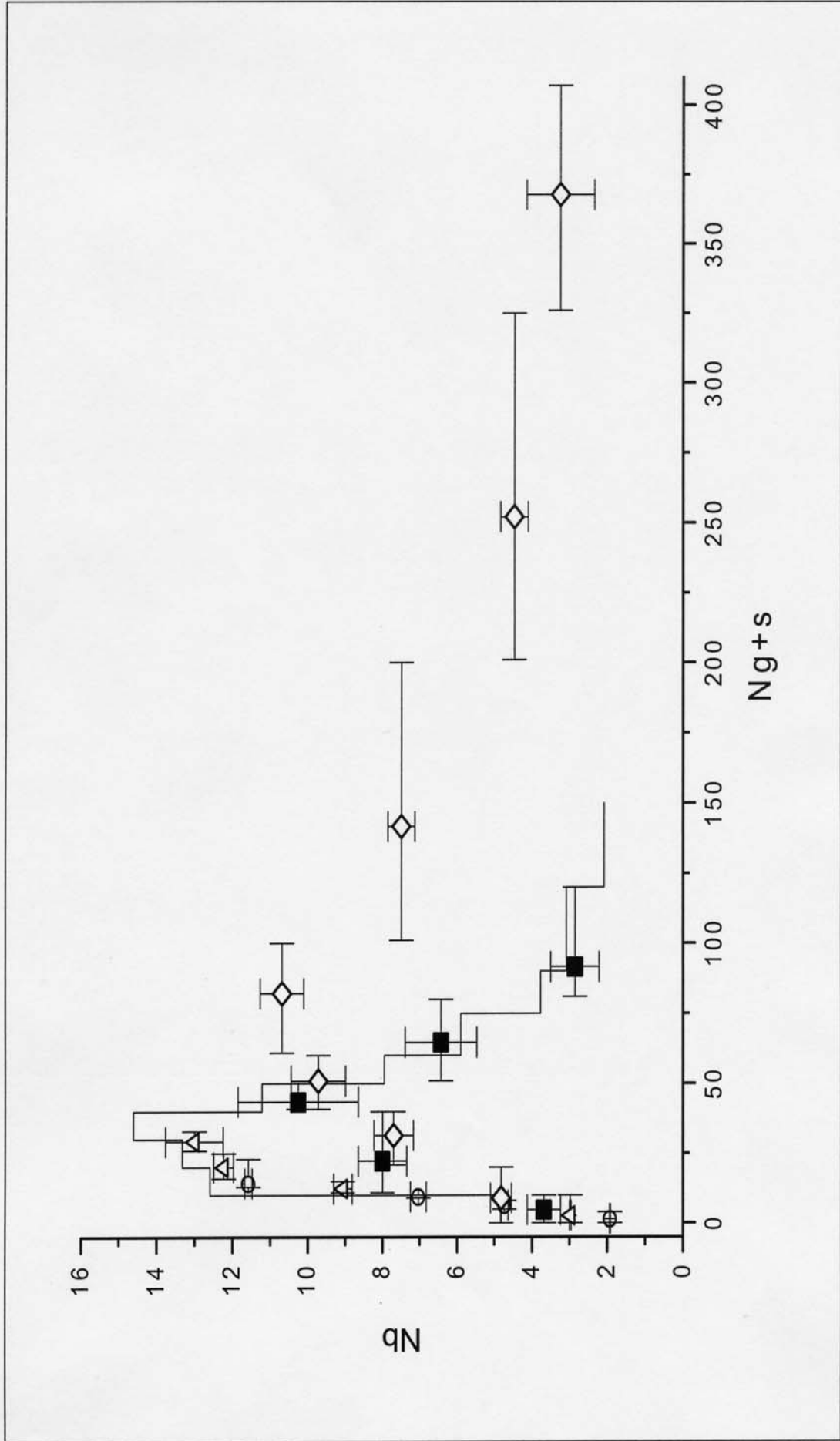


Рисунок 1

К статье С.Д. Богданова и др. "Взаимодействия ядер золота с ядрами фотоэмульсии при релятивистских и нерелятивистских энергиях"

Подпись к рисунку 1

Экспериментальные корреляционные зависимости средней множественности ν -частиц от числа быстрых ($g+s$) частиц в расщеплении, образующихся при взаимодействии ядер Au^{197} с энергией 0.741 ГэВ/нуклон (квадраты) и 10,2 ГэВ/нуклон (ромбы), ядер Ne^{20} с энергией 0.28 ГэВ/нуклон (кружки) и ядер Ar^{40} с энергией 0.27 ГэВ/нуклон (треугольники) с ядрами фотоэмульсии. Сплошной линией показана расчетная по КИМ корреляционная зависимость.

К статье С.Д. Богданова и др. "Взаимодействия ядер золота с ядрами фото-эмульсии при релятивистских и нерелятивистских энергиях"

Таблица 2.

Характеристики фрагментов ядра мишени с энергией $E \leq 26$ МэВ/нуклон, испускающиеся на второй стадии реакции

Ядро-мишень	$\langle Nb \rangle$, част/вз	$\langle \theta \rangle$, град	вперед/назад	$\langle E \rangle$, МэВ	$\langle P_{\parallel} \rangle$, МэВ/с	$\langle P_{\perp} \rangle$, МэВ/с
Au, E=0,741 ГэВ/нуклон						
Em	$3,24 \pm 0,17$ (3,94)	$77,81 \pm 1,91$ (80,03) ((77,35))	$1,76 \pm 0,09$ (1,59) ((1,77))	$9,23 \pm 0,37$ (9,72) ((9,21))	$26,26 \pm 3,92$ (19,6) ((26,29))	$94,96 \pm 2,62$ (94,29) ((94,91))
CNO	$0,49 \pm 0,11$ (1,76)	$64,63 \pm 5,14$ (84,30)	$5,67 \pm 0,58$ (1,38)	$5,25 \pm 1,15$ (7,24)	$36,76 \pm 9,31$ (13,67)	$71,92 \pm 9,15$ (79,02)
Ag Br	$5,88 \pm 0,32$ (7,85)	$78,71 \pm 2,00$ (79,32) ((78,82))	$1,65 \pm 0,09$ (1,62) ((1,63))	$9,47 \pm 0,38$ (10,14) ((9,49))	$25,43 \pm 4,12$ (20,54) ((25,38))	$96,36 \pm 2,71$ (96,93) ((96,47))
Au, Eвз $\leq 0,873$ ГэВ/нуклон						
Ag Br	$5,53 \pm 0,43$	$75,85 \pm 0,23$	$1,77 \pm 0,13$	$9,92 \pm 0,54$	$30,31 \pm 0,47$	$96,54 \pm 0,30$
Au, 0,873 ГэВ/нуклон $< E_{вз} < 1,147$ ГэВ/нуклон						
Ag Br	$6,27 \pm 0,49$	$81,62 \pm 0,21$	$1,55 \pm 0,13$	$9,01 \pm 0,53$	$20,46 \pm 0,43$	$96,17 \pm 0,30$
Au, 10,2 ГэВ/нуклон						
Em	$3,93 \pm 0,09$	$82,96 \pm 0,93$ ((82,73))	$1,34 \pm 0,05$ ((1,38))	$10,28 \pm 0,17$ ((10,26))	$17,82 \pm 1,95$ ((17,98))	$100,24 \pm 1,17$ ((100,03))
CNO	$0,90 \pm 0,08$	$80,08 \pm 3,28$	$1,42 \pm 0,20$	$8,48 \pm 0,58$	$23,68 \pm 6,48$	$90,57 \pm 1,24$
Ag Br	$6,95 \pm 0,17$	$83,10 \pm 0,98$ ((83,22))	$1,33 \pm 0,05$ ((1,31))	$10,45 \pm 0,17$ ((10,49))	$17,42 \pm 2,06$ ((18,01))	$101,18 \pm 3,93$ ((100,76))

К статье С.Д. Богданова и др. "Взаимодействия ядер золота с ядрами фото-эмульсии при релятивистских и нерелятивистских энергиях"

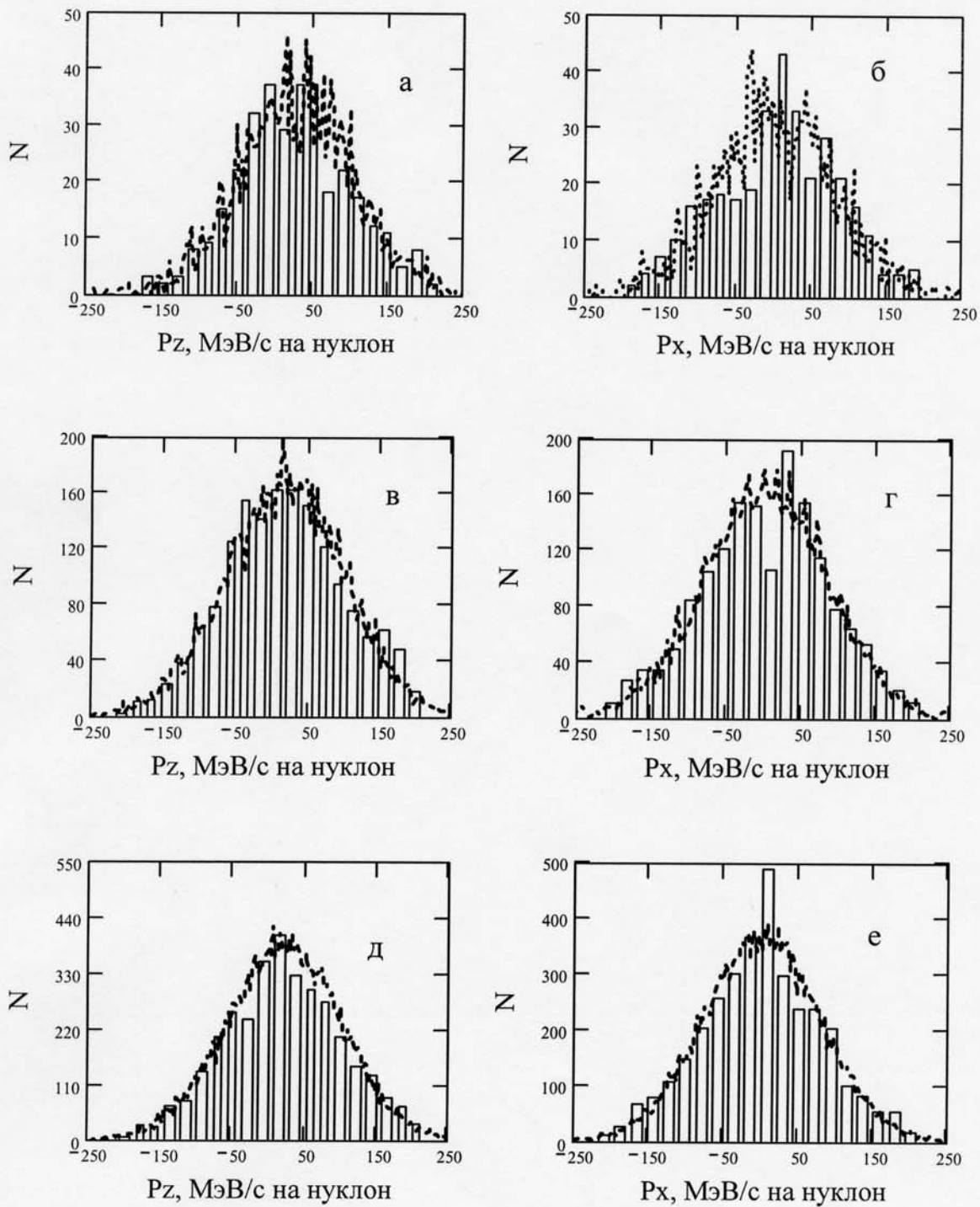


Рисунок 2

К статье С.Д. Богданова и др. "Взаимодействия ядер золота с ядрами фотоэмульсии при релятивистских и нерелятивистских энергиях"

Подпись к рисунку 2

Распределения по двум компонентам (P_z, P_x) 3-импульса во взаимодействиях ядер Au^{197} со средней энергией 0.741 ГэВ/нуклон (эксперимент – ν -частицы (а,б)) и 10.2 ГэВ/нуклон (эксперимент – ν -частицы (в,г)) с ядрами фотоэмульсии. Расчет по КИМ - ν -частицы (д,е). Пунктирной линией показаны результаты расчетов по двухпараметрической модели.

К статье С.Д. Богданова и др. "Взаимодействия ядер золота с ядрами фото-эмульсии при релятивистских и нерелятивистских энергиях"

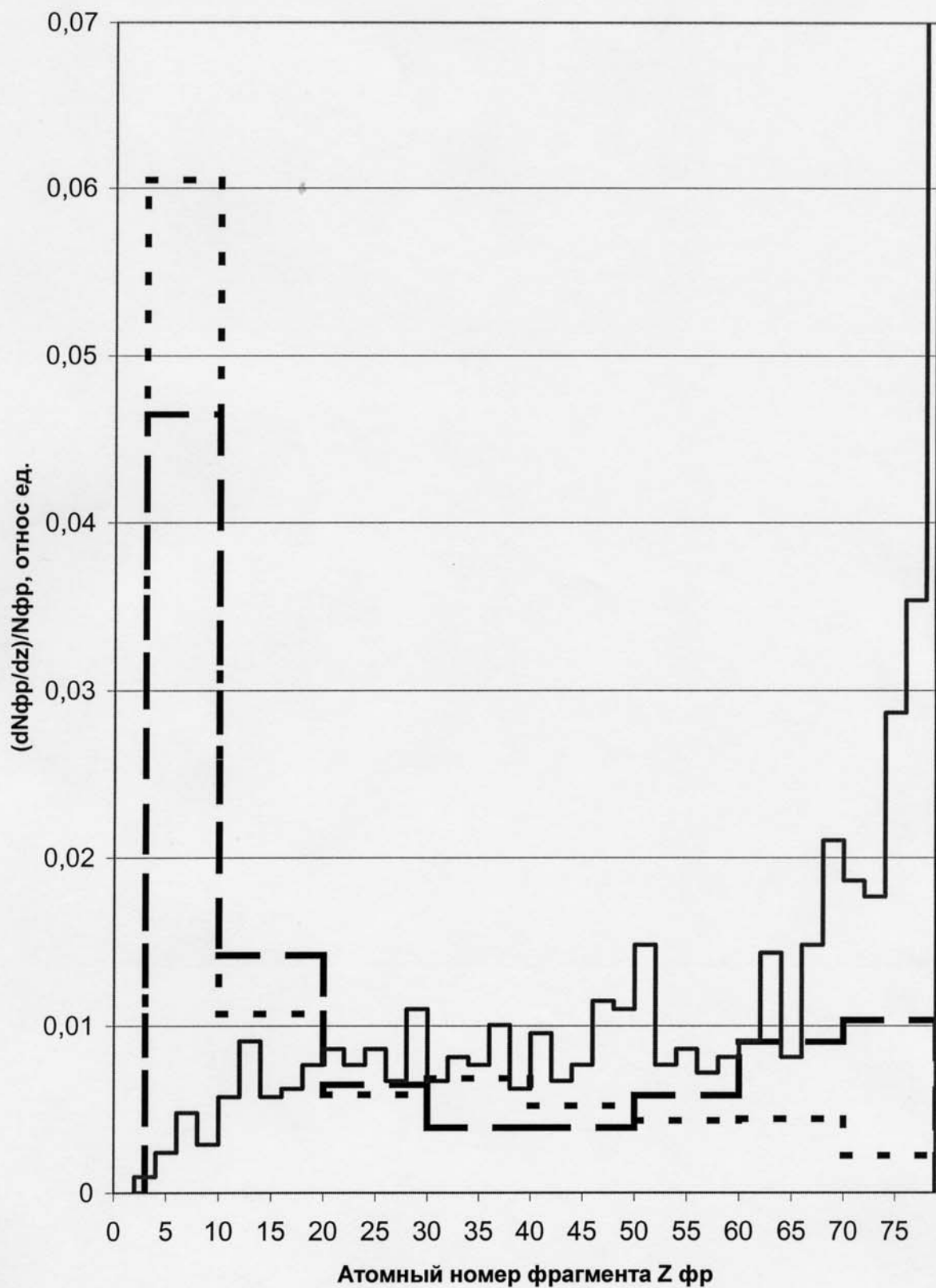


Рисунок 3

К статье С.Д. Богданова и др. "Взаимодействия ядер золота с ядрами фотоэмульсии при релятивистских и нерелятивистских энергиях"

Подпись к рисунку 3

Зарядовый спектр вторичных фрагментов из экспериментальных взаимодействий ионов Au^{197} с $E=741$ МэВ/нуклон (пунктирная линия), с $E=10,2$ ГэВ/нуклон (штриховая линия) и расчет по каскадно-испарительной модели с $E=700$ МэВ/нуклон – (сплошная линия) с ядрами фотоэмульсии. Нормировка графика проведена по площади. Для каскадно-испарительной модели значение dN/dZ при $Z_{\text{фр}}=79$ достигает 0,11.

К статье С.Д. Богданова и др. "Взаимодействия ядер золота с ядрами фото-эмульсии при релятивистских и нерелятивистских энергиях"

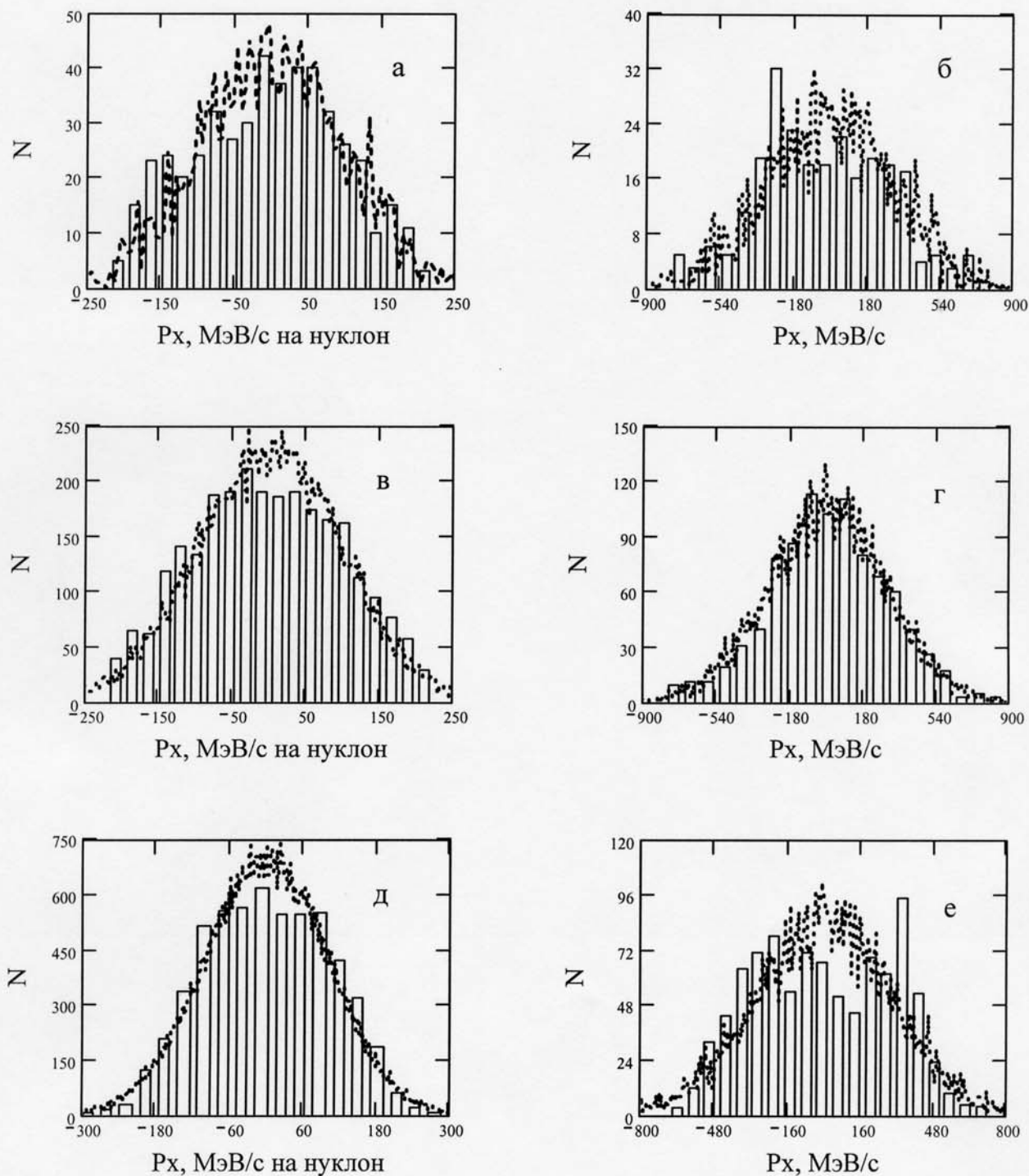


Рисунок 4

К статье С.Д. Богданова и др. "Взаимодействия ядер золота с ядрами фотоэмульсии при релятивистских и нерелятивистских энергиях"

Подпись к рисунку 4

Распределения по компоненте (P_x) 3-импульса во взаимодействиях ядер Au^{197} со средней энергией 0.741 ГэВ/нуклон (эксперимент – s' -частицы (а); g' -частицы (б)) и 10.2 ГэВ/нуклон (эксперимент – s' -частицы (в); g' -частицы (г)) с ядрами фотоэмульсии. Расчет по КИМ – s' -частицы (д); g' -частицы (е). Пунктирной линией показаны результаты расчетов по двухпараметрической модели.