

СВОЙСТВА ЯДЕРНОЙ МАТЕРИИ И ОБРАЗОВАНИЕ ФРАГМЕНТОВ НА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПУЧКАХ КОМПЛЕКСА НУКЛОТРОН/НИКА

Проект ФАЗА (в рамках темы 02-1-1087-2009/2020)

ФТЕ 6.6

*С.П. Авдеев¹, Х.У. Абрамян¹, А.С. Ботвина², З.А. Игамкулов¹, В. Карч¹,
В.В. Киракосян³, Л.В. Карнюшина¹, Э.М. Козулин³, А.Г. Литвиненко¹,
Е. Норбек⁴, В.Ф. Переседов¹, П.А. Рукояткин¹, В.И. Стегайлов⁵,
О.В. Стрекаловский³.*

¹⁾ ОИЯИ, ЛФВЭ, Дубна, Россия,

²⁾ Институт передовых исследований во Франкфурте на Майне, Франкфурт на Майне, Германия,

³⁾ ОИЯИ, ЛЯР, Дубна, Россия,

⁴⁾ Университет штата Айова, Айова, США,

⁵⁾ ОИЯИ, ЛЯП, Дубна, Россия.

Руководитель проекта:

Доктор физико-математических наук С.П. Авдеев

Заместитель руководителя проекта:

Доктор физико-математических наук А.Г. Литвиненко

ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТА В НОО _____

ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ _____ НОМЕР ДОКУМЕНТА _____

ДАТА НАЧАЛА ПРОЕКТА _____

ВВЕДЕНИЕ

Процесс множественной эмиссии фрагментов был открыт Якобсоном [1] с помощью фотоэмульсий, облученных пучком углерода (250 МэВ/нуклон на ускорителе Bevalac в Беркли. После этого появилась серия работ, где развивалась идея о связи множественной эмиссии фрагментов с ядерным фазовым переходом жидкость-газ [2-4]. Горячее ядро, расширяясь под действием теплового давления, попадает в спиноподальную область, которая ограничена жёсткостью ядра равной нулю: $\partial p/\partial V=0$ (Рис. 1). Горячее ядро распадается с испусканием нескольких фрагментов промежуточной массы (ФПМ), которые тяжелее альфа-частиц, но легче осколков деления. Таким образом, изучение процесса мультифрагментации даёт экспериментальную информацию о ядерной спиноподальной области. Распад с испусканием ФПМ трактуется как фазовый переход “жидкость-газ”, происходящий при температуре 5-7 МэВ. Открытие множественной эмиссии ФПМ вызвало огромный интерес в этой области исследований, как среди теоретиков, так и экспериментаторов. Для исследования процесса мультифрагментации были созданы многодетекторные 4 π -установки, такие как ALADIN [5,6] и FOPI [7] (GSI), INDRA [8] (GANIL), Miniball/Multics [9] (MSU), ISiS [10] (Bloomington, IN), EOS [11,12] (LBL Bevalac), ФАЗА [13,14] (ОИЯИ), NIMROD [15,16] (TAMU), FIASCO [17,18] (INFN). Ядерная мультифрагментация даёт уникальную экспериментальную информацию об уравнении состояния, а также о равновесных и неравновесных свойствах ядерной материи удалённой от своего обычного состояния [16,19].

Процесс взаимодействия проходит в три стадии. На первой стадии после испускания энергичных нуклонов и пионов образуется возбуждённое ядро-остаток. Этот шаг описывается моделью внутриядерного каскада (INC). Мы используем Дубненскую версию INC [20] для получения распределения ядер-остатков по зарядам, массам и энергиям возбуждения. На втором этапе реакции происходит расширение ядра-остатка за счёт теплового давления. Этот этап реакции описывается моделью расширяющегося излучающего источника (EES) [21]. Последняя стадия реакции описывается статистической моделью мультифрагментации (SMM) [22]. В этой модели вероятности различных каналов распада пропорциональны их статистическим весам. Кулоновская энергия системы определяется объёмом, испускающим фрагменты.

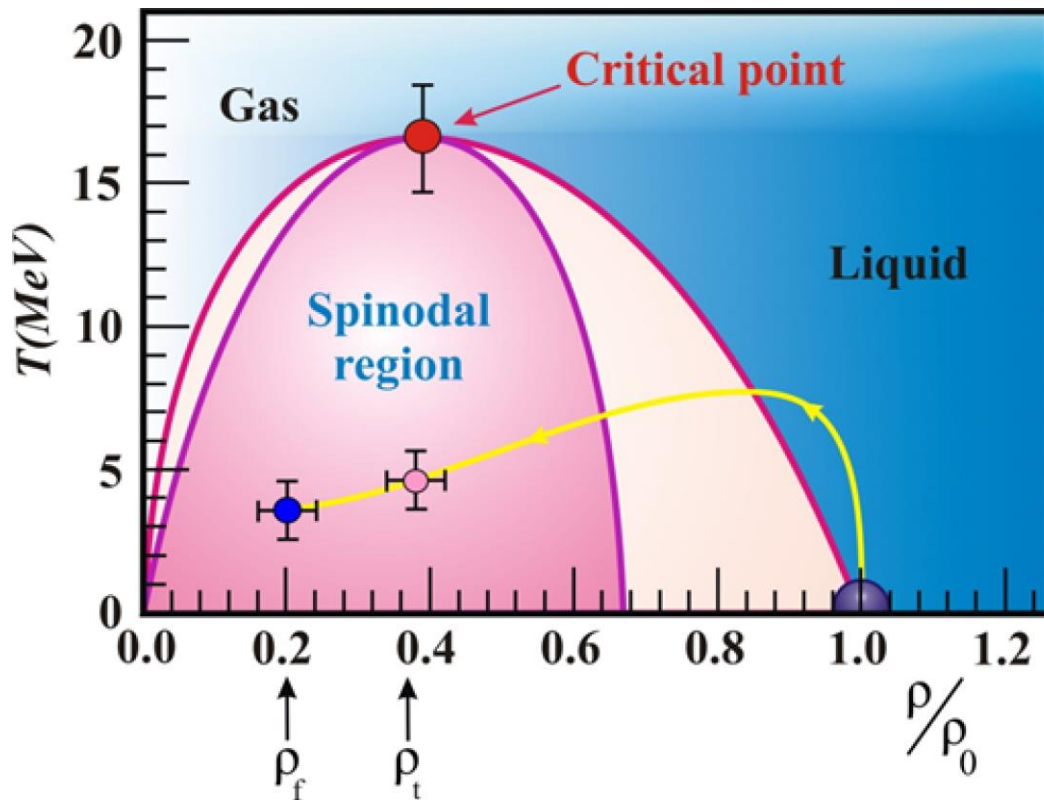


Рис.1. Спинодальная область ядерной фазовой диаграммы. Жёлтая линия показывает путь горячего спектатора мишени перед развалом. При ρ_t происходит образование фрагментов, при ρ_f они отделяются друг от друга (freeze-out density).

Эксперименты на релятивистских пучках ускорителя Нуклотрон на 4π установке ФАЗА позволяют получать экспериментальную информацию о спинодальном состоянии ядерной материи. Актуальность проблемы несомненна, поскольку речь идёт об экспериментальном изучении ядер с экстремальной энергией возбуждения (сравнимой с полной энергией связи ядра). В предлагаемом Проекте будут даны ответы на ключевые вопросы о временной шкале эмиссии фрагментов (последовательная эмиссия фрагментов или имеет место мгновенный развал горячего спектатора мишени), степени термализации системы перед развалом и радиальном потоке.

Фундаментом этого проекта является громадный методический и физический опыт, приобретенный коллективом в реализации программы исследования ядерной мультифрагментации на пучках релятивистских лёгких ионов в течение последнего десятилетия.

ФИЗИЧЕСКОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Целью Проекта является исследование свойств горячих ядер (с энергией возбуждения более 3 МэВ на нуклон), образующихся в соударениях лёгких релятивистских ионов с тяжёлыми мишенями. Горячее ядро, расширяясь за счёт теплового давления, попадает в область фазовой неустойчивости (спинодальная область). В результате флуктуаций плотности гомогенная ядерная система распадается на ансамбль, состоящий из фрагментов и нуклонов. Ставится задача *исследования пространственно-временных характеристик горячих ядер и коллективных потоков, образующихся в этих взаимодействиях.*

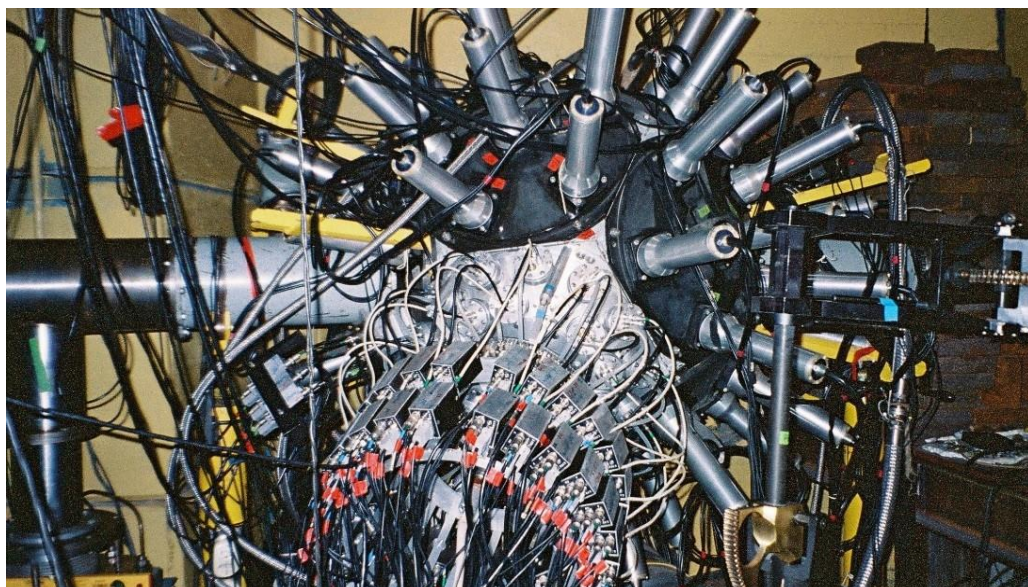


Рис. 2. Установка ФАЗА на пучке Нуклотрона. На переднем плане – электроника $dE-E$ телескопов. Алюминиевые цилиндры – корпуса детектора множественности фрагментов.

Экспериментальная методика базируется на 4 π -установке ФАЗА [13,14], включающей 30 $dE-E$ телескопов (ТС) для регистрации заряженных частиц. Каждый телескоп состоит из цилиндрической ионизационной камеры (dE) и Si(Au)-детектора для измерения полной энергии фрагмента. ТС позволяет идентифицировать заряд фрагментов Z_f и определять их кинетическую энергию. На Рис. 2 показана вся установка с комплектом телескопов на переднем плане. Мишень (золотая плёнка толщиной 1,5 мг/см²) расположена в центре вакуумной установки.

Основную часть полного телесного угла установки составляет детектор множественности фрагментов (ДМФ), который состоит из 58 счётчиков с плёночными (25 мг/см²) сцинтилляторами CsI(Tl). Назначение ДМФ – регистрировать фрагменты с $Z_f \geq 2$, определять их множественность и направление вылета из мишени. Сортировка событий по множественности позволяет «менять» среднюю энергию возбуждения фрагментирующего ядра. Кроме того, возможно измерение корреляционных сечений фрагментов, регистрируемых одновременно двумя ТС или ТС и ДМФ. Таким образом, может быть получена информация о временной шкале мультифрагментации. Это обусловлено тем, что форма корреляционной функции определяется размером и временем жизни источника. Рис. 3 показывает внутреннюю поверхность установки. Это многогранник, образованный двенадцатью правильными пятиугольниками и 60-ю неправильными шестиугольниками. Исходной фигурой для получения такого многогранника является пентагональный гексаконтаэдр Архимеда, у которого отсекаются пятиугольные вершины. Это отсечение делается таким образом, чтобы телесные углы из центра фигуры на все многоугольники были равны. Общий вид установки показан на Рис. 4. Основным конструктивным телом её является сварной додекаэдр. На десять его его граней через вакуумные уплотнения крепятся модули, несущие по шесть детекторов. На Рис. 3 видны две грани, с которых сняты модули. На двух модулях по оси пучка центральные детекторы заменены входными и выходными патрубками, которые опираются на стойки, несущие всю конструкцию. На этих двух модулях по пять детекторов. Для удобства обслуживания установки она может вращаться вокруг горизонтальной оси. Стойки крепятся к платформе, имеющей две степени свободы. На платформе укреплен вакуумно-газовый распределительный щит.

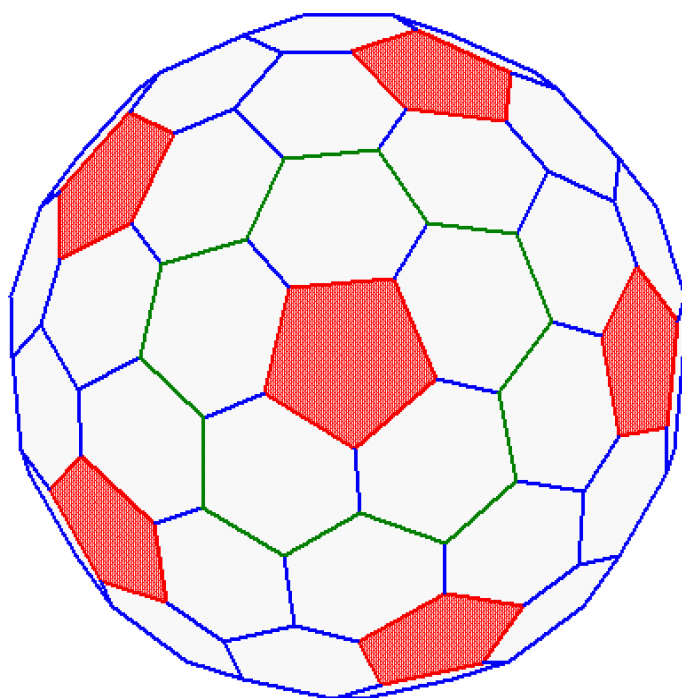


Рис. 3. Геометрия установки ФАЗА: усечённый пентагональный гексаконтаэдр, образованный передними гранями детекторов CsI(Tl). Зачернены 12 правильных пятиугольников, которые окружены 60 неправильными шестиугольниками.

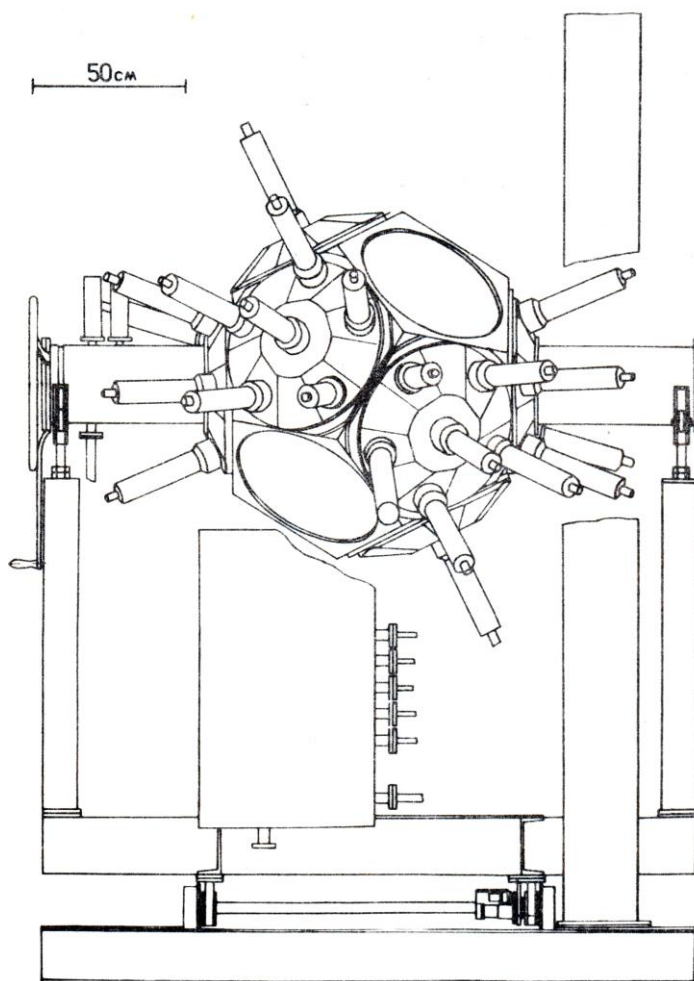


Рис. 4. Общий вид установки ФАЗА.

На Рис. 5 показан один из модулей с пятью сцинтилляционными счётчиками. Центральный счётчик заменён устройством, которое позволяет вводить в центр камеры тонкую мишень ($\sim 1.5 \text{ мг/см}^2$) или α -источник (с помощью электромеханического привода). Сцинтилляционные счётчики имеют световод специальной формы: шестиугольник или пятиугольник со стороны сцинтиллятора переходит в цилиндр со стороны ФЭУ. Длина световода 20 см, размер сцинтиллятора по диагонали $\approx 15 \text{ см}$. Расстояние от центра мишени до центра сцинтиллятора $\sim 30 \text{ см}$. Используются ФЭУ-110, имеющие наиболее адекватный для CsI(Tl) фотокатод. CsI(Tl) изготовлен в виде тонкой поликристаллической плёнки на подложке из оргстекла путём вакуумного теплового распыления [23]. На Рис. 6 представлены расчётные зависимости амплитуды световой вспышки от энергии различных частиц для слоя CsI(Tl) толщиной 25 мг/см^2 . Расчёты выполнены с использованием данных из работы [24]. Видно, что возможно удовлетворительное отделение по амплитуде α -частиц с энергией до 60-80 МэВ от протонов. Для более тяжёлых фрагментов ситуация более благоприятная.

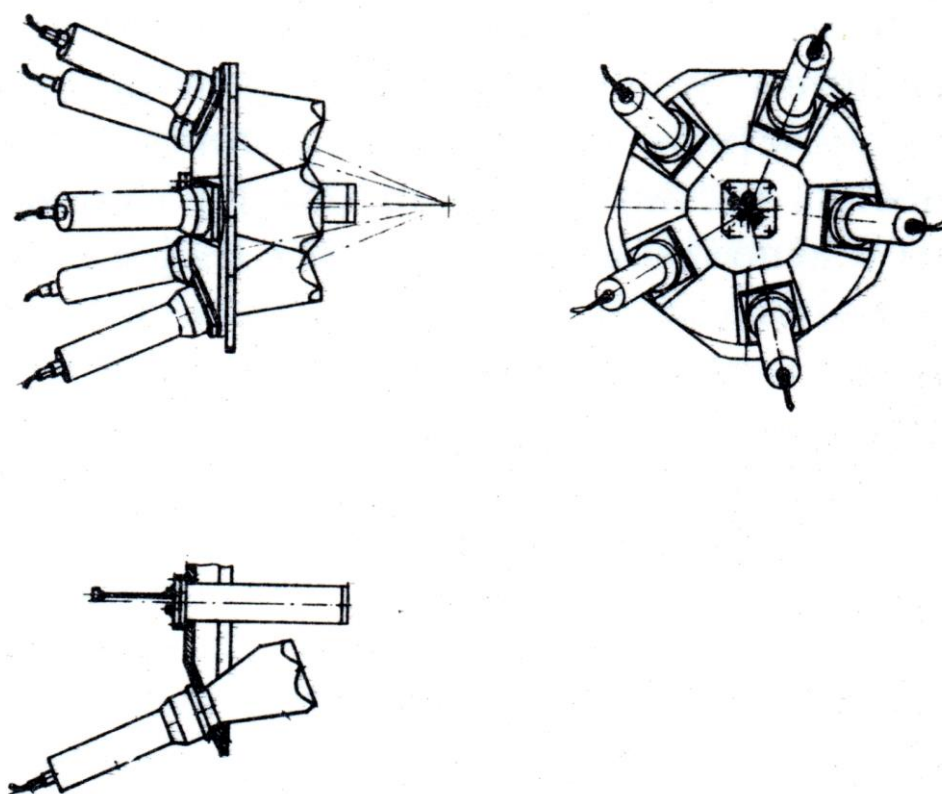


Рис.5. Один из модулей установки ФАЗА с пятью сцинтилляционными счётчиками и устройством для ввода мишени и калибровочного источника.

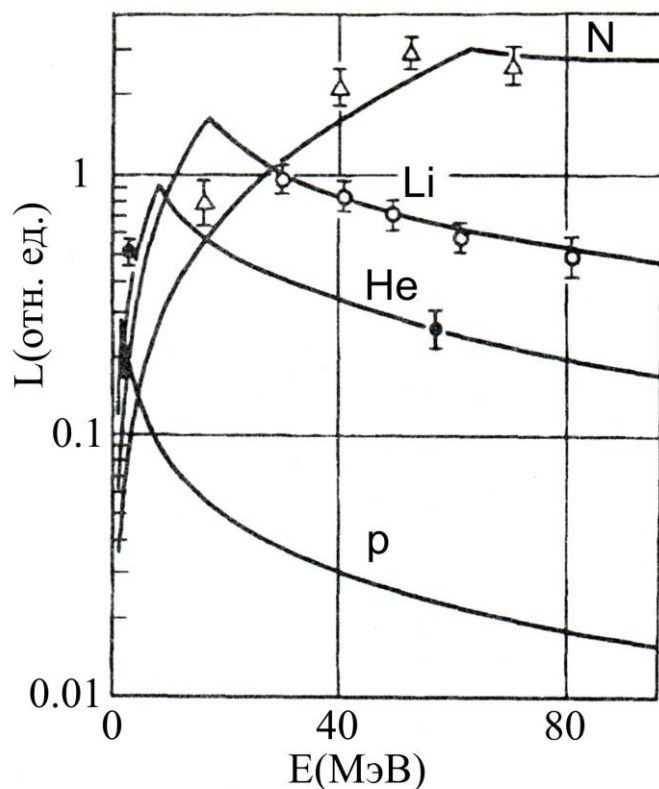


Рис. 6. Зависимость амплитуды световой вспышки от энергии частиц (p, ^4He , ^{12}C , ^{16}O) для слоя CsI(Tl) толщиной 25 мг/см^2 . За единицу по шкале ординат взята амплитуда вспышки α -частиц с энергией 8.78 МэВ при полном поглощении.

Установка включает 30 ТС. 5 ТС расположены под углами к направлению пучка: 24° , 68° , 87° , 112° , 156° . 25 ТС собраны в компактную конструкцию на фланце (Рис. 7) с полярными углами $37^\circ < \Theta < 87^\circ$. Каждый ТС состоит из ионизационной камеры (dE) и Si(Au)-детектора. Корпус ТС выполнен из дюралюминия и имеет форму усеченного конуса длиной 83 мм с диаметрами 64 и 54 мм . Входное окно сделано из майларовой плёнки толщиной 1.5 мкм , которая крепится на сетке из латуни толщиной 2 мм и прозрачностью 74% . Ионизационная камера имеет цилиндрическую форму с диаметром рабочей части 30 мм и длиной 35 мм . Катод изготовлен из латуни и заземлён, а анодом служит нить из золота диаметром 0.5 мм , которая укреплена на стеклянных трубках диаметром 3 мм и толщиной стенок 1 мм . Через металлическую нить, расположенную в одной из этих трубок, на анод подаётся напряжение 600В . Для уменьшения краевых эффектов другой конец анодной нити запаян в стеклянную трубку, а с обеих сторон камеры установлены плёнки с золотым напылением, которые тоже заземлены. Рабочий объём камеры заполнен CF_4 при давлении 50 Торр . Конструкция ионизационной камеры обеспечивает сбориение заряда поперёк трека частиц. Это позволяет снизить вероятность рекомбинации при регистрации ядерных фрагментов. Остаточная энергия E частиц определяется полупроводниковым кремниевым детектором с рабочим диаметром 40 мм и толщиной 750 мкм , достаточной для полной остановки фрагментов с $Z > 3$ (высокоэнергичные α -частицы и ядра лития частично простреливают детектор, оставляя лишь часть своей энергии). Корпус детектора закреплён за ионизационной камерой. На поверхность детектора наклеен α -источник ^{241}Am для энергетической калибровки. Формирование импульса в ионизационной камере происходит медленнее, чем в полупроводниковом детекторе. Для обеспечения совпадения с импульсами от фрагментов, попадающих в ТС, импульс с полупроводникового детектора задерживается.

Использование 5 + 25 ТС позволяет обеспечить проведение корреляционных измерений по относительному углу в диапазоне от 10° до 180° . При этом фиксируются заряды и энергии обоих фрагментов. На Рис. 8 представлена блок-схема преобразования аналоговых сигналов в цифровую последовательность с последующей записью в компьютер, реализованную в стандарте VME. Преобразователи амплитуда-код и заряд-код имеют внутренний буфер, который позволяет одновременно выполнять оцифровку поступающих сигналов и чтение преобразователей. Количество оцифровываемых сигналов 176 (30 dE; 30 E; 58 ФЭУ, строб 1; 58 ФЭУ, строб 2). Каждый сигнал оцифровывается в 2 байта. Таким образом, каждое событие представляет собой 352 байта. Каждый импульс ФЭУ оцифровывается на максимуме и на середине фронта. Это позволяет получить величину фона 1.5%. Запись в режиме “событие-за-событием” осуществляется с помощью компьютера с процессором Intel Xeon с частотой поступающих событий 15 событий в секунду. Время чтения одного события составляет 35 мкс. Мёртвое время – 41 мкс. Пропускная способность 10 Мб/с. В настоящем Проекте мы планируем перевести на стандарт VME триггерную систему установки, которая сейчас реализована в системе КАМАК на блоках 15-летней давности. VME стандарт имеет более высокую степень интеграции. Конструкции, сделанные на основе стандарта VME, получаются более компактными и надёжными. Рис. 9 показывает двухмерный спектр ($dE-E$) одного из телескопов установки ФАЗА, на котором чётко видны локусы, отвечающие регистрации фрагментов от гелия до магния. Система из тридцати телескопов установки обеспечивает проведение спектроскопических, а также корреляционных измерений для фрагментов по относительному углу (в диапазоне углов от 10° до 180°) или относительной скорости.

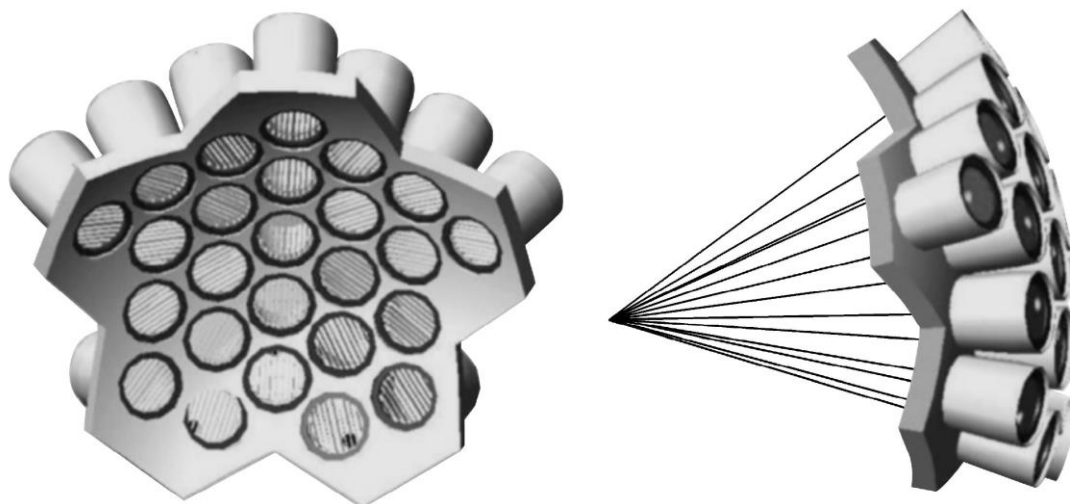


Рис. 7. Общий вид телескопного модуля, состоящего из 25 телескопов-спектрометров.

ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

1. Впервые доказано экспериментально, что для горячих ядер (с энергией возбуждения более 3 МэВ на нуклон), получаемых на релятивистских лёгких пучках (протоны, дейтроны, α -частицы), испарение частиц сменяется процессом тепловой ядерной мультифрагментации. Это – новый, тип распада возбуждённых ядер, при котором происходит множественная эмиссия фрагментов промежуточной массы. Они – тяжелее α -частиц, но легче осколков деления ($2 < Z < 20$) [25].
2. Это процесс «взрывного» типа, происходящий за время $\tau_{em} \approx 10^{-22}$ с (40 fm/c). Столь короткое время впервые установлено в работах группы ФАЗА путём тонкого анализа корреляции генетически связанных фрагментов по относительным углам [26].
3. Впервые экспериментально показано, что многотельный распад горячих ядер происходит после их *расширения* за счёт теплового давления. Установлено, что процесс тепловой мультифрагментации имеет *два характеристических объёма*. Первый, $V_t \approx 3V_0$, система имеет на этапе формирования фрагментов. Эта конфигурация подобна “седловой” точке для деления. Вторая характерная конфигурация (kinetic freeze-out) аналогична точке разрыва в обычном делении. Ей отвечает объём $V_f \approx (5.0 \pm 0.5)V_0$, заполненный отделившимися друг от друга фрагментами [27,28].
4. Типичная температура процесса (4 – 6 МэВ) существенно меньше, чем критическая температура T_c для фазового перехода «жидкость – газ». Величина T_c определена авторами путём анализа зарядового распределения фрагментов, возникающих в соударениях $p(8,1 \text{ ГэВ}) + Au$: $T_c = (17 \pm 2) \text{ МэВ}$ [29]. Отметим, что в течение многих лет была драматическая разница между этим значением и тем, которое получал L. Moretto (LBL, Berkeley, USA) [30]. Недавно это противоречие было разрешено в пользу нашего значения [31].
5. В наших работах впервые доказано появление *радиального потока* в горячем ядре за счёт теплового давления. Выделение коллективной компоненты из энергии фрагментов и анализ её корреляции с зарядом фрагментов даёт неожиданную и интересную информацию о *пространственной конфигурации системы* в момент развала. Доказано, что более тяжёлые фрагменты рождаются ближе к центру системы вследствие неоднородного распределения плотности в сильно возбуждённом ядре [32]. В работе [33] были измерены спектры кинетических энергий для взаимодействия $d(4.4 \text{ ГэВ}) + Au$. Был выполнен расчёт спектров кинетических энергий в рамках INC + SMM моделей. Расчёт выполнялся при различных значениях радиального потока. Получено хорошее согласие измеренных и расчётных спектров кинетических энергий фрагментов при наличии в расчётах радиального потока. Сравнительный анализ экспериментальных спектров кинетических энергий фрагментов и расчётных позволил определить актуальные значения радиального потока. На Рис. 10 представлен экспериментальный и расчётный спектр кинетических энергий фрагментов бора.

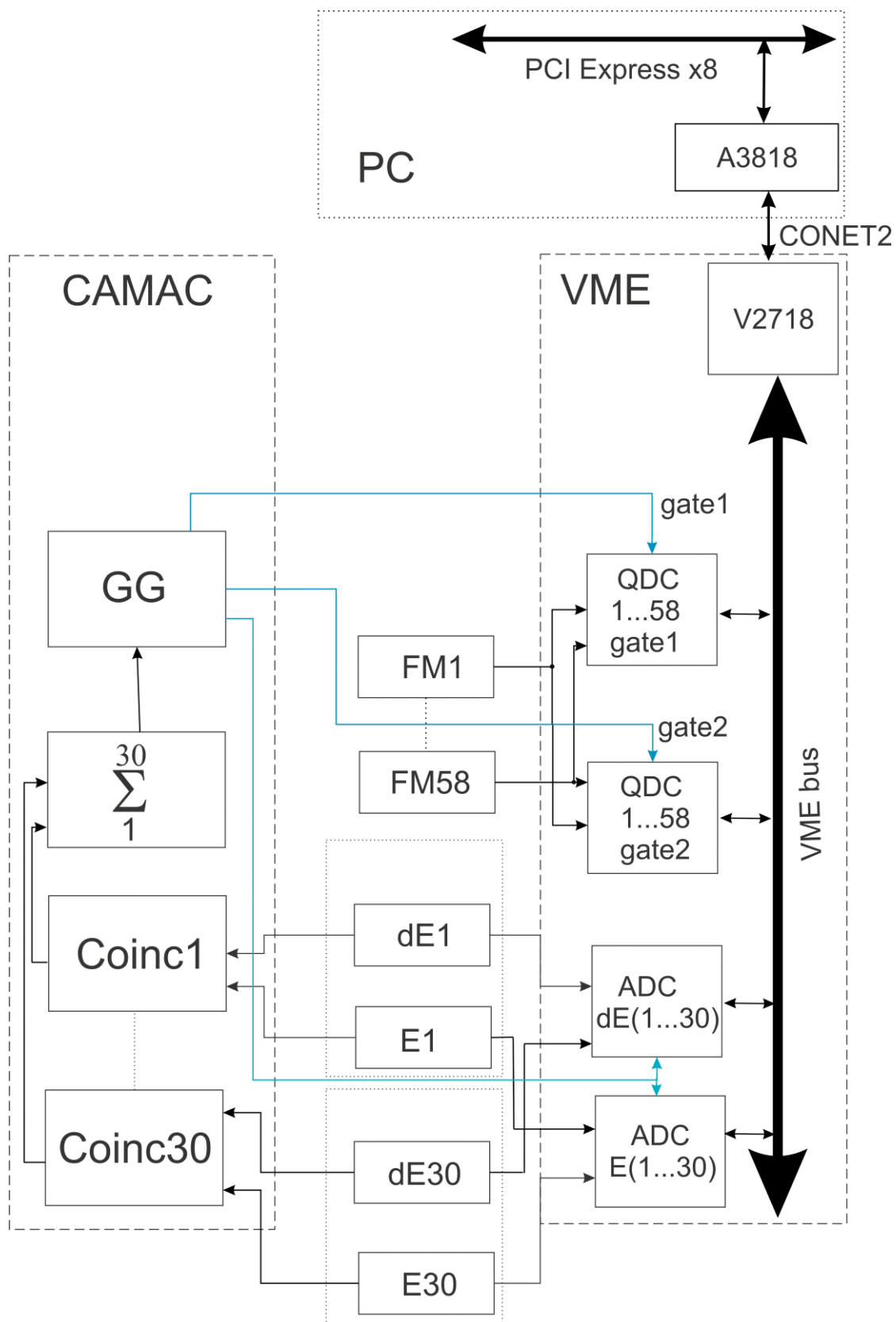


Рис. 8. Блок-схема электроники и системы записи информации: *ADC* – преобразователи амплитуда-цифра с внутренним буфером, *QDC* – преобразователи заряд-код с внутренним буфером, *V2718* – контроллер крейта VME с оптической передачей сигнала, *A3818* – приёмник оптических сигналов в компьютере (подключается по PCI Express).

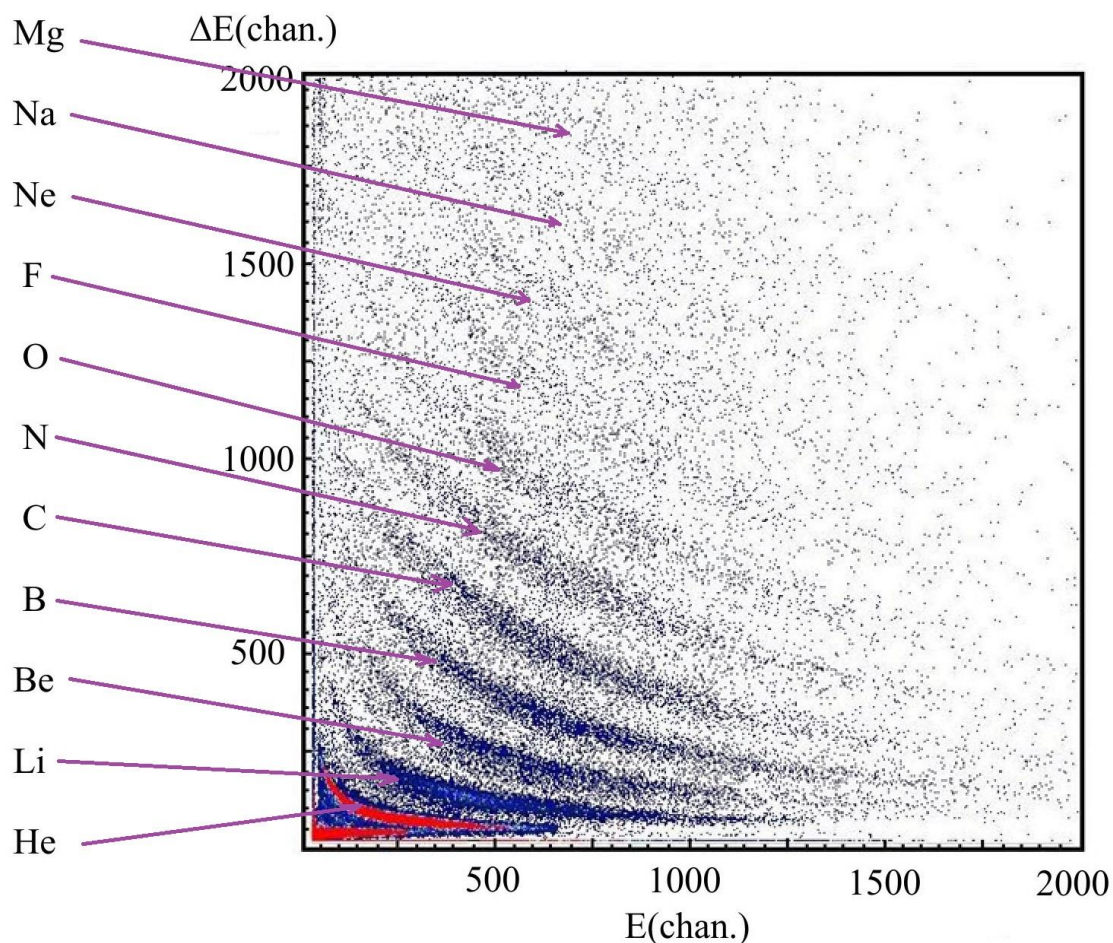


Рис. 9. Двумерный спектр фрагментов, образующихся в реакции $d+Au$ при энергии 4.4 ГэВ.

6. Для того, чтобы интерпретировать наблюдаемые величины процесса мультифрагментации, важно понимать, является ли система перед развалом в состоянии теплового равновесия. Одним из способов оценки степени термализации системы перед развалом, а также определение средней скорости источника является анализ продольных и поперечных скоростей фрагментов для фиксированных значений инвариантных поперечных значений. Рис. 11 показывает распределение продольных и поперечных скоростей фрагментов углерода [34] при фиксированных значениях инвариантных поперечных сечений. Получено, что фрагменты испускаются изотропно медленно движущимся источником (т.к. экспериментальные значения описываются окружностью). Это означает, что имеет место тепловое равновесие спектатора мишени перед его развалом.

7. В работе [35] была определена временная шкала тепловой мультифрагментации для взаимодействия ${}^4\text{He}(4 \text{ ГэВ}) + Au$. Для экспериментального определения временной шкалы процесса анализировалась корреляционная функция по относительным углам для совпадающих фрагментов. Корреляционная функция претерпевает минимум при относительных углах равных нулю, который происходит из-за кулоновского расталкивания между совпадающими фрагментами. Величина эффекта сильно зависит от времени жизни системы. Чем больше время между вылетом фрагментов, тем больше расстояние между фрагментами, тем слабее кулоновское расталкивание. Временная шкала эмиссии ФПМ оценивается путём сравнения измеренной корреляционной функции с расчётом многотельных

кулоновских траекторий с временем жизни в качестве параметра (Рис. 12). Для измерения эффекта отталкивания ФПМ-ФПМ, использовались значения корреляционной функции при относительном угле 26° . Полученные значения в функции времени жизни системы представлены на Рис. 13. Получено среднее время жизни фрагментирующей системы $\tau = 47 \pm 12$ фм/с, что соответствует мгновенному многотельному распаду.

Известно, что весьма эффективным способом получения горячих ядер являются реакции, вызываемые тяжёлыми ионами [36-39]. Однако, при этом разогрев сопровождается возбуждением коллективных степеней свободы: ядра вращаются, сжимаются, деформируются. Исследование этих динамических эффектов интересно само по себе, однако они затрудняют получение информации о термодинамических свойствах горячих ядерных систем.

Картина значительно упрощается, когда используются пучки релятивистских лёгких частиц (протоны, антипротоны, пионы). Коллективные степени свободы при этом возбуждаются слабо, и энергия образующихся ядер оказывается практически целиком тепловой. Это даёт основание называть *тепловой мультифрагментацией* развал горячего ядра, образующегося в соударениях быстрых релятивистских частиц с тяжёлыми мишенями. Характеристики этого процесса целиком определяются энергией возбуждения. Лёгкие релятивистские пучки дают уникальные возможности для исследования термодинамики горячей ядерной системы. Отметим, что детальная информация о процессе мультифрагментации имеет важные астрофизические приложения [40], так как температура на поверхности нейтронных звёзд близка к характерной для ядер, испытывающих многотельный распад. Точное знание поведения ядер с низкой плотностью и температурой 5-10 МэВ необходимо для понимания динамики сверхновых.

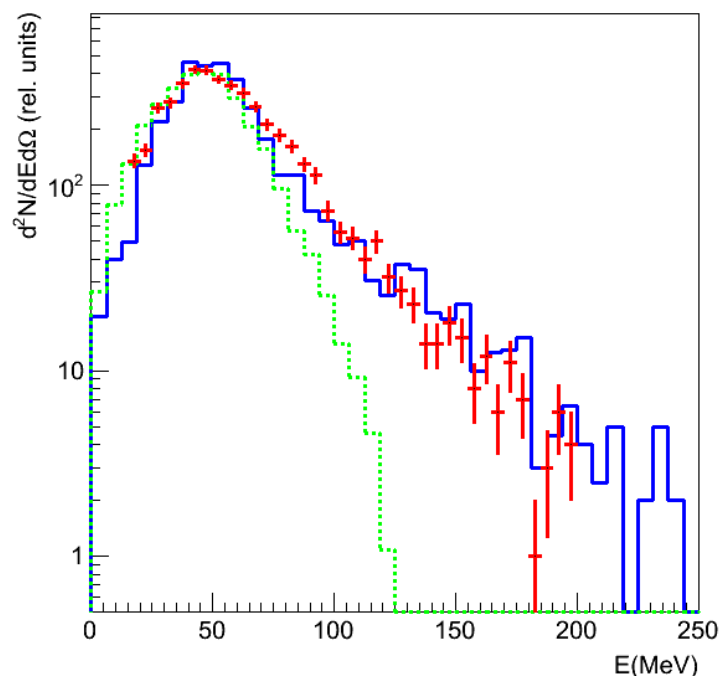


Рис. 10. Спектр кинетических энергий фрагментов бора под углом $\Theta = 90^\circ$ в реакции $d(4.4 \text{ GeV}) + \text{Au}$. Точки – экспериментальные значения. Сплошная линия: расчёт в рамках INC + SMM при наличии радиального потока $v_{flow}^0 = 0.15c$ (c – скорость света). Пунктирная линия: расчёт в рамках INC + SMM без потока.

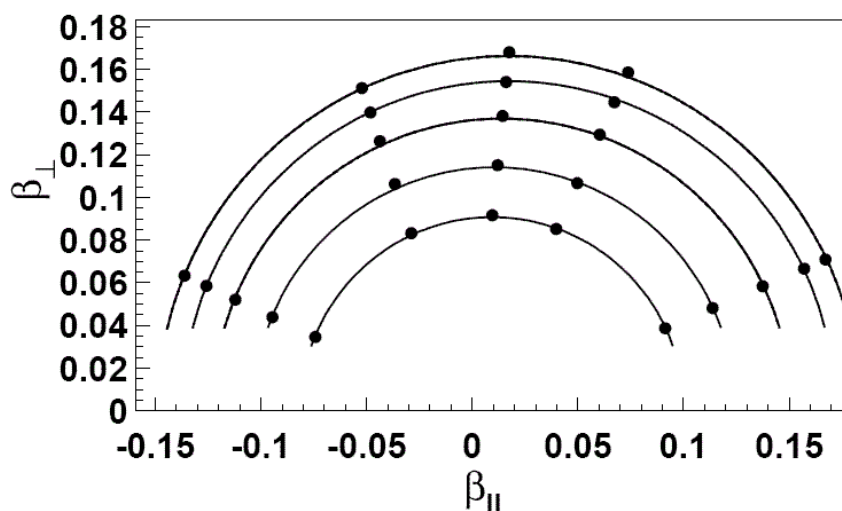


Рис. 11. Распределение продольных и поперечных скоростей фрагментов углерода при фиксированных инвариантных поперечных сечениях для взаимодействия ${}^4\text{He}(14.6 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$. Точки – экспериментальные значения. Окружности проведены через точки, соответствующие фиксированным инвариантным поперечным сечениям, что соответствует изотропной эмиссии фрагментов медленно движущимся источником.

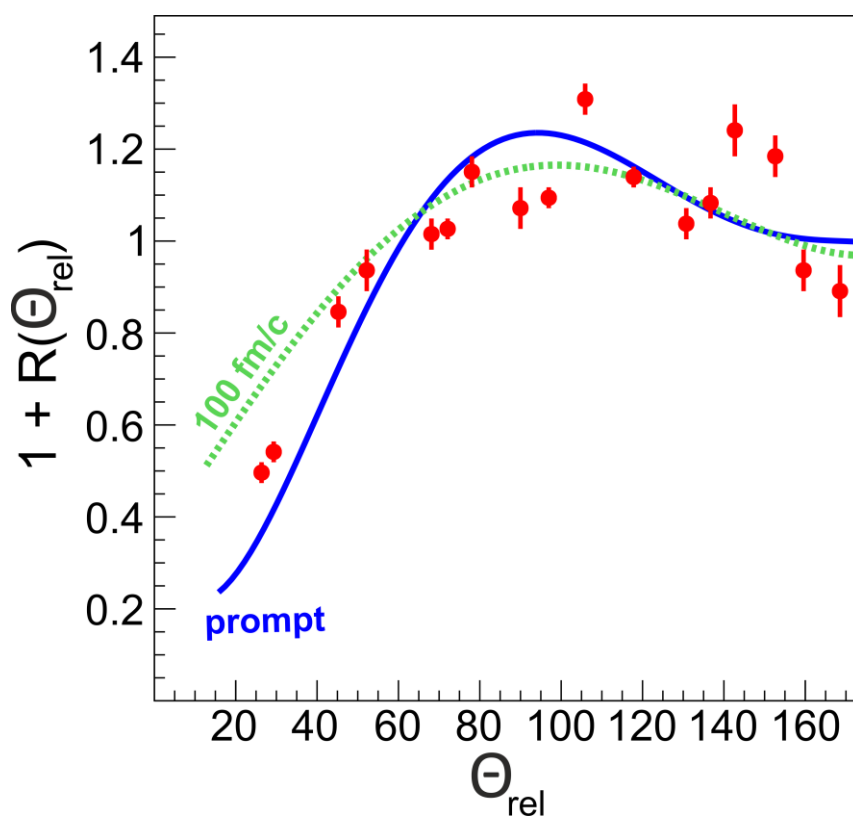


Рис. 12. Корреляционная функция по относительным углам фрагментов ($2 < Z < 20$) для взаимодействия ${}^4\text{He}(4 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$. Точки – экспериментальные значения. Сплошная и пунктирные линии – расчёт по INC + SMM.

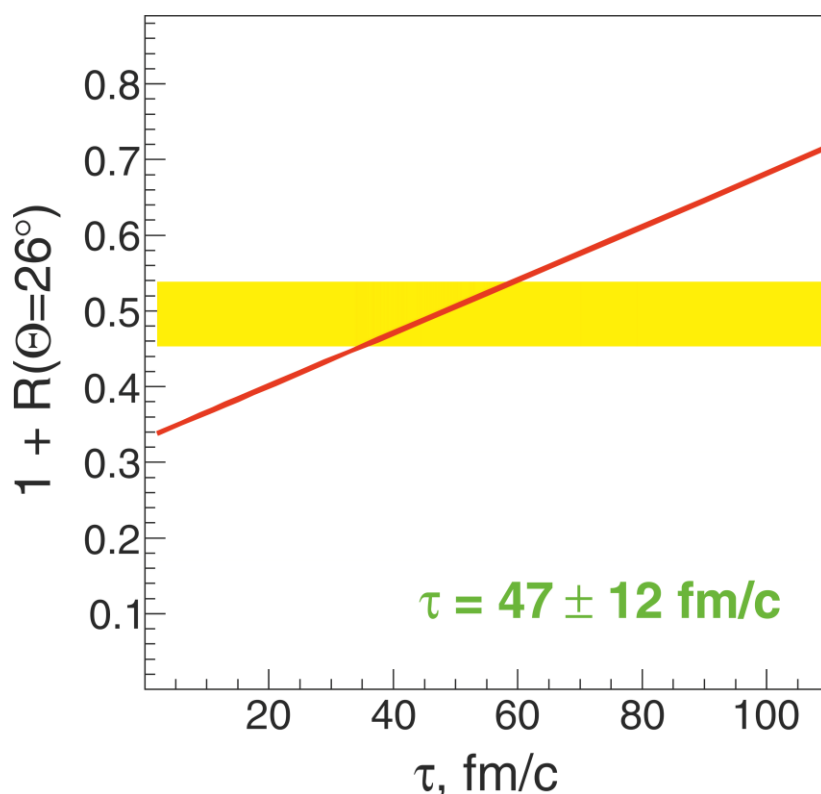


Рис. 13. Корреляционная функция для относительного угла 26° в функции времени жизни системы. Экспериментальные значения даются горизонтальной полосой. Линия – расчёт по INC + SMM для разного времени жизни системы.

Коллаборация ФАЗА успешно изучала “статистические” свойства горячих ядер, используя при анализе данных Московско-Копенгагенскую статистическую модель мультифрагментации. Эта модель была существенно модифицирована на основе наших экспериментальных данных. Следующим предметом исследования является *динамика процесса* множественной эмиссии фрагментов, т.к. в случае перехода от пучков протонов к дейтронам, α -частицам и углероду, мы наблюдаем переход от чистого статистического процесса к процессам, в которых начинают появляться динамические эффекты. Мы видим, что фрагменты в момент развала спектатора мишени имеют дополнительную энергию, которая обусловлена коллективным потоком. Поэтому, **задачами Проекта являются:**

1. Измерение радиального потока в функции заряда фрагмента.
 - а) Экспериментальное измерение спектров кинетических энергий фрагментов.
 - б) Расчёт спектров кинетических энергий фрагментов по каскадной и статистической модели (с потоком и без потока).
 - в) Сравнение эмпирических и теоретических распределений по критерию согласия Пирсона.
2. Измерение скорости источника и определение, находится ли спектатор мишени перед развалом в состоянии термодинамического равновесия.
 - а) Анализ инвариантных поперечных сечений в функции продольной и поперечной скорости фрагмента.
 - б) Алгоритм получения скорости источника с ошибками подробно описан в работе [33].
3. Проведение новых измерений корреляционной функции по относительным углам фрагментов промежуточной массы для соударений релятивистских лёгких ионов с золотой мишенью.

- а) Построение экспериментальной корреляционной функции по относительным углам.
- б) Построение корреляционных функций на основе расчётов по каскадной и статистической модели с разным временем жизни системы.
- в) Получение временной шкалы процесса с ошибками по процедуре, описанной в работе [26].

Запрашиваемое ускорительное время (с интенсивностью пучка более 10^9 частиц на сброс) позволит выполнить задачи Проекта с точностью в несколько процентов.

ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- 1) Измерение величины радиального потока в функции заряда фрагмента даст информацию о распределении фрагментов в объёме freeze-out.
- 2) Анализ инвариантных поперечных сечений в функции продольной и поперечной скорости фрагмента позволит измерить скорость источника и позволит определить, находится ли спектатор мишени перед развалом в состоянии термодинамического равновесия.
- 3) Проведение новых измерений корреляционной функции по относительной скорости (относительным углам) фрагментов промежуточной массы ($2 < Z < 20$) для соударений релятивистских лёгких ионов с тяжёлой мишенью. В результате будет получена детальная информация о среднем времени эмиссии и конфигурации системы в момент дезинтеграции.

Результаты будут направлены в реферируемые журналы для публикации. Одна, две публикации в год.

ПУБЛИКАЦИИ ГРУППЫ ФАЗА ЗА ПОСЛЕДНИЕ ТРИ ГОДА

1. «Study of the source velocity with the light relativistic ions at CBM», CBM Progress Report 2016, 187 (2017);
2. «Source velocity at relativistic beams of ^4He », J. Astrophys. Aerospace Technol. Vol. 5, No. 2, 48 (2017);
3. «Time scale of the thermal multifragmentation in $^4\text{He}(4 \text{ GeV}) + \text{Au}$ collisions», Известия РАН, серия физическая, том 82, № 6, 711 (2018);
4. «Time scale of the thermal multifragmentation in $^4\text{He} + \text{Au}$ at FAIR energies», CBM Progress Report 2017, 162 (2018);
5. «Radial flow in the interaction of relativistic deuterons with a gold target», Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, Vol. 83, No. 4, 399 (2019);
6. «Source velocity in collisions of 3.6 GeV protons with gold target», LXIX International conference “NUCLEUS 2019”, book of abstracts, July 1-5 (2019) Dubna, Russia, 355 (2019);
7. «Radial flow in $d(4.4 \text{ GeV}) + \text{Au}$ interaction», Труды 14-го Международного совещания “Релятивистская ядерная физика: от сотен МэВ до ТэВ”, Стара-Лесна, Словацкая Республика, 27 мая – 1 июня 2019 г., 102 (2019).

Результаты работ докладывались на конференциях:

1. International conference **NUCLEUS-2017**.
September 12-15, 2017, Almaty, Republic of Kazakhstan;
2. 2nd International Conference on Atomic and Nuclear Physics.
November 08-09, 2017 at Las Vegas, USA;
3. LXVIII International conference **NUCLEUS-2018**.
July 2-6, 2018, Voronezh, Russia.
4. 4th International conference on Atomic and Nuclear Physics.
October 26-27, 2018, Boston, USA.
5. International Workshop
May 26 - June 1, 2019, Stará Lesná, Slovakia
6. LXIX International conference **NUCLEUS-2019**.
July 1-5, 2019, Dubna, Russia.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 19-02-00499).

ВРЕМЕННАЯ ШКАЛА РАБОТ ПО ПРОЕКТУ

1. Модернизация триггерной системы на установке ФАЗА (переход от стандарта САМАС к более быстрой системе VME: 2020-2022);
2. Эксперименты с установкой ФАЗА на пучках релятивистских лёгких ионов Нуклотрона:
2021 – эксперименты с использованием ядер гелия;
50 часов: энергия - 4 ГэВ, интенсивность - более 10^9 частиц на сброс;
50 часов: энергия - 10 ГэВ, интенсивность - более 10^9 частиц на сброс;
50 часов: энергия - 16 ГэВ, интенсивность - более 10^9 частиц на сброс;
2022 – эксперименты с использованием ядер углерода;
50 часов: энергия - 10 ГэВ, интенсивность - более 10^9 частиц на сброс;
50 часов: энергия - 30 ГэВ, интенсивность - более 10^9 частиц на сброс;
50 часов: энергия - 48 ГэВ, интенсивность - более 10^9 частиц на сброс;
50 часов ускорительного времени с данной интенсивностью позволит набирать миллион событий для реакции с фиксированной энергией пучка, что позволит делать измерения с процентными точностями.
3. Анализ экспериментальных данных с помощью как статистических, так и динамических моделей: 2020-2022;
4. Публикации результатов в виде статей в реферируемых журналах (одна или две публикации в год): 2020-2022.

Рисков в осуществлении Проекта нет, т.к. есть работающая установка и работающие люди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. B. Jacobsson, et al., Z. Phys. A 307, 293 (1982)
2. P.J. Siemens, Nature 305, 410 (1983)
3. J. Pochodzalla, et al., Phys. Rev. Lett. 75, 1040 (1995)
4. V.V. Sagun et al., Nucl. Phys. A 924, 24 (2014)
5. A.Schuttauf et al., Nucl. Phys. A 607, 457-486 (1996)
6. J. Brzychczyk, et al., Phys. Rev. C 98, 054606 (2018)
7. A.Gobbi et al., Nucl.Instrum.Methods A324, 156 (1993)
8. J.Pouthas et al., Nucl.Instrum.Methods A357, 418 (1995)
9. R.DeSouza et al., Nucl.Instrum.Methods A295, 458 (1993)
10. A.Baden et al., Nucl.Instrum.Methods 203, 189 (1982)
11. J.A. Hauger, et al., Phys. Rev. C 57, 764 (1998)
12. B.K. Srivastava, et al., Phys. Rev. C 65, 054617 (2002)
13. S.P.Avdeyev et al., Nucl. Instr. Meth. A 332, 142 (1993)
14. В.В.Киракосян и др., ПТЭ 1, 1 (2008)
15. D.V.Shetty et al., Nucl. Instr. Meth. A604, 578 (2009)
16. R.Wada et al., Phys. Rev. C 99, 024616 (2019)
17. M. Bini et al., Nucl. Instr. Meth. A 515, 497 (2003)
18. S. Piantelli et al., Phys. Rev. C 99, 064616 (2019)
19. W.Lin et al., Phys. Rev. C 99, 054616 (2019)
20. V.D. Toneev, et al., Nucl. Phys. A 519, 463 (1990)
21. W.A. Friedman, Phys. Rev. C 42, 667 (1990)
22. J.P. Bondorf, et al., Phys. Rept. 257, 133 (1995)
23. Ю.Т. Выдай, Ю.А. Цирлин, Э.Ф. Чайковский, Изв. АН СССР, 38, 1307 (1974)
24. A. Quinton, et al., Phys. Rev., 115, p.886 (1959)
25. V. Lips, et al., Phys. Rev. Lett. 72, 1604 (1994)
26. V. Lips, et al., Phys. Lett. B 338, 141 (1994)
27. V.A. Karnaukhov, et al., Phys. Rev. C 70, 041601 (2004)

28. V.A. Karnaukhov, et al., Nucl. Phys. A 749, 65c (2005)
29. V.A. Karnaukhov, et al., Nucl. Phys. A 734, 520 (2004)
30. J.B. Elliott, et al., Phys. Rev. Lett. 88, 042701 (2002)
31. V.A. Karnaukhov, et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 40, 058001 (2pp) (2013)
32. S.P. Avdeyev, et al., Phys. Lett. B 503, 256 (2001)
33. S.P. Avdeyev, et al., Bulletin of the RAS, Phys., Vol. 83, No. 4, 399 (2019).
34. S.P. Avdeyev, et al., Изв. РАН, серия физическая, т. 80, № 3, 365 (2016)
35. S.P. Avdeyev et al., Изв. РАН, серия физическая, т. 82, № 6, 711 (2018)
36. N. Buyukcizmeci et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 39, 115102 (10pp) (2012)
37. M. Fidelus et al., Phys. Rev. C 89, 054617 (2014)
38. H. Imal et al., Phys. Rev. C 91, 034605 (2015)
39. S. Barlini et al., Phys. Rev. C 87, 054607 (2013)
40. A.S. Botvina and I.N. Mishustin, Nucl. Phys. A 843, 98 (2010)

Процент времени, которое авторы потратят на Проект.

| | |
|--------------------|------|
| С.П. Авдеев | 100% |
| Х.У. Абрамян | 30% |
| А.С. Ботвина | 30% |
| З.А. Игамкулов | 30% |
| В. Карч | 100% |
| В.В. Киракосян | 50% |
| Л.В. Карнюшина | 70% |
| Э.М. Козулин | 50% |
| А.Г. Литвиненко | 30% |
| Е. Норбек | 30% |
| В.Ф. Переседов | 30% |
| П.А. Рукояткин | 30% |
| В.И. Стегайлов | 50% |
| О.В. Стрекаловский | 30% |

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления
проекта ФАЗА
(название Проекта)**

| Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования | | Стоимость (тыс. долл.). Потребности в ресурсах | Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов | | | | |
|--|--------------------------------|---|--|-------|-------|-------|--|
| | | | 1 год | 2 год | 3 год | 4 год | |
| Затраты | Блоки VME | 30 | 10 | 10 | 10 | | |
| | Строительство/ремонт помещений | - | - | - | - | | |
| | п/п детекторы | 6 | 2 | 2 | 2 | | |
| Необходимые | Нормо-час | Ускоритель Нуклотрон | 300 часов | 0 | 150 | 150 | |
| Источники финансирования | Бюджетные средства | Затраты из бюджета, в том числе инвалютные средства | 36 | 12 | 12 | 12 | |
| | Внебюджетные средства | Грант РФФИ | 45 | 15 | 15 | 15 | |

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА



Смета затрат по проекту СВОЙСТВА ГОРЯЧИХ ЯДЕР, ОБРАЗУЮЩИХСЯ
НА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПУЧКАХ КОМПЛЕКСА НУКЛОТРОН/НИКА

(полное название Проекта)

| NN пп | Наименование статей затрат | Полная стоимость | 1 год | 2 год | 3 год и далее |
|----------|------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Прямые расходы на Проект | | | | |
| 1. | Ускоритель Нуклотрон | 300 час. | 0 | 150 | 150 |
| 2. | Блоки VME | 30 тыс. \$ | 10 | 10 | 10 |
| 3. | п/п детекторы | 6 тыс. \$ | 2 | 2 | 2 |
| 4. | Командировочные расходы, в т.ч. | 42 тыс. \$ | 14 | 14 | 14 |
| | а) в страны нерублевой зоны | 36 | 12 | 12 | 12 |
| | б) в города стран рублевой зоны | 6 | 2 | 2 | 2 |
| | в) по протоколам | - | - | - | |
| | Итого по прямым расходам: | 78 тыс.\$ | 26 тыс.\$ | 26 тыс.\$ | 26 тыс.\$ |

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА



ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ



ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР-ЭКОНОМИСТ ЛАБОРАТОРИИ

