



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

1-2001-132

В-66

На правах рукописи  
УДК 539.171.1; 539.172,17

**ВОКАЛ**  
**Станислав**

**КОЛЛЕКТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ  
В СОУДАРЕНИЯХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР  
В ФОТОЭМУЛЬСИИ**

Специальность: 01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Дубна 2001

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований и на Кафедре ядерной физики Факультета естественных наук Университета П.И. Шафарика в Кошице.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор	Батусов Юрий Александрович
доктор физико-математических наук, профессор	Смирнитский Владимир Александрович
доктор физико-математических наук, профессор	Смирнова Лидия Николаевна

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

Защита диссертации состоится "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ "2001 года в \_\_\_\_\_"  
часов на заседании диссертационного совета Д-047.01.02 в  
Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных  
исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ "2001 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

*М.Ф.Лихачев* М.Ф.Лихачев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы.

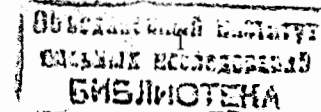
Релятивистская ядерная физика в настоящее время интенсивно развивается. С начала 1970-тых годов, когда на синхротроне ЛВЭ ОИЯИ впервые были получены пучки релятивистских ядер, исследование столкновений высокоэнергичных ядер с ядрами стало одной из наиболее актуальных задач современной физики [1]. Пучки быстрых атомных ядер предоставляют возможность изучать поведение ядерной материи в экстремальных условиях высоких температур и плотностей.

Теоретическое рассмотрение процесса неупругого взаимодействия двух ядер показывает, что в условиях сильного сжатия и высокой температуры ядерной материи, сопровождающих эти реакции, возможно существование новых форм ядерной материи, в частности, сверхплотной и кварковой [2].

Систематический поиск таких явлений проводился на синхротроне ЛВЭ, и были получены первые результаты по ядерному кумулятивному эффекту [3]. Позже пучки ультра-релятивистских ядер были получены на ускорителях AGS BNL и SPS CERN с импульсами 11-15 А ГэВ/с и 160-200 А ГэВ/с, соответственно.

В настоящее время для продолжения и расширения исследований в области физики релятивистских ядер в ЛВЭ введен в строй созданный на основе сверхпроводящих магнитов новый ускоритель Нуклотрон [4].

До начала работ над данной диссертацией, т.е. до середины 80-х годов, одним из самых интересных и необычных открытий в области энергий, меньших 1 А ГэВ, было наблюдение существования т.н. коллективных эффектов, предсказанных гидродинамической теорией ядро-ядерных взаимодействий. В 1955 г. Беленький и Ландау [5] впервые применили гидродинамическую модель к описанию столкновений нуклонов и ядер. В 1959 г. Гласголд с сотрудниками [6] предсказал формирование ударных волн при прохождении высокоэнергичных протонов и пионов через атомное ядро со скоростями, превышающими скорость звука в ядерной материи. Коллективное гидродинамическое поведение ядерной материи в соударениях высокоэнергичных ядер было впервые предсказано Шейдом [7]. В своей работе авторы



обратили внимание на поток ядерной материи в направлении, перпендикулярном относительному движению сталкивающихся ядер. Они показали, что поперечная граница зоны перекрытия взаимодействующих ядер расширяется быстрее, чем продольная.

Позже в теоретических расчетах по гидродинамической модели [8] была предсказана для соударений ассиметричных атомных ядер со средними параметрами удара эмиссия фрагментов ядра-снаряда под определенным ненулевым углом, который зависит от прицельного параметра. Это, т.н., эффект отскока фрагментов налетающего ядра ("bounce-off effect"). Такая эмиссия фрагментов ядра-снаряда сопровождается вылетом фрагментов ядра-мишени под углом около  $90^\circ$  в лабораторной системе.

Первые экспериментальные указания на возможные проявления таких эффектов были получены в инклюзивных экспериментах [9] при анализе данных по двухпротонным корреляциям в столкновениях ядер аргона с энергией 800 А МэВ с ядрами свинца. Убедительное доказательство существования боковых потоков частиц было получено несколько позже в экспериментах проводимых на установках с  $4\pi$  геометрией со стримерной камерой [10] и с, т.н., "Plastic Ball/Plastic Wall" [11] на ускорителе Бевалак в Беркли. Эти экспериментальные результаты были успешно интерпретированы на основе гидродинамической модели [12].

Коллективные эффекты зависят от параметра удара. Для их экспериментального наблюдения важно уметь отделить центральные взаимодействия от более вероятных периферических взаимодействий и от столкновений со средними параметрами удара. Используемый нами фотоэмульсионный метод позволяет косвенно производить такое разделение несколькими способами, например, измерением суммарного заряда спектаторных фрагментов ядра-снаряда или полного числа фрагментов ядра-мишени.

В предлагаемой диссертационной работе представлены результаты систематического исследования эмиссии фрагментов сталкивающихся ядер и рожденных частиц в неупругих взаимодействиях высокоэнергичных атомных ядер с ядрами (Ag, Br) фотоэмульсионного детектора в области импульсов ядер-снарядов от 1 до 200 А ГэВ/с.

Цель исследований - поиск эффектов в ядро-ядерных столкновениях, которые не описываются простой суперпозицией нуклон-нуклонных

соударений. Другими словами: "Существуют ли коллективные эффекты, предсказанные ранее гидродинамической теорией для ядро-ядерных взаимодействий при энергиях до 1 А ГэВ, и при более высоких энергиях - при энергиях ускорителей ЛВЭ ОИЯИ, АGS БНЛ и SPS в Церне?". Так стоял вопрос в период начала работ, результаты которых представлены в данной диссертации.

### Цель работы:

- получение новых экспериментальных данных по ядро-ядерным взаимодействиям в широком диапазоне энергий и масс ядер-снарядов с использованием полной информации по углам и множественностям всех вторичных заряженных частиц в  $4\pi$  геометрии, предоставляемой методом ядерных фотоэмульсий;
- экспериментальное исследование множественностей и угловых характеристик фрагментов сталкивающихся ядер и рожденных частиц в зависимости от массы и энергии ядра-снаряда и прицельного параметра соударения;
- поиск и систематическое изучение эффектов коллективного потока ядерного вещества в непериферических взаимодействиях высокоэнергичных ядер с ядрами (Ag, Br) и Pb единым эмульсионным методом.

### Научная новизна работы.

1. Предложен и использован новый комплексный подход для исследования угловых характеристик вторичных заряженных частиц в ядерных реакциях при высоких энергиях с целью поиска и изучения эффектов коллективного потока ядерной материи.
2. Впервые для анализа такого рода были одновременно использованы вторичные частицы всех имеющихся типов - релятивистские фрагменты ядра-снаряда, рожденные частицы и медленные фрагменты ядра-мишени.
3. Впервые были проанализированы уникальные экспериментальные данные по ядерным взаимодействиям полученные единой методикой в широком диапазоне масс ( $A = 1 - 208$ ) и импульсов ( $P_0 = 1 - 200$  А ГэВ/с) сталкивающихся ядер. Экспериментальные данные в большинстве случаев были получены впервые.

4. Применение разных методов анализа коллективных эффектов позволило установить ряд ранее неизвестных свойств изучаемых явлений в области энергий дубненского синхрофазотрона: отскок фрагментов ядра-снаряда и боковой выплеск фрагментов ядрамишени вместе с их эмиссией в противоположные стороны в азимутальной плоскости. Оба эффекта усиливаются при уменьшении параметра удара.

### Научная и практическая значимость.

Результаты, полученные в настоящей диссертации, являются установленными научными фактами, которые могут стать исходной базой для построения программы систематических исследований ядроядерных взаимодействий на современных ускорителях.

Исследованы зависимости различных характеристик вторичных заряженных частиц от массы и энергии налетающего ядра и прицельного параметра соударения.

Впервые проведено единым фотоэмульсионным методом систематическое экспериментальное исследование процессов бокового потока ядерного вещества в столкновениях ядер с определением плоскости реакции. Процессы коллективного потока ядерной материи имеют важное значение для теоретического рассмотрения уравнения состояния и фазового перехода адронной материи в кварк-глюонную плазму.

Практическая ценность результатов исследования определяется возможностью их использования для создания новых и развития имеющихся моделей ядроядерных взаимодействий и планирования новых экспериментов на пучках нуклотрона, ЛНС и т.д.

Установленные зависимости множественностей и угловых характеристик фрагментов сталкивающихся ядер и рожденных частиц могут быть использованы в физике космических лучей при исследовании их состава и каскада в атмосфере и при решении задач радиационной безопасности космических кораблей и орбитальных станций.

### На защиту выдвигаются следующие результаты:

1. Новые экспериментальные данные по характеристикам вторичных заряженных частиц во взаимодействиях ядер  $^{84}\text{Kr}$  и  $^{32}\text{S}$  с ядрами фотоэмульсии с импульсами 1,55 и 4,5 А ГэВ/с, соответственно.
2. Сравнительный анализ влияния энергии и массы ядра-снаряда, а так же прицельного параметра ядроядерного соударения, на множественности и угловые характеристики вторичных заряженных частиц.
3. Результаты анализа эффектов коллективного потока ядерного вещества во взаимодействиях ядер  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{84}\text{Kr}$ ,  $^{197}\text{Au}$  и  $^{208}\text{Pb}$  с ядрами (Ag, Br) и  $^{12}\text{C}$  и  $^{24}\text{Mg}$  с ядрами Pb со средними параметрами удара при энергиях ускорителей Брукхейвена, Дармштадта, Дубны и Церна с использованием единого эмульсионного метода.

### Апробация работы.

Основные материалы, изложенные в диссертации, были опубликованы в работах [A1] – [A37]. Они докладывались и обсуждались на международных рабочих совещаниях Дубненской, EMU01 и Криптоновой коллабораций, на конференциях чешских и словацких физиков (Bratislava, 1985; Pardubice, 1987; Zvolen, 1999, 2000), на международных семинарах по физике высоких энергий (Дубна, 1988, 1990, 2000), на международных конференциях "PANIC" (Heidelberg, 1984), Ninth European Cosmic Ray Symposium (Košice, 1984), "ICRC" (Москва, 1987), "Multiparticle Dynamics" (Wuhan, China, 1991), "Scientific Conference of TU" (Košice, 1994, 1999), "Hadron Structure" (B.Štiavnica, 1993; Košice, 1994; Stará Lesná, 1996), "Mini Workshop on Relativistic Heavy Ion Collis." (Jaipur, India, 1997), "RNP" (Stará Lesná, 2000) и были представлены в виде стендовых докладов на других международных конференциях.

## Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 37 работ.

## Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Список цитируемой литературы содержит 117 наименований. Общий объем 131 страница, включая 67 рисунков и 20 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность проблемы и формулируются цели работы. Основная цель - поиск и исследование коллективных эффектов в непериферических взаимодействиях релятивистских ядер с ядрами (*Ag*, *Br*) и *Pb* в фотоэмульсиях. Кратко изложено современное состояние проблемы и содержание диссертации.

В **Первой главе** изложена методика эксперимента и представлены новые данные по общим характеристикам столкновений релятивистских ядер при  $P_0$  от 1 А ГэВ/с до 200 А ГэВ/с.

В §1.1 даны общие сведения об эксперименте. Экспериментальный материал диссертационной работы состоит из 9 ансамблей неупругих соударений релятивистских ядер с ядрами фотоэмульсии -  $^{84}Kr$  при  $P_0 = 1,55$  А ГэВ/с,  $^{22}Ne$  при  $P_0 = 4,1$  А ГэВ/с,  $^{12}C$ ,  $^{16}O$ ,  $^{28}Si$  и  $^{32}S$  при  $P_0 = 4,5$  А ГэВ/с,  $^{197}Au$  при  $P_0 = 11,6$  А ГэВ/с,  $^{28}Si$  при  $P_0 = 14,6$  А ГэВ/с и  $^{208}Pb$  при  $P_0 = 158$  А ГэВ/с. Кроме этого в работе использовались экспериментальные данные по  $^{12}C$  и  $^{24}Mg$  - взаимодействиям с ядрами свинца при  $P_0 = 4,5$  А ГэВ/с. Проведено сравнение и с другими данными Дубненской и ЕМУ01 коллабораций.

Используемые данные были получены в рамках международных коллабораций - Дубненской, Криптоновой и ЕМУ01. Автор пользуется случаем выразить глубокую признательность коллегам по Сотрудничеству за многолетнюю совместную работу.

Просмотр эмульсионных стопок проводился методом прослеживания "вдоль следа" пучкового ядра до его взаимодействия или выхода из просматриваемой области. Измерялись пространственные ( $\theta$ )

и азимутальные ( $\varphi$ ) углы вылета всех заряженных частиц в  $4\pi$  геометрии, заряды ( $Z$ ) спектаторных фрагментов ядра-снаряда, пробеги фрагментов ядра-мишени ( $R$ ) и импульсы релятивистских частиц ( $p\beta c$ ) на части статистики.

Вторичные заряженные частицы были разделены на следующие типы:

1. Черные или *b*-частицы, в основном испарительные фрагменты ядра-мишени с  $\beta \leq 0,23$ .
2. Серые или *g*-частицы, в основном быстрые фрагменты отдачи из мишени с  $0,23 < \beta \leq 0,7$ .  
Черные и серые частицы вместе образуют группу фрагментов ядра-мишени, т.н. *h*-частицы,  $N_h = N_b + N_g$ .
3. Релятивистские однозарядные частицы или *s*-частицы с  $\beta > 0,7$ , основную их массу составляют рожденные частицы, а так же среди них присутствуют провзаимодействовавшие протоны ядра-снаряда и релятивистские однозарядные частицы отдачи из мишени.
4. Спектаторные фрагменты ядра-снаряда с  $\beta \sim 0,98$  - это многозарядные с  $Z \geq 3$  (*f*-частицы), двухзарядные ( $\alpha$  - частицы) и однозарядные (*s'*-частицы с  $\theta < \theta_{fr}$ , где  $\theta_{fr}$  - угол фрагментационного конуса).

В каждом событии определялся суммарный заряд  $Q$ , уносимый спектаторными фрагментами ядра-снаряда  $Q = \sum Z_{fr}$ , который часто используется как удобная экспериментально измеряемая величина для оценки прицельного параметра соударения.

Проанализированный в данной работе экспериментальный материал уникален по широкому набору масс ядер-снарядов и их энергий.

В §1.2 приводится анализ множественностей фрагментов обоих сталкивающихся ядер и рожденных частиц, необходимый для дальнейшего анализа и представляющий самостоятельный интерес.

Исследован характер зависимости множественностей вторичных частиц от энергии и массового числа ядра-снаряда и от прицельного параметра ядро-ядерного соударения. Получено, что при фиксированном массовом числе ядра-мишени  $A_T$  множественности вторичных

заряженных частиц возрастают с ростом массы ядра-снаряда  $A_P$  тем сильнее, чем больше их средние импульсы в лабораторной системе координат. При фиксированной массе ядра-снаряда  $A_P$  среднее число ливневых частиц  $\langle N_s \rangle$  быстро увеличивается с ростом  $P_0$ , но число фрагментов ядра-мишени практически не изменяется.

Множественности всех типов заряженных частиц существенно зависят от прицельного параметра ядро-ядерного соударения, качественной мерой которого является величина  $Q$ . Было показано, что числа ( $N_h$ ,  $N_g$  и  $N_s$ ) тоже могут быть использованы для оценки прицельного параметра. Распределения множественностей быстрых фрагментов ядра-мишени (g-частиц) в ядро-ядерных столкновениях при дубненских энергиях хорошо описываются простой аналитической моделью, где в качестве исходной информации используется распределение g-частиц, полученное в экспериментах по протон-ядерным взаимодействиям.

В §1.3. исследованы угловые характеристики вторичных заряженных частиц.

Измерены выходы релятивистских заряженных пионов, приходящиеся на один протон - участник соударения, в центральных  $^{22}\text{Ne} + (\text{Ag}, \text{Br})$  взаимодействиях при 4,1 А ГэВ/с. Получено, что они на 45 – 50% выше, чем в периферических столкновениях.

Этот факт указывает на то, что множественность рожденных частиц зависит от толщины ядра-мишени на пути протона-участника соударения.

Зависимость средней псевдобыстроты  $\langle \eta_s \rangle$  от  $N_g$  имеет излом при  $N_g \approx 24$  с последующим насыщением, которое указывает на равномерное распределение энергии ядра-снаряда в его центральных соударениях с (Ag, Br).

Коллимация g-частиц вперед возрастает как с уменьшением энергии ядра-снаряда (при данном  $A_P$ ) так и с увеличением массы ядра-снаряда (при данном  $P_0$ ).

В угловых спектрах медленных заряженных частиц - продуктов расщепления ядра-мишени обнаружены широкие максимумы, более отчетливо проявляющиеся в центральных соударениях ядер-снарядов с тяжелыми ядрами фотоэмульсии.

Основные результаты по главе I приведены в §1.4.

Во **второй** главе изложены результаты комплексного анализа корреляционных явлений в поперечной (азимутальной) плоскости ядро-ядерных взаимодействий. Для этой цели в работе использовались:

а) Парные азимутальные углы  $\epsilon = \epsilon_{ij} = \arccos(\vec{P}_{T_i} \cdot \vec{P}_{T_j} / P_{T_i} \cdot P_{T_j})$  между векторами поперечных импульсов частиц из одного акта соударения.

б) Коэффициенты азимутальной асимметрии  $\beta_1$  и коллинеарности  $\beta_2$  в индивидуальных актах соударения

$$\beta_{1,k} = \sum_{i \neq j} \cos \epsilon_{ij} / \sqrt{N_k(N_k - 1)}, \quad (1)$$

$$\beta_{2,k} = \sum_{i \neq j} \cos 2\epsilon_{ij} / \sqrt{N_k(N_k - 1)}, \quad (2)$$

где  $N_k \geq 2$  - множественность частиц рассматриваемого типа в  $k$ -том событии изучаемого ансамбля;  $k = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  - число событий в ансамбле;  $i, j = 1, 2, \dots, N_k$ .

в) Распределения и среднее значение угла  $\Phi$  между направлениями преимущественного испускания двух групп частиц из одного события,

$$\Phi_{ij}^k = \arccos((a_i a_m + b_i b_m [(a_i^2 + b_i^2)(a_m^2 + b_m^2)]^{-1/2}), \quad (3)$$

где  $a_i = \sum_i \cos \varphi_i$ ,  $b_i = \sum_i \sin \varphi_i$ ,  $a_m = \sum_j \cos \varphi_j$ ,  $b_m = \sum_j \sin \varphi_j$ .

При этом  $i = 1, \dots, N_{k,l}$ ;  $j = 1, \dots, N_{k,m}$  и  $N_{k,l}, N_{k,m} \geq 1$  - множественности частиц  $i$ -го и  $j$ -го типа в  $k$ -ом событии ансамбля.

Изучались внутри- и междугрупповые корреляции [13], т.е. между частицами одного типа или разных типов, но из разных кинематических областей соударения. Методология анализа описана в §2.1.

В следующем §2.2. рассмотрены корреляции между фрагментами релятивистского ядра  $^{22}\text{Ne}$  при его взаимодействиях с ядрами фотоэмульсии. Показано, что в процессе соударения остаточное ядро  $^{22}\text{Ne}$  приобретает значительный поперечный импульс, в среднем равный 0,4 ГэВ/с.

Зарегистрирована эмиссия фрагментов ядер-снаряда и мишени в противоположные стороны в азимутальной плоскости, которая увеличивается с уменьшением параметра удара (характеризуемого уменьшением  $Q$ ).

Эмиссия фрагментов ядра-мишени и рожденных частиц обсуждается в §2.3. В непериферических ядерных взаимодействиях  $^{16}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,

Табл. 1: Зависимость коэффициентов  $\beta_1^s$ ,  $\beta_1^h$  и угла  $\Phi_{sh}$  от суммарного заряда спектраторных фрагментов ядра-снаряда  $Q$  в  $^{22}\text{Ne} + (\text{Ag}, \text{Br})$  - столкновениях при  $P_0 = 4, 1$  А ГэВ/с.

Критерий отбора	$\langle \beta_1^s \rangle$	$\langle \beta_1^h \rangle$	$\langle \Phi_{sh} \rangle - \pi/2$
$0 \leq Q < 2$	$0,13 \pm 0,03$ (-0,02)	$0,10 \pm 0,03$ (-0,03)	$0,40 \pm 0,04$ (0,17)
$2 \leq Q < 4$	$0,08 \pm 0,03$ (-0,02)	$0,15 \pm 0,03$ (-0,01)	$0,39 \pm 0,04$ (0,13)
$4 \leq Q < 7$	$-0,02 \pm 0,02$ (-0,10)	$0,03 \pm 0,02$ (-0,03)	$0,27 \pm 0,03$ (0,21)
$7 \leq Q < 9$	$-0,01 \pm 0,02$ (-0,11)	$-0,05 \pm 0,02$ (-0,01)	$0,22 \pm 0,04$ (0,15)
$Q \geq 9$	$-0,07 \pm 0,02$ (-0,12)	$-0,02 \pm 0,02$ (0,03)	$0,19 \pm 0,04$ (0,12)

$^{28}\text{Si}$  и  $^{32}\text{S}$  с тяжелыми ядрами эмульсии при энергиях дубненского синхрофазотрона обнаружена азимутальная асимметрия - боковое выплескивание ("side-splash")  $s$ -частиц и фрагментов ядра-мишени.

Коэффициенты азимутальной асимметрии релятивистских  $s$ -частиц ( $\beta_1^s$ ) и фрагментов ядра-мишени ( $\beta_1^h$ ) вместе со значениями угла  $\Phi_{sh}$  между направлениями преимущественного испускания  $s$ - и  $h$ -частиц в  $^{22}\text{Ne} + (\text{Ag}, \text{Br})$  - столкновениях при  $P_0 = 4, 1$  А ГэВ/с приведены в табл. 1 в зависимости от степени центральности соударения ( $Q$ ).

Этот эффект сопровождается эмиссией релятивистских  $s$ -частиц и фрагментов ядра-мишени в противоположных направлениях в азимутальной плоскости. Тенденция к противоиспусканию этих частиц усиливается с увеличением центральности соударения.

Наблюдаемый эффект предпочтительного направления потока частиц выражен сильнее если отобрать класс событий с асимметричной эмиссией частиц одного типа (напр.  $s$ -частиц) и смотреть междугрупповые корреляции фрагментов ядра-партнера.

Модельные расчеты по каскадно-испарительной модели (КИМ)[14] не описывают поведение изучаемых угловых характеристик  $s$ - и  $h$ -частиц от  $N_h$  (или  $Q$ ) в непериферических соударениях ядер  $^{22}\text{Ne}$  с

ядрами (Ag, Br) в фотоэмульсии.

Увеличение атомного веса налетающего ядра не влияет на поведение этих зависимостей от  $Q$ .

Показано, что с уменьшением параметра удара усиливается угловая зависимость корреляций. Наблюдаемый эффект не подтверждается модельным расчетом по КИМ и указывает на возможное проявление коллективного (гидродинамического) потока ядерной материи.

Впервые были измерены характеристики непериферических взаимодействий ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{24}\text{Mg}$  с ядрами свинца при 4,5 А ГэВ/с и изучены азимутальные корреляции между разными типами вторичных заряженных частиц (§2.4.). При этом наблюдается систематическое (как для Mg+Pb, так и для C+Pb взаимодействий) отличие от нуля коэффициента азимутальной коллинеарности для  $s$ -частиц. Так же показано, что рост массы ядра-снаряда в ядерных столкновениях со свинцом при  $P_0 = 4, 5$  А ГэВ/с приводит к усилению эффектов бокового выброса  $s$ - и  $h$ -частиц и их противоиспускания в азимутальной плоскости.

В §2.5. приведены результаты анализа зависимости парных азимутальных углов для  $s$ -частиц в  $^{22}\text{Ne}$  и  $^{28}\text{Si} + \text{Em}$  соударениях с  $P_0 = 4, 1$  и 4,5 АГэВ/с от их полярного угла.

В §2.6 перечислены основные результаты главы II.

В третьей главе описаны исследования боковых потоков ядерного вещества в столкновениях  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{84}\text{Kr}$  и  $^{197}\text{Au}$  с тяжелыми ядрами фотоэмульсии (Ag, Br) при  $P_0 = (1 - 15)$  А ГэВ/с с использованием трех разных подходов.

§3.1. посвящен поискам коллективного потока частиц методом результирующих векторов [15].

Для фрагментов ядра-снаряда и ядра-мишени были вычислены суммарные векторы  $\vec{V}_P$  и  $\vec{V}_T$ , построенные из единичных векторов в направлении вылета фрагментов сталкивающихся ядер.

Полярные углы  $\Theta_P$  для  $\vec{V}_P$  представлены в табл. 2 для  $^{84}\text{Kr}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{28}\text{Si}$  и  $^{197}\text{Au}$  взаимодействий с ядрами (Ag, Br) при  $P_0 = (1 - 15)$  А ГэВ/с. В скобках приведены результаты расчета по КИМ [14].

Были получены ненулевые углы потока фрагментов ядер-снарядов, которые не описываются как расчетами по КИМ, так и при использовании "смешанных" событий. При этом углы потока фрагментов первичных ядер увеличиваются с ростом центральности столкнове-

Табл. 2: Угол потока  $\Theta_P$  фрагментов ядра-снаряда в соударениях  $^{84}\text{Kr}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{28}\text{Si}$  и  $^{197}\text{Au}$  с ядрами ( $Ag, Br$ ) при  $P_0$  от 1,55 до 14,6 А ГэВ/с.

$P_0$ [А ГэВ/с]	Ядро-снаряд	$\Theta_P$ в градусах	Критерии отбора
1.55	$^{84}\text{Kr}$	$1.4 \pm 0.1$	$N_g = 1 - 6$
		$2.0 \pm 0.1$	$N_g \geq 7$
4.1	$^{22}\text{Ne}$	$0.54 \pm 0.03$ (0.41)	$N_h = 7 - 13$
		$0.80 \pm 0.08$ (0.41)	$N_h = 14 - 27$
		$1.26 \pm 0.40$ (0.40)	$N_h \geq 28$
4.5	$^{28}\text{Si}$	$0.51 \pm 0.04$ (0.33)	$N_h = 7 - 13$
		$0.61 \pm 0.04$ (0.42)	$N_h = 14 - 27$
		$0.82 \pm 0.15$ (0.42)	$N_h \geq 28$
11.6	$^{197}\text{Au}$	$0.26 \pm 0.02$ (0.23*)	$N_s < 100$
		$0.32 \pm 0.02$ (0.23*)	$N_s = 100 - 200$
		$0.47 \pm 0.06$ (0.30*)	$N_s > 200$
14.6	$^{28}\text{Si}$	$0.15 \pm 0.02$ (0.14)	$N_h = 8 - 13$
		$0.15 \pm 0.01$ (0.15)	$N_h = 14 - 19$
		$0.23 \pm 0.05$ (0.17)	$N_h \geq 28$

\* расчеты по ME

ния и энергии ядра-снаряда в области  $P_0 = (1 - 15)$  А ГэВ/с. Зарегистрирована эмиссия фрагментов сталкивающихся ядер в противоположные стороны в азимутальной плоскости. Эти тенденции не описываются ни моделированием, используемым "смешанные" события, ни расчетами по каскадно-испарительной модели и находятся в качественном согласии с предсказаниями гидродинамических расчетов для других ядер и энергий.

Ненулевые углы потока частиц указывают на то, что в этих событиях плоскость реакции определяется направлениями движения ядра-снаряда и потока спектаторных фрагментов ядра-снаряда.

Определение плоскости реакции в непериферических ядро-ядерных столкновениях реализовано в следующем §3.2.

Эмиссия фрагментов сталкивающихся ядер здесь обсуждается в отношении к плоскости реакции, построенной по "рецепту", предложенному Даниелевич и Одиниц в [16].

Плоскость реакции определяется направлением движения налетающего ядра и вектора  $\vec{K}$ , который вычислялся для каждого фрагмента ядра-снаряда (i) в отдельности по формуле

Табл. 3: Средние значения  $\langle P_R \rangle$  фрагментов ядра-снаряда в сравнении с расчетом по смешанным событиям (ME) и значения параметра  $\lambda$ , полученного при фитировании  $C(\psi)$ -распределения функцией (6) в ядерных взаимодействиях  $^{84}\text{Kr}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}$  и  $^{197}\text{Au}$  при  $P_0$  от 1,55 до 14,6 А ГэВ/с в эмульсии.

$P_0$ [А ГэВ/с]	Ядро-снаряд	$\langle P_R \rangle_{EXP}$ [А МэВ/с]	$\langle P_R \rangle_{ME}$ [А МэВ/с]	$\lambda$
1,55	$^{84}\text{Kr}$	$23,6 \pm 2,3$	0,6	$0,71 \pm 0,06$
4,1	$^{22}\text{Ne}$	$16,1 \pm 2,6$	0,8	$0,53 \pm 0,06$
4,5	$^{16}\text{O}$	$12,8 \pm 2,8$	-0,7	$0,62 \pm 0,09$
4,5	$^{28}\text{Si}$	$6,1 \pm 2,3$	0,1	$0,39 \pm 0,10$
4,5	$^{32}\text{S}$	$18,4 \pm 2,1$	1,3	$0,54 \pm 0,07$
11,6	$^{197}\text{Au}$	$32,0 \pm 1,8$	-0,2	$0,62 \pm 0,03$
14,6	$^{28}\text{Si}$	$7,2 \pm 2,5$	0,5	$0,43 \pm 0,10$

$$\vec{R}_i = \sum_{j=1}^{N_{PF}} \omega_j A_j \vec{P}_{t,j}, i = 1, 2, \dots, N_{PF}, j \neq i. \quad (4)$$

Т.е.  $\vec{R}_i$  составлялся из поперечных импульсов ( $\vec{P}_{t,j}$ ) всех фрагментов ядра-снаряда в данном событии за исключением i-того фрагмента. Таким образом, исключались возможные автокорреляции вытекающие из проекции поперечного импульса ( $\vec{P}_t$ ) i-того фрагмента на самого себя.

Коэффициент  $\omega_j$  вводится с целью исключения фрагментов с большим поперечным импульсом. В нашем случае значения  $\omega_j$  равны единице, поскольку в определении плоскости реакции принимают участие только летящие вперед фрагменты-спектаторы ядра-снаряда.

Величина  $A_j$  есть массовое число фрагмента j. Поскольку в нашем эксперименте измерены только заряды фрагментов  $Z_j$ , мы предполагали, что  $A_j = 2Z_j$ .

Средние значения проекций поперечных импульсов фрагментов налетающего ядра в плоскости реакции приведены в табл. 3. для взаимодействий  $^{84}\text{Kr}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}$  и  $^{197}\text{Au}$  в фотоэмульсии при  $P_0 \approx (1 - 15)$  А ГэВ/с. Они равны нулю, если имеет место случайное распределение  $\vec{P}_T$  изучаемых частиц по азимутальному углу, и не равны нулю, если существует отклонение потока энергии от ну-



левого направления. Это, т.н., отскок фрагментов налетающего ядра ("bounce-off effect").

Наши данные показывают, что зарегистрирован эффект отскока фрагментов ядра-снаряда в проекции на плоскость реакции. Величина эффекта при этом практически не зависит от массы ядра-снаряда в области первичных импульсов  $P_0 \approx (1 - 15) \text{ А ГэВ/с}$ .

Более сильное проявление эффекта отскока фрагментов ядра-снаряда видно в событиях с меньшим параметром удара.

Была оценена точность в определении плоскости реакции, которая равна примерно  $25^\circ$  при дубненской энергии.

Зарегистрирована эмиссия фрагментов налетающих ядер в направлении вектора плоскости реакции и фрагментов ядер-мишеней в противоположных направлениях.

Эффект противоиспускания фрагментов сталкивающихся ядер в азимутальной плоскости соударения усиливается при переходе от квази-периферических к более центральным ядерным взаимодействиям с (Ag, Br).

В угловых распределениях по углу  $\theta$  медленных фрагментов ядра-мишени в  $^{22}\text{Ne} + (\text{Ag}, \text{Br})$ - взаимодействиях при  $P_0 = 4,1 \text{ А ГэВ/с}$  имеет место максимум, соответствующий их "боковому" выбросу.

Отмеченный эффект сопровождается увеличением остаточного пробега медленных фрагментов ядра-мишени (т.е. их энергии), испущенных в направлении бокового выброса.

В §3.3 рассматриваются азимутальные корреляционные функции для спектаторных фрагментов налетающих ядер в непериферических ядерных взаимодействиях в фотоэмульсии при  $P_0 = (1 - 200) \text{ А ГэВ/с}$ . Методология анализа описана в §3.3.1.

Азимутальная корреляционная функция определяется следующим образом [17]:

$$C(\psi) = P_{\text{corr}}(\psi)/P_{\text{uncorr}}(\psi), \quad (5)$$

где  $P_{\text{corr}}(\psi)$  - распределение парного азимутального угла  $\psi$  коррелированных пар частиц из одного события и  $P_{\text{uncorr}}(\psi)$  - распределение некоррелированных пар частиц полученных из смешанных событий (ME - "mixed events").

Распределение вероятности  $P(\psi)$  для угла  $\psi$  между поперечными импульсами двух коррелированных частиц дается формулой

$$P(\psi) = A^2(1 + 0,5\lambda^2 \cos \psi), \quad (6)$$

где  $A$  - постоянный нормировочный фактор и  $\lambda$  является мерой азимутальной асимметрии наблюдаемой в экспериментальных данных. Чем величина  $\lambda$  больше, тем коллективный поток частиц сильнее.

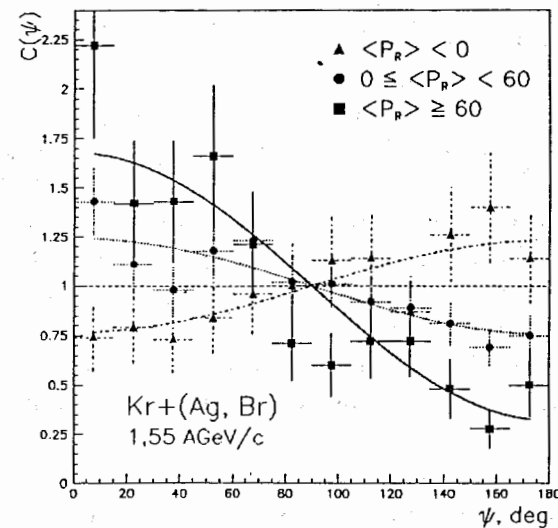


Рис. 1: Зависимости  $C(\psi)$  от  $\psi$  для фрагментов ядра-снаряда в  $^{84}\text{Kr} + (\text{Ag}, \text{Br})$  - соударениях в эмульсии в разных группах событий по  $\langle P_R \rangle$ , где  $P_R$  - проекция поперечного импульса фрагмента в плоскости реакции, кривые - фитирование  $C(\psi)$  по (6).

Некоррелированные пары частиц подобраны случайным образом из разных событий с одинаковой множественностью.

Если величина  $C(\psi) > 1$  для малых углов  $\psi$  и  $C(\psi) < 1$  для больших  $\psi$ , то это является проявлением коллективного потока.

В случае отсутствия коллективного потока распределение  $C(\psi)$  должно быть равномерным. Величина наблюдаемого потока определяется параметром  $\lambda$ , полученным в результате фитирования экспериментальных данных функцией (6). В случае отсутствия коллективного потока величина  $\lambda = 0$ .

В §3.3.2-§3.3.4 обсуждаются результаты анализа зависимостей азимутальных корреляционных функций  $C(\psi)$  от  $\psi$  для фрагментов ядер-

снарядов из  $^{84}\text{Kr}$ -,  $^{32}\text{S}$ - и  $^{197}\text{Au}$  - соударений в эмульсии с ядрами ( $\text{Ag}$ ,  $\text{Br}$ ) при  $P_0 = 1,55, 4,5$  и  $11,6$  А ГэВ/с соответственно.

Значения параметров  $\lambda$  приведены в таблице 3 для разных комбинаций ядер-снарядов и их энергий. В случае взаимодействий легких налетающих ядер при  $P_0 = (4, 1 - 4, 5)$  А ГэВ/с однозарядные спектаторные фрагменты ядра-снаряда были включены в анализ.

Видно, что во всех случаях значения параметра  $\lambda$ , полученные при фитировании зависимостей  $C(\psi)$  от  $\psi$ , положительны и не зависят от энергии и массы ядра-снаряда. Таким образом, зарегистрирован сигнал эффекта отскока фрагментов ядра-снаряда и без конструкции плоскости реакции.

На рис. 1 проведено сравнение этих результатов с методом анализа поперечных импульсов частиц в плоскости реакции (§3).

Получено совпадение результатов этих двух разных подходов обработки экспериментальных данных.

Было также показано, что эффект коллективного потока фрагментов налетающего ядра усиливается при уменьшении прицельного параметра.

Основные выводы, полученные при изучении коллективных эффектов методом азимутальных корреляционных функций приведены в §3.3.5.

В четвертой главе описаны экспериментальные результаты по исследованию коллективных эффектов методом Фурье разложения азимутальных угловых спектров в отношении плоскости реакции.

В §4.1 приведены основные сведения о методе анализа. В каждом отдельном событии конструируется плоскость реакции и вычисляются азимутальные углы  $\varphi$  изучаемых частиц, учитывая вектор плоскости реакции.

Азимутальное распределение углов  $\varphi$  затем фитируется следующей функцией

$$F(\varphi) = \frac{dN}{d\varphi} = c[1 + 2V_1 \cos \varphi + 2V_2 \cos 2\varphi]. \quad (7)$$

Член  $\cos(\varphi)$  чувствителен к выходу частиц внутри плоскости реакции. Параметер  $V_1$ , так называемый "directed flow", характеризует направленный поток в отношении вектора плоскости реакции.

С другой стороны член  $\cos 2\varphi$  чувствителен к эмиссии частиц в

Табл. 4: Параметры  $V_1$  и  $V_2$  полученные при фитировании азимутальных угловых спектров фрагментов-спектаторов сталкивающихся ядер функцией (7) в ядерных взаимодействиях  $^{84}\text{Kr}$ -,  $^{32}\text{S}$  и  $^{197}\text{Au}$  в эмульсии при  $P_0$  от 1,55 до 11,6 А ГэВ/с.

Тип взаимодействия	$V_1$	$V_2$	$\chi^2/NDF$
$^{84}\text{Kr}+(\text{Ag},\text{Br}), 1,55 \text{ А ГэВ/с}$			
Фрагменты-спектаторы			
ядра-снаряда	$0,227 \pm 0,022$	$-0,006 \pm 0,023$	1,01
ядра-мишени	$-0,213 \pm 0,018$	$0,016 \pm 0,018$	1,82
$^{32}\text{S}+(\text{Ag},\text{Br}), 4,5 \text{ А ГэВ/с}$			
Фрагменты-спектаторы			
ядра-снаряда	$0,165 \pm 0,019$	$0,024 \pm 0,019$	1,24
ядра-мишени	$-0,062 \pm 0,016$	$-0,017 \pm 0,016$	0,82
$^{197}\text{Au}+(\text{Ag},\text{Br}), 11,6 \text{ А ГэВ/с}$			
Фрагменты-спектаторы			
ядра-снаряда	$0,222 \pm 0,013$	$0,027 \pm 0,013$	1,38
ядра-мишени	$-0,082 \pm 0,013$	$0,006 \pm 0,013$	0,76

направлении, перпендикулярном к вектору плоскости реакции. Соответствующий параметер  $V_2$ , так называемый "elliptic flow", является мерой потока частиц в упомянутых направлениях.

В §4.2 приведены результаты исследования азимутальных угловых распределений фрагментов-спектаторов налетающих ядер в области  $P_0 \approx (1 - 11)$  А ГэВ/с.

Плоскость реакции при этом сконструирована из фрагментов ядра-снаряда методом, описанным в §3.3.

Суммарные данные о параметрах  $V_1$  и  $V_2$ , полученные путем фитирования экспериментальных угловых спектров фрагментов-спектаторов сталкивающихся ядер функцией (7) даны в табл. 4 для трех разных значений  $P_0$ .

Хорошо видно проявление коллективного эффекта направленного потока спектаторной ядерной материи - эмиссию фрагментов ядра-снаряда ( $c Z \geq 2$ ) в направлении вектора плоскости реакции ( $V_1 > 0$ ) и самых медленных фрагментов ядра-мишени (b-частиц) в противоположном направлении ( $V_1 < 0$ ).

Результаты поиска эллиптических потоков частиц-участников соударения приведены в §4.3.

Изучена эмиссия вторичных заряженных частиц - участников соударения в неупругих взаимодействиях ядер  $^{16}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{84}\text{Kr}$ ,  $^{197}\text{Au}$  и  $^{208}\text{Pb}$  с ( $\text{Ag}$ ,  $\text{Br}$ ) при  $P_0$  от 1 до 200 А ГэВ/с единым фотоэмульсион-

онным методом и проведен систематический Фурье анализ их азимутальных угловых спектров.

Во взаимодействиях  $^{84}\text{Kr}$  с ядрами ( $\text{Ag}, \text{Br}$ ) при 1,55 А ГэВ/с зарегистрирован эффект выдавливания ("squeeze-out") релятивистских s-частиц с квазибыстроходами около центральной  $\eta_{\text{CM}}$ , где  $\eta_{\text{CM}}$  - квазибыстрохода  $\text{CM}$  системы в лабораторной системе. Это - т.н. отрицательный эллиптический поток участников вне плоскости реакции ("out-of-plane elliptic flow").

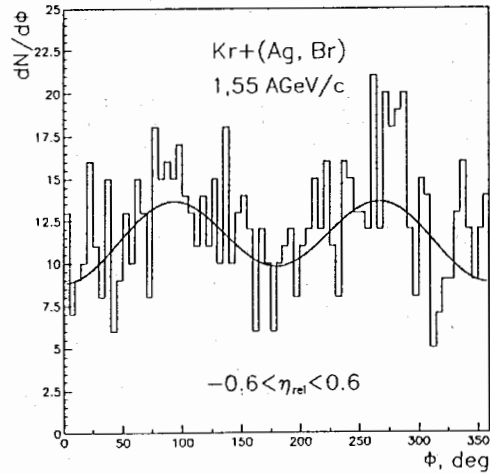


Рис. 2: Распределение азимутальных углов s-частиц с  $-0,6 < \eta_{\text{rel}} < 0,6$  относительно плоскости реакции в  $^{84}\text{Kr} + (\text{Ag}, \text{Br})$  - столкновениях при  $P_0 = 1,55$  А ГэВ/с, гистограмма - эксперимент, кривая - фитирование по (7).

Соответствующее азимутальное угловое распределение s-частиц с учетом вектора плоскости реакции приведено на рис. 2. для  $^{84}\text{Kr} + (\text{Ag}, \text{Br})$  - взаимодействий при 1,55 А ГэВ/с.

Хорошо видно двухгорбую структуру, указывающую на преимущественную эмиссию релятивистских частиц перпендикулярно к плоскости реакции.

Относительная квазибыстрохода  $\eta_{\text{rel}}$  при этом определена соотношением  $\eta_{\text{rel}} = (\eta - \eta_{\text{CM}})/\eta_{\text{CM}}$ , где  $\eta$  - квазибыстрохода измеренной частицы в лабораторной системе.

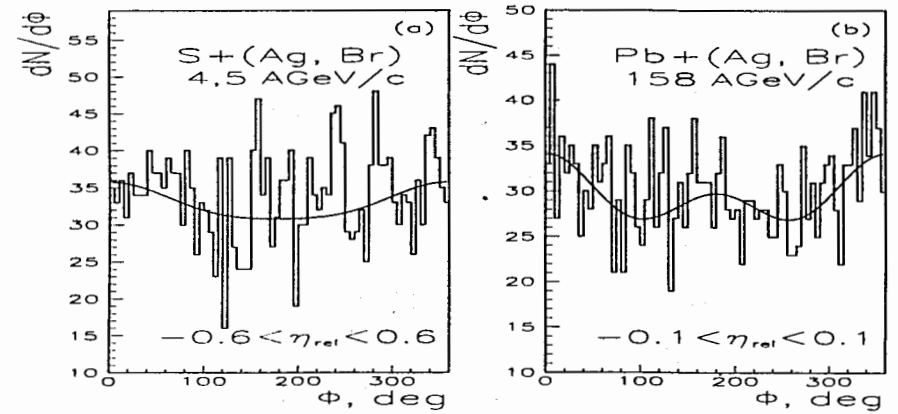


Рис. 3: Распределения азимутальных углов s-частиц (с  $\eta$  около  $\eta_{\text{CM}}$ ) относительно плоскости реакции в  $^{32}\text{S} + (\text{Ag}, \text{Br})$  - столкновениях при  $P_0 = 4,5$  А ГэВ/с (а) и  $^{208}\text{Pb} + (\text{Ag}, \text{Br})$  - столкновениях при  $P_0 = 158$  А ГэВ/с, гистограмма - эксперимент, кривая - фитирование по (7).

В ядерных столкновениях в фотоэмульсии при энергиях Дубны и Брукхейвена  $\approx (4 - 11)$  А ГэВ/с не обнаружен сигнал коллективного поведения в эмиссии релятивистских частиц - участников соударения с квазибыстроходами около  $\eta_{\text{CM}}$  (рис. 3а).

В ультра-релятивистских  $^{208}\text{Pb} + (\text{Ag}, \text{Br})$  - взаимодействиях при 158 А ГэВ/с получено указание на эмиссию ядерной материи - участников соударения (s-частиц с  $\eta \approx \eta_{\text{CM}}$ ) внутри плоскости реакции в направлении перпендикулярном к вектору плоскости реакции (рис. 3б). Это, т.н., положительный эллиптический поток частиц ("in-plane elliptic flow").

Получены уникальные данные (рис. 4) об энергетической зависимости параметра  $V_2$  азимутальных угловых спектров релятивистских частиц - участников столкновения с квазибыстроходами около  $\eta_{\text{CM}}$ , измеренных единым фотоэмульсионным методом для импульсов ядерснарядов от 1 до 160 А ГэВ/с. Эллиптический поток частиц - участников соударения меняет свой знак при дубненских энергиях с "минуса" для низших энергий на "плюс" для больших. Это может служить указанием на возможный фазовый переход адронной материи в состо-

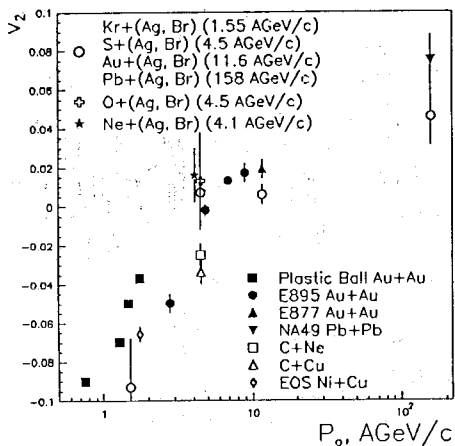


Рис. 4: Зависимость параметра  $V_2$  от импульса  $P_0$  ядра-снаряда и сравнение с данными других экспериментов.

яние кварк-глюонной плазмы.

В §4.4 исследуются направленные потоки частиц - участников соударения. Впервые единым методом в ядерных взаимодействиях с  $(Ag, Br)$  при  $P_0 \sim (1 - 11)$  А ГэВ/с зарегистрирован направленный поток частиц - участников соударения, т.н., боковой выброс ("side-splash"). Конкретно, измерена эмиссия релятивистских  $s$ -частиц с квазибыстрогами, близкими к спекторным фрагментам ядра-снаряда преимущественно в направлении вектора плоскости реакции ("positive directed flow"), и быстрых фрагментов ядра-мишени ( $g$ -частиц) в противоположном направлении ("negative directed flow").

В §4.5 приведены основные результаты, полученные при Фурье анализе азимутальных угловых спектров разных типов вторичных частиц относительно плоскости реакции.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. Впервые измерены характеристики неупругих взаимодействий  $^{84}Kr$  и  $^{32}S$  с ядрами фотоэмульсии при импульсах 1,55 и 4,5 А ГэВ/с, соответственно. Показано, что множественности фрагментов ядра-снаряда, релятивистских  $s$ -частиц и быстрых фрагментов ядра-мишени сильно зависят от степени расщепления ядра-мишени и от массы первичного ядра. Поведение медленных фрагментов ядра-мишени "консервативно".
2. Проведено исследование характеристик ядро-ядерных взаимодействий при релятивистских энергиях в зависимости от массы и энергии ядра-снаряда и от прицельного параметра столкновения с использованием уникального материала, полученного при участии автора диссертации с помощью фотоэмульсионного детектора. При этом были использованы пучки первичных ядер:  $^1H$ ,  $^{12}C$ ,  $^{16}O$ ,  $^{24}Mg$ ,  $^{28}Si$  и  $^{32}S$  с импульсом 4,5 А ГэВ/с и  $^{22}Ne$  с импульсом 4,1 А ГэВ/с на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ (Дубна),  $^{84}Kr$  с импульсом 1,55 А ГэВ/с на ускорителе SIS (Дармштадт),  $^{28}Si$  и  $^{197}Au$  с импульсами 14,6 и 11,6 А ГэВ/с на АГС (BNL) и, наконец,  $^{208}Pb$  и  $^{32}S$  с импульсами 158 и 200 А ГэВ/с на SPS (ЦЕРН).
3. На основе анализа множественностей и угловых спектров вторичных заряженных частиц, образованных в указанных в пункте 2 взаимодействиях, обнаружены следующие закономерности:
  - Распределения множественностей быстрых фрагментов ядра-мишени в ядро-ядерных столкновениях при дубненских энергиях хорошо описываются простой аналитической моделью, где в качестве исходной информации используется распределение  $g$ -частиц, возникающих в реакциях вызванных протонами.
  - Коллимация  $g$ -частиц вперед возрастает с уменьшением импульса ядра-снаряда при данном  $A_p$  и с увеличением массы ядра-снаряда при данном  $P_0$ .
  - В угловых спектрах медленных фрагментов ядра-мишени ( $b$ -частиц) обнаружены широкие максимумы, более отчетливо проявляющиеся в центральных соударениях ядер-снарядов с  $(Ag, Br)$ .

4. Проведено систематическое экспериментальное исследование корреляций по азимутальным углам фрагментов сталкивающихся ядер и рожденных частиц в широкой области масс и энергий ядер-снарядов. При этом обнаружены азимутальная асимметрия в эмиссии всех типов частиц и тенденция к их противоиспусканию в поперечной плоскости.
5. В результате анализа внутри- и междугрупповых корреляций вторичных заряженных частиц разных сортов установлено, что они увеличиваются с ростом числа нуклонов-участников соударения. При этом усиливается и их угловая зависимость.
6. Впервые измерены неупругие взаимодействия ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{24}\text{Mg}$  с ядрами Рb при  $P_0=4,5$  А ГэВ/с и изучены азимутальные корреляции между разными продуктами этих реакций. Получено ненулевое значение коэффициента азимутальной коллинеарности для s-частиц.
7. Проведено детальное исследование потока фрагментов сталкивающихся ядер в непериферических соударениях релятивистских ядер с (Ag, Br) в эмульсии методом результирующих векторов. Показано, что углы потока фрагментов ядра-снаряда ненулевые и увеличиваются с ростом энергии первичного ядра и степени центральности столкновения в области  $P_0 = (1 - 15)$  А ГэВ/с.
8. Впервые была целенаправленно и систематически сконструирована плоскость реакции в непериферических взаимодействиях  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{84}\text{Kr}$  и  $^{197}\text{Au}$  с ядрами (Ag, Br) при  $P_0 = (1 - 15)$  А ГэВ/с и проведен анализ поперечных импульсов фрагментов сталкивающихся ядер в плоскости реакции. При этом зарегистрированы отскок фрагментов ядра-снаряда и боковой выплеск фрагментов-мишени вместе с их эмиссией в противоположных направлениях в азимутальной плоскости. Оба эффекта усиливаются при уменьшении прицельного параметра.
9. Впервые проанализирована эмиссия фрагментов налетающего ядра в непериферических ядерных взаимодействиях с (Ag, Br) при энергиях ускорителей Дармштадта, Дубны и Брукхейвена методом азимутальных корреляционных функций без конструкции

плоскости реакции. Зарегистрирован сигнал коллективного потока фрагментов ядра-снаряда и показано совпадение результатов анализа экспериментальных данных двумя разными подходами - с конструкцией плоскости реакции и без ней.

10. Впервые выполнено детальное сравнение полученных характеристик ядро-ядерных взаимодействий по множественностям, угловым спектрам и их корреляциям с модельными расчетами по каскадно-испарительной модели и с расчетами по, т.н., смешанным событиям. Оба варианта расчетов не воспроизводят полученные нами данные по изучению коллективного поведения ядерного вещества и свидетельствуют о коллективных потоках фрагментов сталкивающихся ядер и рожденных частиц.
11. Проведен систематический Фурье анализ азимутальных угловых спектров вторичных заряженных частиц-участников соударения, измеренных в ядерных взаимодействиях с (Ag, Br) для разных ядер-снарядов и их энергий. При этом получены уникальные данные об энергетической зависимости параметра  $V_2$  азимутальных угловых распределений релятивистских частиц-участников столкновения, измеренных единым эмульсионным методом для энергий ядер-снарядов от 1 до 160 А ГэВ. Эллиптический поток частиц-участников соударения меняет свой знак при дубненских энергиях с "минуса" для низких энергий (т.н. эффект выдавливания) на "плюс" для ультрарелятивистских энергий (т.н. "положительный" эллиптический поток в плоскости реакции). Это может служить указанием на проявление возможного фазового перехода адронной материи в состояние кварк-глюонной плазмы.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

A1. Банник Б.П., Вокал С., Толстов К.Д., Шабратова Г.С. "Исследование столкновений релятивистских ядер на синхрофазотроне." Труды Сов.по иссл.в обл.рел.яд.физ., Дубна, ОИЯИ, Д2-82-568, 1982, s.78-82.

A2. Вокал С., Шумбера М. "Угловые спектры вторичных частиц в  $p$ - и  $C$ -ядерных взаимодействиях при  $P_0 = 4.5$  А ГэВ/с." Препринт ОИЯИ, 1-83-389, Дубна, 1983, с.1-12. Ядерная физика, т.39, вып.6, 1984, с.1474-1481.

A3. Вокал С., Карабова М., Мухторов А., Тогоо Р., Толстов К.Д., Тучек Й., Шумбера М. "Полное разрушение ядер свинца ядрами  $^{12}C$  при импульсе 4, 5 А ГэВ/с." Препринт ОИЯИ, P1-84-552, Дубна, 1984.

A4. Karabová M., Muchtorov A., Šumbera M., Togoo R., Tolstov K.D., Tuček J., Vokál S. "Do we see a bounce-off effect in relativistic nucleus-nucleus collisions?" PANIC-84, Heidelberg, 30.7-3.8.1984, Books of Abstracts, vol.II., p.J27.

A5. Karabová M., Síleš E., Vokál S., Šumbera M., Tuček J. "Azimutálne korelácie v centrálnych zrážkach vysokoenergetických jadier." Zborník 8.konf.čs.fyzikov, 26.-30.8.1985, Bratislava, 1.časť, s.36-37.

A6. Андреева Н.П., ..., Вокал С., ... "Корреляционные явления при фрагментации релятивистского ядра неона-22 с импульсом 90 ГэВ/с и динамика этого процесса." Препринт ОИЯИ, P1-87-239, Дубна, 1987, с.1-10. Ядерная физика, т.47, 1988, с.942-958.

A7. Краснов С.А., ..., Вокал С., ... "Изучение двухчастичных корреляций в неупругих взаимодействиях ядер неона-22 при  $p = 4, 1$  ГэВ/с /нуклон с ядрами эмульсии." Препринт ОИЯИ, P1-87-348, Дубна, 1987, с.1-16. Ядерная физика, т.47, 1988, с.1309-1319.

A8. El-Naghy A., ..., Vokál S., ... "Particularities of neon-22 nuclei inelastic interactions with emulsion at 4.1 GeV/c." Preprint JINR, E1-87-472, Dubna, 1987, p.1-10.

A9. Bannik V.P., ..., Vokál S., ... "Observation of a Collective Flow in

$^{22}Ne$  Collisions with Ag(Br) Emulsion Nuclei at 4.1 AGeV/c."

Препринт ОИЯИ, P1-87-546, Дубна, 1987.  
Z.Phys.A.-Atomic Nuclei, vol.329, 1988, p.341-347.

A10. Bannik V.P., ..., Vokál S., ... "Some peculiarities of sideward flow of particles in  $^{22}Ne$  collisions with emulsion nuclei at 4.1 AGeV/c." Препринт ОИЯИ, P1-87-631, Дубна, 1987.  
J.Phys.G: Nucl.Phys., vol.14, 1988, p.949-960.

A11. Andreeva N.P., ..., Vokál S., ... "Exp. study of nuclear flow in  $^{22}Ne + (Ag, Br)$  inelastic interactions at 4.1 A GeV/c." Acta Physica Slovaca, vol.38, No.2, 1988, p.65-71.

A12. Краснов С.А., Вокал С., ... "Исследование полного разрушения ядер свинца ядрами магния-24 при импульсе 4, 5 А ГэВ/с." Препринт ОИЯИ, P1-88-389, Дубна, 1988, с.1-11.

A13. Shabratova G.S., Šumbera M., Vokál S. "Search for Coll.Effects in  $^{22}Ne + (Ag, Br)$  and  $^{24}Mg + Pb$  Central Coll.at 3.3 and 3.6 A GeV." Proc.Int.Workshop on Gross Prop.of Nuclei and Exc., XVII, Hirschegg, 1989, p.34.

A14. Вокал С., Лескин В.А., Толстов К.Д., Шабратова Г.С. "Спектры  $\pi$ -мезонов и протонов в центральных и периферических столкновениях  $p$ ,  $^{12}C$ ,  $^{22}Ne$  с ядрами фотоэмульсии при 4, 5 А ГэВ/с." Сообщения ОИЯИ, P1-88-215, Дубна, 1988, с.1-13. Ядерная физика, т.50, 1989, с.1046-1054. Труды IX.Межд.сем.по пробл.физ.выс.эн., т.2, Дубна, 1988, с.208-216.

A15. Hegab M.K., Sherif M.M., Krasnov S.A., Vokál S. "Grey particle distributions in high energy nucleus - nucleus collisions." JINR Rapid Communications No.7[46]-90, p.36-45, 1990.

A16. Vokál S. "Search for collective effects in collisions of C, Ne, Mg and Si nuclei with emulsion at 4.1-4.5 AGeV/c." Proc. of the Xth Int.Sem.on High En.Phys.Problems, Relat.Nucl.Phys. and Quantum Chromodyn., Dubna, 24.-29 Sept., 1990, Singapore, 1991, p.420-424.

A17. Vokál S. "Experimental study of nuclear interactions in the Dubna energy domain observed in a high-angular resolution emulsion detector." Proceedings of the XXIth Int.Symposium on Multiparticle Dynamics.

Wuhan, 23.-27 Sept., 1991, Singapore, 1992, p.611-614.

A18. Vokál S. "Oxygen collisions in emulsion at 3, 7 A GeV." Proceedings of the XIth EMU01 Collaboration Meeting, Dubna, May 1992, Dubna, 1992, p.275-287.

A19. Adamovich M.I.,..., Vokál S.,...(EMU01 coll..) "Silicon induced interactions with emulsion at 3.7 and 14.6 A GeV." Preprint E1-92-569, Dubna, 1992, p.1-13.

A20. El-Naghy A., ..., Vokál S., ... "Correlations in inelastic collisions of relativistic nuclei with emulsion at (4.1 – 4.5) A GeV/c." Internal Report IC/93/149, Trieste, June 1993, p.1-27.

A21. Vokál S. and the EMU01 Collaboration "Interactions of 14.6 A GeV/c silicon nuclei in nuclear emulsion." Proc.of the Hadron Structure '93, B.Štiavnica, Sept. 5-10, 1993, p.93-98.

A22. Krasnov S.A., ..., Vokál S., ... "Multiplicities in  $^{84}\text{Kr}$  interactions in emulsion at 800 – 950 MeV/nucleon." Czech. Journal of Physics, vol.46, 1996, No.6, p.531-540.

A23. Vokál S.,...(EMU01 coll..) "Evidence for bounce - off in  $\text{Au}$  induced collisions in emulsion at 11.6 A GeV/c." Proc. of the Hadron Structure '96, Stará Lesná, Feb. 12-16, 1996, p.353-357.

A24. Adamovich M.I., ..., Vokál S., ... "Collective motion in  $^{84}\text{Kr}$  induced by interactions with  $\text{Ag}(\text{Br})$  nuclei at 0.95 GeV per nucleon." Physics of Atomic Nuclei, vol.60, No.9, 1997, p.1580-1585.

A25. M.I.Adamovich, ..., S.Vokál, ...(EMU01 coll..) "Bounce - off in  $^{197}\text{Au}$  induced collisions with  $\text{Ag}(\text{Br})$  nuclei at 11.6 A GeV/c." Eur. Phys. J, vol. A 2, 1998, p.61-67

A26. Kravčáková A., Vokál S. and the Kr Collaboration "Azimuthal correlation functions as a probe for collective motion." Czech.Journal of Physics, vol.48, 1998, Suppl. S1, p.127-132.

A27. Kravčáková A., Vokál S. "Azimut. asym.of part.prod.in inter. of  $^{84}\text{Kr}$  with  $\text{Ag}(\text{Br})$  nuclei at 0.95 GeV per nucleon." Proc. of Scientific Conf, TU Košice, 1999, p.216-221.

A28. Kravčáková A., Vokál S., Dirner A. "Collective effects in relativis-

tic nuclear collisions observed by emulsion detector." Proc. Of Scientific Conf, TU Košice, 1999, p.237-241.

A29. Just L., Kravčáková A., Vokál S. "Azimutálne korelácie sek. častíc vo vysokoenergetických jadrových zrážkach." Zborník 13.Konf. slov. a českých fyzikov, Zvolen, 23.-26.8.1999, p.75-77.

A30. Adamovich M.I.,..., Vokál S., ... (Kr collaboration) "Flow effects in  $^{84}\text{Kr}$  induced collisions in emulsion at 0.95 GeV per nucleon." The European Phys. Journal A 6 (1999) p.427-430.

A31. Kravčáková A., Lojan J., Vokál S. "Sekundárne častice v jadrových interakciách  $^{32}\text{S}$  vo fotoemulzii pri energii 3, 7 GeV na nukleón." Zborník 13.Konf. slov. a českých fyzikov, Zvolen, 23.-26.8.1999, p.84-86.

A32. Just L., Kravčáková A., Vokál S., Vrláková J., Síleš E. "Interakcie jadier síry o energiách 3, 7 a 200 AGeV s jadrami fotoemulzie." Zborník 13.Konf. slov. a českých fyzikov, Zvolen, 23.-26.8.1999, p.78-80.

A33. Kravčáková A., Vokál S. "Uhlové spektrá sek.častíc v int.jadier  $^{84}\text{Kr}$  v emulzii pri en. 0, 8 – 0, 95 GeV na nukleón." Zborník 13.Konf. slov. a českých fyzikov, Zvolen, 23.-26.8.1999, p.81-83.

A34. Adamovich M.I.,..., Vokál S.,... "Azimuthal correlations of secondary particles in  $^{32}\text{S}$  induced int. with  $\text{Ag}(\text{Br})$  nuclei at 4.5 GeV/nucleon." Particles and Nuclei Letters, No.4[101]-2000, p.75-82.

A35. Vokál S. "Search for flow effects in relativistic heavy ion collisions with emulsion nuclei." Talk at Int.Conference "RNP 2000", Relativistic Nuclear Physics:From Hundreds MeV to TeV, Stará Lesná, 26.6.-1.7.2000, accept.for publication.

A36. Just L., Kravčáková A., Vokál S., Vrláková J., Síleš E. "Štúdium uhlových rozdelení relativistických fragmentov jadier síry vo fotoemulzii." Zborník príspevkov, 11.Konf. slov. fyzikov, Zvolen, 4.-6.9.2000, p.34.

A37. Kravčáková A., Vokál S. and the EMU01 Collaboration "Collective flow in nuclear collisions with  $\text{Ag}(\text{Br})$  in emulsion." Talk at XV. ISHEPP, Dubna, Sept. 25-29, 2000, accepted for publication.

## Литература

- [1] Балдин А.М. // ЭЧАЯ. – 1977. – т.8, №3. – с.429-477.
- [2] Satz. H. // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. – 1985. – vol.35. – p.245.
- [3] Балдин А.М. //ЯФ.– том 20. – 1974 –с. 1201 – 1213.
- [4] Kovalenko A.D. // Proceedings, High Energy problems – vol. 2 – Dubna, JINR – 1986 – p. 324 – 333.
- [5] Belenkij S.Z, Landau L.D. // Nuovo Cimento Suppl. – 1956. – vol.3. – p.15.
- [6] Glassgold A.E., Heckrotte W., Watson K.M. // Ann. Phys. – 1959. – vol.6. – p.1.
- [7] Scheid W., Muller H., Greiner W. // Phys. Rev. Lett. – 1974. – vol.32. – p.741.
- [8] Stocker H., Maruhn J.A., Greiner W. // Phys. Rev. Lett. – 1980. – vol.44. – p.725.
- [9] Csernai L.P. et al. // Phys. Rev. – 1982. – vol.C25. – p.2482.
- [10] Reinhardt R.E. et al. // Phys. Rev. Lett. – 1984. – vol.53. – p.763.
- [11] Gustafsson H.A. et al. // Phys. Rev. Lett. – 1984. – vol.52. – p.1590.
- [12] Buchwald G. et al. // Phys. Lett. – 1984. – vol.52. – p.1594.
- [13] Азимов С.А., Чернов Г.М. // Статистические методы в физике высоких энергий – Ташкент, 1970.
- [14] Musulmanbekov G.J. // Proceedings of the 11th EMU01 Collaboration Meeting – Dubna – 1992. – p.288.
- [15] Heckman H.H., Karant Y.J., Friedlander E.M. // Phys. Rev. – 1986. – vol.C34. – p.1333.
- [16] Danielewicz P., Odyniec G. // Phys. Lett. – 1985. – vol.B157. – p.146.
- [17] Wang S. et al. // Phys. Rev. – 1991. – vol.C44. – p.1091.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 июня 2001 года.