КОРРЕЛЯЦИИ ЧАСТИЦ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ АДРОНОВ И ЯДЕР С ЯДРАМИ В ФОТОЭМУЛЬСИИ

Ф.Г.Лепехин, Б.Б.Симонов

Введение

Интерес к жестким адрон-адронным взаимодействиям при высоких энергиях (переданный квадрат четырехимпульса $q^2 >> 1$ $(\text{ГэВ/с})^2$) обусловлен тем, что в них отчетливо проявляется струйный характер множественных процессов. Струи адронов, возникающие при рассеянии кварков или глюонов, составляющих адрон, несут информацию о динамике рождения и фрагментации кварков и глюонов, которые в свободном состоянии отсутствуют. Эти же струи могут пролить свет и на таинственный пока механизм самого конфайнмента. В мягких адрон-адронных ($q^2 < 1$ $(\text{ГэВ/с})^2$), а также и в адрон- ядерных взаимодействиях существование динамических кластеров (кластеризация частиц) все еще не доказано. В том и другом случае требуются новые экспериментальные данные и новые методы их обработки.

Те же методы и подходы применимы и в ядерно-ядерных взаимодействиях высоких энергий, где, благодаря нуклонному строению ядра, могут возникать условия для появления коллективных потоков ядерного вещества, не сводящихся к простой суперпозиции нуклон-нуклонных взаимодействий.

Изучение взаимодействий релятивистских ядер с ядрами в фотоэмульсии в ЛФВЭ началось в Сотрудничествах [1], [2], где эмульсии облучались в ЛВЭ ОИЯИ дейтронами и α-частицами с энергией около 4 ГэВ на нуклон. Образование в ЛФВЭ группы релятивистской ядерной физики (Е.Н. Вольнин) и работы по изучению фрагментации тяжелых ядер под действием протонов с энергией 1 ГэВ в Гатчине способствовали формированию интересов фотоэмульсионных работ к процессу фрагментации релятивистских ядер.

В связи с этим целью исследований неупругих взаимодействий адронов с нуклонами и ядрами, а также ядер с ядрами при высоких энергиях фотоэмульсионным методом, явилось получение новых экспериментальных данных как об основных характеристиках этих взаимодействий, так и об их особенностях, связанных с коррелированным вылетом вторичных частиц из зоны взаимодействия.

Анализируемые фотоэмульсионные эксперименты

Экспериментальные данные для анализа были получены как в рамках ряда сотрудничеств, так и самостоятельно фотоэмульсионной группой ЛФВЭ. Облучение пучками протонов и π^--мезонов проводилось на ускорителе FNAL (Батавия, США). Использовались слои эмульсии типа БР-2 размером 10×20 см^2, с толщиной слоя $\simeq 600$ мкм, плотность облучения параллельно слою составляла $\simeq (2-4) \cdot 10^4$ частиц/см^2. Угловой разброс пучка $\simeq 10^{-4}$ радиан. Плотность зерен на пучковых следах (чувствительность фотоэмульсии) $\simeq 25 - 30$ блобов на 100 мкм. Кратко перечислим наборы событий, используемых далее для анализа.

а) $p-N$-взаимодействия при 200 ГэВ (1620 квазинуклонных взаимодействий в сотрудничестве [3]).

p–А-взаимодействия при 200 ГэВ (1709 неупругих взаимодействий в сотрудничестве [4]).

б) π^-–А-взаимодействия при 200 ГэВ (4853 неупругих взаимодействий в сотрудничестве [5]).

в) $p-N$-взаимодействия при 400 ГэВ (1322 неупругих квазинуклонных событий в сотрудничестве [6]).

p–А-взаимодействия при 400 ГэВ (3353 неупругих протон-ядерных событий в сотрудничестве [7]).

г) Взаимодействия ядер ^{22}Ne с ядрами в фотоэмульсии при импульсе 4.1 А ГэВ/с в сотрудничестве [8]. В этом эксперименте для анализа было использовано 4309 событий.

Коме того, вне рамок сотрудничеств получены данные о взаимодействии ядер ^{6}Li с импульсом 4.5 ГэВ/с на нуклон (934 неупругих взаимодействия, содержащих 1425 одно- и двухзарядных фрагментов первичного ядра ^{6}Li) [9], [10].

Нами также были получены из CERN слои ядерной фотоэмульсии, облученные ионами свинца-208 с энергией 160 ГэВ на нуклон. Просмотром по площади найдено 141 неупругое взаимодействие первичных ядер ^{208}Pb с ядрами в фотоэмульсии, в которых среди продуктов фрагментации ядра-снаряда были только легкие фрагменты с $Z < 6-8$. В них измерены плоские углы двухзарядных фрагментов первичных ядер [11]. Взаимодействия со свободными и квазисвободными нуклонами отбирались по общепринятым в фотоэмульсиях критериям. Разделение на фрагменты ядра-снаряда и фрагменты ядра-мишени производилось также по стандартным критериям.

При исследовании взаимодействия быстрых частиц с ядрами в ядерных фотоэмульсиях в первую очередь измеряются и исследуются углы вылета вторичных частиц - полярные углы θ и азимутальные углы ψ, либо плоские углы φ и глубинные α. Кроме того, по ионизации и по счету δ-электронов, расположенных вдоль траектории частицы, можно определить заряд частицы Z.

Динамические корреляции в $p-N$ и адрон-ядерных взаимодействиях

Угловые корреляции вторичных частиц с физической точки зрения выглядят таким образом,что вероятность наблюдения какого-то малого угла между частицами в эксперименте должна быть больше, чем это будет из угловых распределений одиночных частиц при независимом их разлете. Должны быть пространственные корреляции частиц. Группа частиц, имеющих аномально малые углы друг с другом и есть струя. На этом и основан предложенный авторами метод исследования статистической зависимости вылета вторичных частиц друг от друга (типа их пространственного "слипания") и выделения в обычном пространстве компактных, изолированных групп этих частиц-струй, кластеров, испущенных при взаимодействии частиц или атомных ядер высоких энергий с ядрами [12], [16]. В основе предлагаемого метода лежит нахождение вероятности $\mathbf{P}$ того, что несколько частиц в событии находятся близко друг к другу. Малые значения $\mathbf{P}$ указывают на неслучайный характер такого расположения частиц.

Назовем струями группы из s частиц события, вероятность образования которых $\mathbf{P}$ меньше некоторого критического ее значения $\mathbf{P_c} = \mathbf{10^{-8}}$. Поиск таких струй среди событий, зарегистрированных Сотрудничествами [3], [6] в фотоэмульсии, и среди событий, генерированных по Модели Независимого Испускания (МНИ) и кварковой Резонансной Модели Множественного Рождения (РММР) Анисовича-Шехтера, показал, что узких пар и троек частиц, идущих под углами в ЛСК $\simeq 3-4°$ и вероятности наблюдения которых $\mathbf{P} < 10^{-5}$, в эксперименте всегда значимо больше. Пример одного из таких событий приводится на рис.1.

Узкая группа или струя обведена пунктиром. Ожидаемое место для частиц ее "сопровождения" заштриховано. В данном событии частиц там не оказалось, но еще 7 частиц, кроме 3-х, образующих струю, лежат вблизи плоскости, через нее проходящей, с довольно близкими углами θ образуя две, лежащие друг против друга группы. Событий такого типа ни в МНИ на статистике в 100 раз большей, ни в РММР на статистике в 5 раз большей не обнаружено ни одного. Итак, имеются динамические корреляции частиц в обычном пространстве, которые имеют характер струй или узких групп частиц. Частота появления таких струй в эксперименте значимо больше, чем в МНИ или в модели, включающей рождение резонансов и законы сохранения. Однако при энергиях $200-400$ ГэВ на имеющейся статистике число ливней еще мало.

Одной из возможных причин корреляций вторичных частиц в p–А- и π^-–А-взаимодействиях может служить кластеризация частиц. Понятие кластеризации не определяется так четко, как корреляция, и степень кластеризации не имеет определенной меры. Обычно под кластеризацией понимается процесс образования каких-то групп, сгустков, комков, струй частиц, который идет с вероятностью, меньшей их случайного образования. Эти сгустки не имеют определенной массы или квантовых чисел и не отождествляются с известными резонансами.

Далее нами был использован метод прямого доказательства существования эффектов кластеризации вторичных частиц [12]. В адрон-ядерных взаимодействиях отобраны события с множественностью ливневых частиц больше пяти. В каждом событии определялся наименьший угол до s соседа r_s, где $s = 1,2,3,4$ и строились распределения по величине $x = 1/r_s^2$, пропорциональной плотности частиц на "шапочке", ометаемой сферическим радиусом r_s при данном s. Точно такая же процедура применялась и к событиям, генерированным по Монте-Карло. На рис.2 представлены эти распределения для $s = 1,3$. Видно, что случайные события содержат при всех s очень большой максимум при самых малых плотностях x, в то время как эксперимент дает значительно большее число событий, содержащих много большие плотности. Это различие слишком контрастно, чтобы можно было допустить какое-либо другое объяснение, кроме как ясно выраженное в эксперименте стремление частиц к пространственному "слипанию" [13].

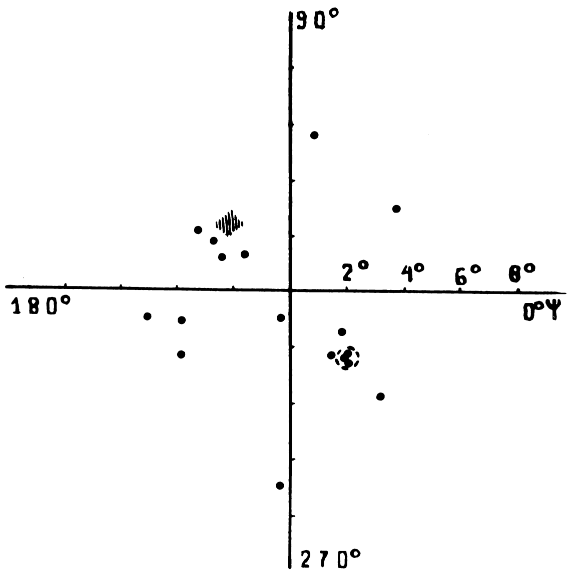

Рис.1. Углы θ и ψ одного из событий среди $p-N$ 400 ГэВ взаимодействий, которое содержит струю из трех частиц (обведены пунктиром).

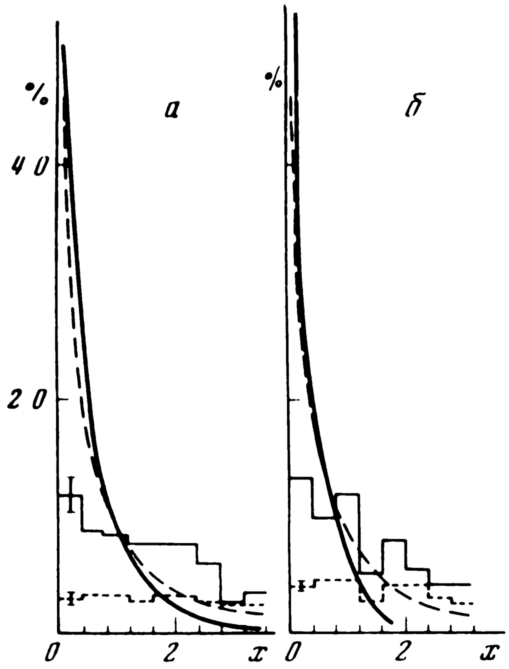

Рис.2. Распределение величин $x = 1/r_s^2$ для $s = 1$ (штриховая кривая) и $s = 3$ (сплошная кривая). Эксперимент – гистограмма; события, разыгранные по Монте Карло – сплошная линия; а) p–ядро 200 ГэВ/с; б) π^-–ядро 200 ГэВ/с.

Возбужденные пре-фрагменты

Существуют глубокие физические основания, согласно которым распределения проекции поперечных импульсов фрагментов на плоскость эмульсии должны быть распределены нормально с дисперсией $\sigma^2(Z)$, где Z—заряд фрагмента. В статистической модели фрагментации зависимость $\sigma^2(Z)$ от массы фрагментирующего ядра A и фрагмента A_F дается в виде параболического закона:

$$\sigma^2(Z) = \sigma_0^2 \cdot \frac{A_F \cdot (A - A_F)}{A - 1}, \tag{1}$$

где $\sigma_0 = P_F/\sqrt{5}$. Здесь P_F—это граничный импульс Ферми нуклонов ядра с массовым числом A. Рис.3 иллюстрирует довольно хорошее согласие эксперимента [14] с параболическим законом (1).

Для фрагментов ядер ^{22}Ne эксперимент дает $\sigma_0 = 102.5 \pm 2.5$ МэВ/с, что практически совпадает с известным граничным импульсом Ферми нуклонов ядра неона. Распределение проекций поперечных импульсов фрагментов является нормальным со средним нуль и дисперсией σ_0^2 (рис.4) [14].

Таким образом, наши экспериментальные данные согласуются с тем, что явление фрагментации релятивистского ядра представляет собой статистический процесс, поиск отклонений от которого составляет содержательную часть экспериментального исследования распределения поперечных импульсов фрагментов релятивистских ядер, к которой мы и переходим.

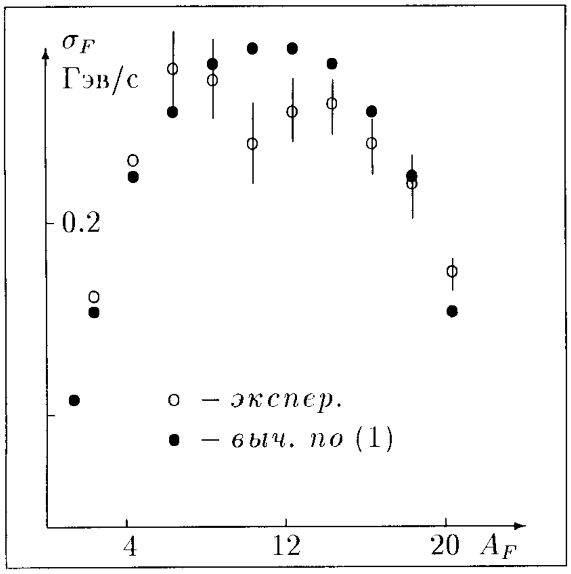

Рис.3. Зависимость $\sigma(Z)$ от A_F для фрагментов ^{22}Ne с импульсом 4.1 ГэВ/с на нуклон.

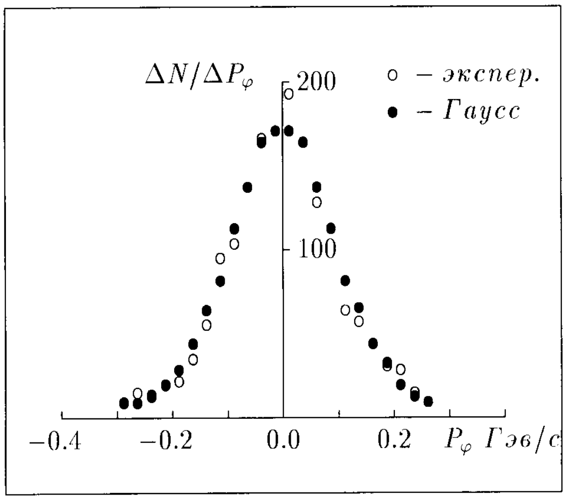

Рис.4. Распределение P_φ для фрагментов ^{22}Ne с импульсом 4.1 ГэВ/с на нуклон.

В процессе фрагментации релятивистских ядер наблюдаемые в эксперименте фрагменты могут быть продуктами распада остаточных ядер - пре-фрагментов. В настоящее время экспериментальная информация о свойствах пре-фрагментов практически отсутствует. Нами предложен новый способ оценки поперечных импульсов фрагментов в СЦИ пре-фрагмента по экспериментально наблюдаемым величинам [15]. Правда, здесь рассматриваются пре-фрагменты, распадающиеся только на два фрагмента. Переход от наблюдаемых величин к поперечным импульсам фрагментов в системе покоя двух фрагментов осуществляется через поперечную часть инвариантной массы двух частиц:

$$M^2_{12\perp} = m^2_U \cdot (A_1 + A_2)^2 + 4 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot P_0 \cdot \sin^2(\theta_{12}/2). \tag{2}$$

Здесь A_1, A_2 – массовые числа фрагментов 1 и 2, P_0 – импульс на нуклон частицы-снаряда, $m_U = 0.931$ ГэВ – массовая единица, θ_{12} угол между следами фрагментов 1 и 2 в фотоэмульсии. Считается, что масса фрагмента равна $A_F \cdot m_U$, а его импульс есть $P_0 \cdot A_F$. Последнее утверждение означает, что продольные составляющие импульсов всех фрагментов одинаковы. Поэтому фрагменты движутся друг относительно друга только в направлении, перпендикулярном к направлению движения СЦИ, или в поперечной плоскости СЦИ, не совпадающей с поперечной плоскостью лабораторной системы. Полная инвариантная масса 2-х фрагментов состоит из суммы масс покоя фрагментов и суммы их кинетических энергий в поперечной плоскости их СЦИ, и она равна (2). Теперь поперечный импульс в СЦИ 2-х фрагментов будет

$$P^\star_\perp = P_0 \cdot \mathrm{Sin}(\theta_{12}/2) \cdot \sqrt{A_1 \cdot A_2 \cdot [1 - \frac{m^2_U \cdot (A_1 - A_2)^2}{M^2_{12\perp}}]}. \tag{3}$$

Так как поперечные импульсы фрагмента в лабораторной системе и в системе центра масс 2-х фрагментов следуют распределению Рэлея, то легко показать, что отношение средних величин поперечных импульсов фрагментов в лабораторной системе координат к средним поперечным импульсам в системе центра масс двух фрагментов $\eta =< P_{\perp exp} > / < P_{\perp}^{\star} >$ при равных массах фрагментов будет равно $\sqrt{2}$. Величина η определялась из экспериментального набора неупругих взаимодействий ядер ^{22}Ne с ядрами в фотоэмульсии при импульсе 4.1A ГэВ/с. Отобрано 1004 события, содержащие только два фрагмента. Для частиц с $Z = 1$ измерялись их импульсы по многократному рассеянию. Это позволило разделить изотопы водорода. Массовые числа фрагментов с $Z > 2$ полагались равными $A_F = 2Z$.

Моделирование эксперимента дает величину $\eta = 1.461 \pm 0.003$. Превышение над $\eta = \sqrt{2}$, если его считать значимым, надо отнести за счет приближенности оценки самой ожидаемой величины. А в эксперименте $\eta = 1.32 \pm 0.01$, что значимо меньше и предсказания, и оценки Монте-Карло. Это значит, что $< P_{\perp}^{\star} >= 0.197 \pm 0.006$ ГэВ/с в эксперименте больше, чем для ожидаемого значения этой же величины для независимого разлета фрагментов (0.150 ± 0.003) ГэВ/с, и поперечная часть инвариантной массы 2-х фрагментов в эксперименте больше, чем при независимом разлете фрагментов. А это можно рассматривать, как указание на то, что пре-фрагменты, распадающиеся на 2 фрагмента, в нашем эксперименте возбуждены.

Некоторые особенности угловых распределений вторичных частиц в индивидуальных событиях

При выделении струй рожденных частиц в наборе [8] получены следующие результаты [12],[16]. Было выделено 177 событий, каждое из которых содержит струю из 2 частиц, 21 событие, содержащее тройки, и 11 событий, содержащих четверки частиц. Каждая из этих групп не является составной частью группировок более высокого порядка, т.е. найденные двойки не входят в выделенные тройки, четверки и т.д. При моделировании по МНИ 10 ансамблей событий, в каждом из которых распределение по величине ns тождественно экспериментальному, таких событий на один разыгранный ансамбль оказалось 87.5, 5.3 и 2.0 , соответственно. Таким образом, в эксперименте было выделено 209 событий со струями, а в МНИ только 94.8.

Разница между экспериментальным ансамблем и моделированным для событий, содержащих струи из 2-х, 3-х и 4-х частиц статистически значима.

При анализе углов вылета вторичных релятивистских однозарядных частиц в этом же наборе событий обнаружены два качественно новых явления, характерных для ядерно-ядерных взаимодействий и не наблюдавшихся ранее во взаимодействиях адрон-ядро и при более высоких энергиях [17].

Первое явление наблюдается в событиях с большим числом вторичных частиц и состоит в том, что значительная доля этих частиц в поперечной плоскости летит в одну сторону. Это боковое выплескивание релятивистских частиц, которое нами наблюдается в индивидуальных событиях. Для обнаружения бокового выплескивания частиц в событии использованы статистические критерии, не связанные с группировкой данных в гистограмму (ω^2-критерий, критерий Колмогорова). Критические значения на однопроцентном уровне значимости были превзойдены для 40 событий из 1959 событий с числом релятивистских частиц больше 8. При равномерном распределении азимутальных углов во всех событиях моделирование 10 наборов, соответствующих эксперименту, дало в среднем 19.6 событий. Вероятность наблюдедения наших 40 событий при дисперсии 19.6 будет $3 \cdot 10^{-5}$. Пример одного из азимутально-асимметричных событий показан на рис.5. В нем 24 из 27 релятивистских частиц летят в одну сторону.

Для частиц другого типа - более медленных (серые и черные следы) такого эффекта не наблюдается.

Для сравнения обратимся к анализу адрон-ядерных взаимодействий.

Из 3628 протон-ядерных взаимодействий при энергии 400 ГэВ и 5353 $\pi^{-}-$ядерных взаимодействий при энергии 200 ГэВ были отобраны 6636 событий с числом однозарядных релятивистских частиц 8 и более. В них теми же методами как и в ядерно-ядерных взаимодействиях искались события с неравномерным распределением по азимутальному углу. Было найдено 73 таких события при ожидаемом их числе 66.34; отсюда следует, что в адрон-ядерных взаимодействиях нет никакого указания на эффект, ясно наблюдаемый в ядерно- ядерных взаимодействиях.

Второе явление составляют так называемые "особые" события. При анализе центральных столкновений (сумма зарядов фрагментов ядра-снаряда равна нулю, а число сильноионизующих частиц $N_h > 6$) при большой множественности ($\simeq 40$) вторичных однозарядных релятивистских частиц обнаружены события, где не наблюдается вылет этих частиц до полярных углов $6-12$ градусов (события с "пустой серединой"). Вероятность образования в событии "пустой середины" оценивалась методом п.3 при числе частиц в струе, равном нулю. На 214 центральных событий мы наблюдали 20 особых событий. Вероятность такого наблюдения, по нашим оценкам, не более 10^{-3}. Одно из особых событий показано на рис.6.

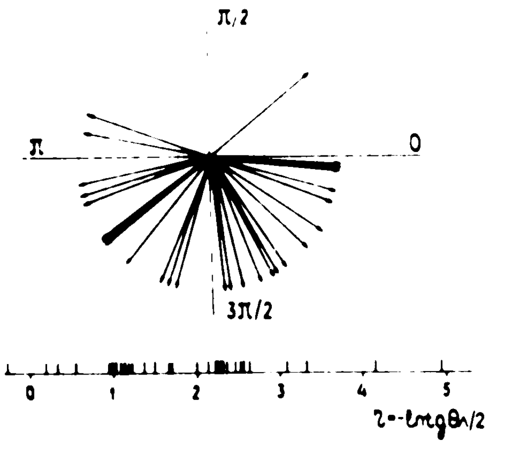

Рис.5. Рисунок азимутально асимметричного события для рожденных частиц.

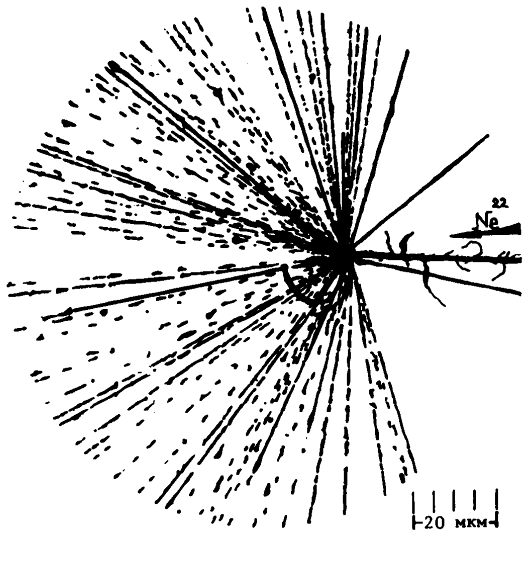

Рис.6. Одно из "особых" событий.

Фрагментация ядер ^{6}Li

Основные результаты изучения фрагментации ядер ^{6}Li с импульсом 4.5 ГэВ/с в фотоэмульсии [9], [10] сводятся к следующему.

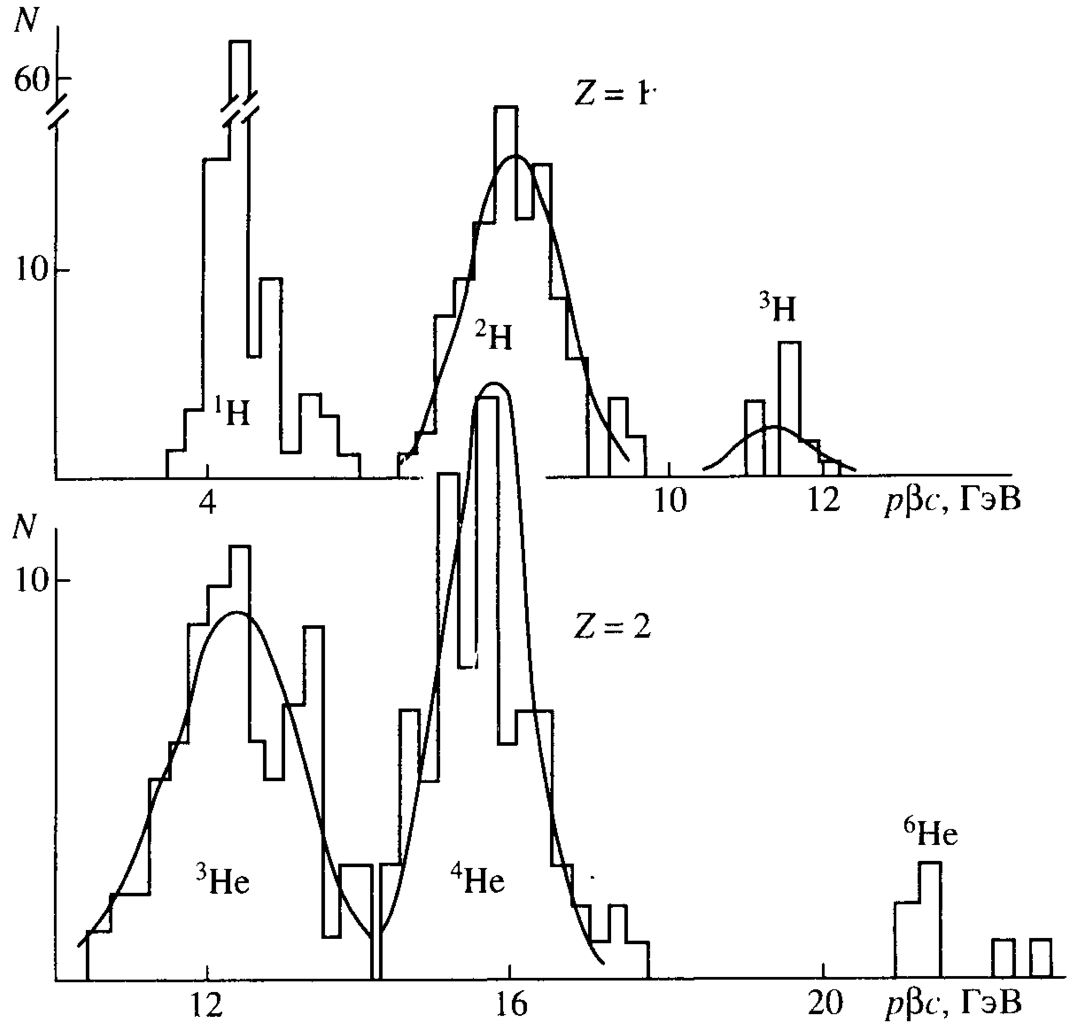

Рис.7. Разделение изотопа водорода (верхняя часть) и гелия по измерениям $p\beta c$. Гистограммы-эксперимент, кривые-нормальные распределения, полученные по МНК.

1. Среди однозарядных фрагментов - 50% протонов, 42% дейтронов и 8% ядер трития. Ошибки этих оценок $3-4\%$. Среди двухзарядных фрагментов гелий-3 и гелий-4 встречаются одинаково часто $(48-49\%)$. Доля изотопа ^{6}He $\simeq 2-3\%$ (рис.7).

2. Наличие изотопа ^{6}He среди двухзарядных фрагментов ядра ^{6}Li привело к предсказанию и последующему обнаружению в нашей выборке событий, которые должны быть, если процесс обмена нуклонами между релятивистским ядром - снарядом и мишенью идет с достаточно большим сечением. Действительно, оно оказалось равным 12 ± 3 мбн.

3. Особенно интересно наблюдение "чистой" фрагментации ядра ^{6}Li на две двухзарядные частицы без вторичных рожденных частиц и медленных частиц разрушения мишени.

4. Из распределений проекции поперечных импульсов фрагментов-протонов на плоскость эмульсии получена оценка граничного импульса Ферми нуклонов ядра ^{6}Li. По нашей оценке его величина равна 111 ± 6 МэВ/с.

5. Показано, что характерные размеры области в ядре ^{6}Li, из которой вылетают $\alpha-$частицы, в 2 раза меньше, чем размер области, из которой вылетают протоны.

6. Величина η в эксперименте не отличается от $\sqrt{2}$. Возбужденные пре-фрагменты при фрагментации ^{6}Li не образуются.

Заключение

В целом проведенные исследования взаимодействий адронов и ядер высоких энергий с ядрами в фотоэмульсии указывают на струйный характер множественных процессов и коллективный характер ядерно-ядерных взаимодействий.

Список литературы

[1] *J.A.Galstyan,..., F.G.Lepekhin, B.B.Simonov et al.*// Nucl. Phys., 1973. A208. P.626-636.

[2] *К.Д.Толстов,..., Ф.Г.Лепехин, Б.Б.Симонов и др.* Сообщения ОИЯИ Р1-8313, 1974. Дубна.

[3] *З.В.Анзон,..., Ф.Г.Лепехин, Б.Б.Симонов и др.*// Письма в ЖЭТФ, 1973. Т.17. С.655-658.

[4] *З.В.Анзон,..., Ф.Г.Лепехин, Б.Б.Симонов и др.*// ЯФ, 1973. Т.19. С.1046-1051.

[5] *Z.V.Anzon,...,F.G.Lepekhin, B.B.Simonov et al.*// Nucl. Phys.B, 1977. V.129. P.205-231.

[6] *Э.Г.Боос,...,Ф.Г.Лепехин, Б.Б.Симонов и др.*// ЯФ, 1979. Т.30. С.407-414.

[7] *E.G Boos,..., F.G.Lepekhin, B.B.Simonov et al.*// Nucl. Phys.B, 1978. V.143. P.232-262.

[8] *Н.П.Андреева,...,Ф.Г.Лепехин, Б.Б.Симонов и др.*// Изв. АНСССР. Сер.физ., 1986. Т.50. С.2103-2105.

[9] *Ф.Г.Лепехин, Д.М.Селиверстов, Б.Б.Симонов.*// Письма в ЖЭТФ, 1994. Т.59. Вып.5. С.312-315.

[10] *Ф.Г.Лепехин, Д.М.Селиверстов, Б.Б.Симонов.*// ЯФ, 1995. Т.58. С.881-887.

[11] *О.В.Левицкая, Ф.Г.Лепехин, Д.М.Селиверстов, Б.Б.Симонов.* Препринт ПИЯФ-1996, Гатчина. 1996. 22с.

[12] *Б.Б.Симонов.* Кандидатская диссертация, 1994, С.Петербург. ПИЯФ РАН. 145с.

[13] *Ф.Г.Лепехин, Б.Б.Симонов.*// ЯФ, 1978. Т.27. 1. С.175-183.

[14] *Ф.Г.Лепехин, Б.Б.Симонов.* Препринт ПИЯФ-1885, С.Петербург. 1993. 34с.

[15] *Ф.Г.Лепехин, Б.Б.Симонов.*// Письма в ЖЭТФ, 1993. Т.58. С.493-496.

[16] *Ф.Г.Лепехин, Б.Б.Симонов.* Препринт ЛИЯФ-1550, 1989. Ленинград. 20с.

[17] *Sh.Abdujamilov,.., F.G.Lepekhin, B.B.Simonov et al.* 20-th International Cosmic Ray Conference, 1987. Moscow. V.5. P.65-68.