

A-187

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

1-93-329

АВДЕЕВ
Сергей Петрович

УДК 539.1.074

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
МУЛЬТИФРАГМЕНТАЦИИ ЯДЕР
С ПОМОЩЬЮ 4π -УСТАНОВКИ «ФАЗА»**

**Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1993

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединённого института ядерных исследований.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Карнаухов В. А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
П. В. Номоконов
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
В. З. Гольдберг

Ведущее предприятие: НИИФ СПбГУ, г. Санкт-Петербург.

Автореферат разослан "___" _____ 1993 г.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1993 г. на
заседании специализированного Учёного совета Д-047.01.03
Лаборатории Ядерных Проблем, г. Дубна, Московской области.

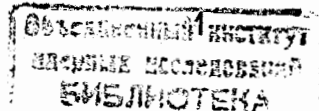
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Учёный секретарь специализированного совета
доктор физико-математических наук,
профессор Ю. А. Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы. Одной из важнейших задач ядерной физики наших дней является изучение уравнения состояния ядерной материи. Наиболее интересный аспект этой задачи связан с попытками обнаружить сигналы различных фазовых переходов в ядерном веществе, которые предсказываются рядом современных теоретических моделей. При некотором уплотнении ядра и температуре, не превышающей двадцати МэВ, возможен фазовый переход жидкость-газ. Отмечается аналогия между ядерной материей и газом Ван-дер-Ваальса, поскольку притяжение между нуклонами сменяется отталкиванием на очень малых расстояниях. Уравнение состояния ядерного вещества оказывается весьма похожим на таковое для газа Ван-дер-Ваальса, и соответственно, в фазовой диаграмме имеются области жидкой, газовой фазы и область неустойчивости, где сосуществуют обе фазы и где ядерная система состоит из капелек жидкости - фрагментов, окруженных газом нуклонов. Следует ожидать, что разогретое ядерное вещество, образующееся в результате ядро-ядерного взаимодействия (спектатор мишени), попадает в область нестабильности на стадии расширения, и разваливается с эмиссией большого числа нуклонов и нескольких фрагментов (мультифрагментация). Таким образом, исследование образования фрагментов промежуточной массы ($Z_f=3\div 20$) в ядро-ядерных соударениях в широком диапазоне энергий является средством изучения уравнения состояния ядерного вещества при температуре меньше 20 МэВ и плотностях ниже нормальной.

Целью работ, составивших диссертацию, была разработка и создание 4 π -установки для детектирования фрагментов промежуточной массы и измерение таких характеристик, как распределение по множественности фрагментов, массовые спектры фрагментов в функции множественности, корреляции совпадающих фрагментов в функции относительного угла между ними для взаимодействия ${}^4\text{He} + \text{Au}$ при $E/A=3,65$ ГэВ/А.



Научная новизна работ, составивших диссертацию, заключается в следующем :

1. Создана 4 π -установка "ФАЗА" для изучения множественной эмиссии фрагментов промежуточной массы в ядро-ядерных соударениях. Она состоит из детектора множественности фрагментов (полный телесный угол $\approx 3\pi$), пяти телескопов-спектрометров фрагментов (телесный угол $\approx 10^{-3} \cdot 4\pi$), используемых как триггер системы, и позиционно-чувствительной плоско-параллельной лавинной камеры (телесный угол $\approx 0,25 \cdot \pi$).

2. Впервые исследован световыход поликристаллических сцинтилляторов CsI(Tl) при регистрации тяжелых частиц с различными Z и энергиями. Показано, что зависимость удельного световыхода от энергии и заряда частиц (от He до N) такая же, как и для монокристалла.

3. Разработан метод, позволяющий четко выделить истинные события и существенно подавить фон случайных совпадений для сигналов со счётчиков детектора множественности на двухмерном спектре с координатами пропорциональными амплитуде сигнала на его максимуме и амплитуде сигнала на его фронте.

4. Впервые получено распределение по множественности фрагментов для взаимодействия ${}^4\text{He} + \text{Au}$ при $E/A=3,65$ ГэВ/А. Среднее значение множественности фрагментов промежуточных масс равно $5,3 \pm 0,8$.

5. Впервые измерены массовые спектры фрагментов для ${}^4\text{He} + \text{Au}$ (для энергии α -частиц 3,65 ГэВ/А) при различных множественностях. Показано, что с увеличением множественности спектр существенно меняется : исчезает "делительный" пик, остаётся только экспоненциально спадающее распределение продуктов процесса мультифрагментации. Распределение фрагментов по массе для взаимодействия ${}^4\text{He}(3,65 \text{ ГэВ/А}) + \text{Au}$ может быть качественно описано степенной функцией $A^{-\tau}$ ($\tau=2,6 \pm 0,6$), что согласуется с

литературными данными.

6. Впервые измерены корреляции совпадающих фрагментов в функции относительного угла между ними, чувствительные к времени жизни горячего спектатора мишени.

Практическая ценность. В ходе данной работы исследованы характеристики сцинтилляционных счётчиков с плёночными CsI(Tl) большой площади и коническими световодами. Проведена оптимизация счётчиков для получения наилучшего разрешения, исследована функция отклика поликристаллических сцинтилляторов CsI(Tl) при регистрации тяжёлых частиц с различными Z и энергиями. Полученные методические результаты будут полезны другим исследователям ядерных процессов с эмиссией фрагментов. Опыт создания 4 π -установки "ФАЗА" может быть использован при создании новых приборов с 4 π -геометрией.

Апробация работы. Основные результаты диссертации представлялись и докладывались на XXIV школе по физике в Закопанах (РП) 1989, Международной конференции по физике адронов и ядер в Зальцбурге (Австрия) 1992, XXXI Международной зимней конференции по ядерной физике в Бормио (Италия) 1993, Международной школе-семинаре по физике тяжёлых ионов в Дубне (Россия) 1993.

Публикации. По результатам исследований, составивших основу диссертации, опубликовано 7 работ. Эти результаты получены автором в период 1989–1993 г.г.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, изложена на 84 страницах машинописного текста, включая 36 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 57 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность поставленной задачи, сформулирована цель работы, отмечены новые полученные результаты и приводится краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе изложены основные опытные закономерности (по литературным данным), полученные при изучении мультифрагментации.

Отмечается, что сечение образования фрагментов промежуточных масс изменяется с энергией пучка характерным образом, проявляющемся в быстром росте сечения с увеличением энергии и достижением насыщения при энергиях около 10 ГэВ. Отмечается также, что периферические соударения коррелируют, в основном, с малой множественностью фрагментов промежуточных масс, а центральные с большой.

Вне зависимости от типа бомбардирующей частицы массовое распределение удовлетворительно описывается степенным законом $Y(A) = \text{const} \cdot A^{-\tau}$, где параметр τ принимает минимальное значение в точке фазового перехода.

Энергетические спектры имеют типичную форму: подъём при малых E из-за эффекта Кулоновского барьера и затем экспоненциальный спад.

Анализ этих закономерностей был использован при формулировке основных требований к установке "ФАЗА", созданной для исследования мультифрагментации на пучках релятивистских частиц.

В заключение главы даны примеры установок, работающих в прямой и обратной геометрии, предназначенных для изучения явления мультифрагментации.

Во второй главе представлено описание детектирующих систем установки "ФАЗА" разработанных для исследования ядерной мультифрагментации в ядро-ядерных соударениях, и описано математическое обеспечение для накопления поступающей информации и её последующей обработки.

На рис.1 показан общий вид установки "ФАЗА", которая состоит из детектора множественности фрагментов (полный телесный угол $\approx 3 \cdot \pi$), пяти время-пролётных телескопов (TOF, телесный угол $\approx 10^{-3} \cdot \pi$), используемых как триггер системы, и позиционно-чувствительной плоско-параллельной лавинной

камеры (PPAC). Каждый TOF состоит из "прозрачного" плоско-параллельного лавинного счётчика (старт детектор) и поверхностно-барьерного Si(Au)-детектора, дающего информацию об энергии частицы и стоп-сигнал. Конструкция телескопа отражает компромисс между массовым разрешением (большое время пролёта) и перекрытием по телесному углу (маленькое время пролёта). Калибровка массовых спектров проводилась ^{252}Cf -источником. Полученное отсюда массовое разрешение (лучше 10%) позволяет разделить индивидуальные массы лёгких фрагментов промежуточных масс. TOF позволяет идентифицировать фрагменты по массе и определять их энергию.

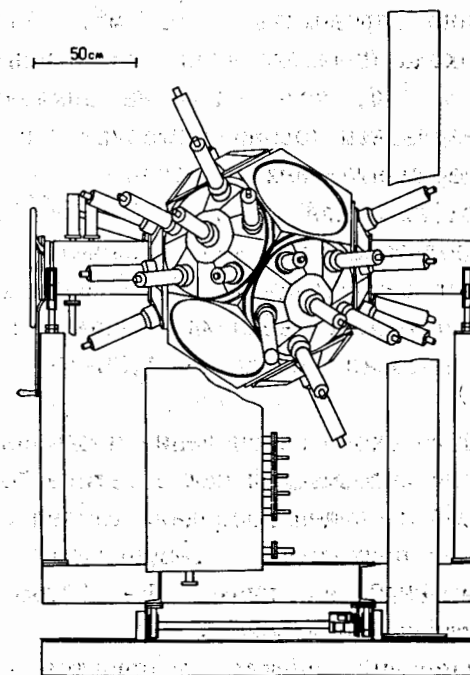


Рис.1. Общий вид установки "ФАЗА".

PPAC с размерами $30 \times 30 \text{ см}^2$ перекрывает 6% от полного телесного угла. Пространственное разрешение PPAC составляет 4мм, чему соответствует угловое разрешение 1° . Вместе с пятью телескопами эта камера позволяет определять относительную скорость и относительный угол совпадающих фрагментов.

Детектор множественности фрагментов смонтирован из 54 сцинтилляционных счётчиков с плёночными CsI(Tl), предназначен для регистрации фрагментов с $Z_f \geq 2$, определения их множественности и направления вылета из мишени. Была проведена оценка толщины полупоглощения $\lambda_{1/2}$ собственного света в сцинтилляторе. Было получено $\lambda_{1/2} \approx (18 \pm 2) \text{ мг/см}^2$. Это означает, что толщина плёночных сцинтилляторов CsI(Tl) не должна существенно превышать 20 мг/см^2 . Были проведены измерения световых выходов поликристаллических сцинтилляторов на пучках ^4He , ^6Li и ^{14}N , ускоренных на циклотроне ИАЭ им. И.В. Курчатова. Результаты хорошо согласуются с расчётами на основании экспериментальных данных о световых выходах монокристалла CsI(Tl) для ^4He , ^{12}C и ^{16}O . Данные по световым выходам использовались для расчёта эффективности сцинтилляторов при регистрации тяжёлых частиц с различной энергией. Была измерена величина взаимной засветки в фотоумножителях, которая составила $1,38 \cdot 10^{-2}$ от амплитуды вспышки.

Разработке математического обеспечения позволяющего работать с многопараметровой информацией как в режиме "on-line" так и в режиме "off-line" посвящен последний раздел главы 2.

В третьей главе приведены результаты исследований TOF-телескопов и PPAC на пучке ^4He (3,65 ГэВ/нукл) и определение эффективности и фона в ДМФ.

Был получен массовый спектр фрагментов, из которого следует, что массовое разрешение равно 8%. Использование двухмерного представления фрагментов детектируемых в PPAC в координатах ΔE -сигнал \times скорость позволяет хорошо разделять

фрагменты промежуточных масс и осколки деления в off-line анализе.

Определена эффективность регистрации фрагмента в ДМФ как функция Z фрагмента. Получены сечения образования лёгких фрагментов (в относительных единицах) в реакции мультифрагментации в зависимости от A фрагмента. Кроме того, определены скорости счёта фрагментов в ДМФ при двух значениях порога регистрации (равных удвоенной и утроенной амплитуде калибровочных α -частиц с энергией 5,4 МэВ).

Использовался двухстробовый режим при кодировании сигналов с фотоумножителей. Основной строб (задерживался на 1,1 мксек после TOF триггера) использовался для интегрирования сигнала на его максимуме, в то время как первый строб (задерживался на 0,5 мксек) для интегрирования на его фронте. Ширина строба 60 нсек. Была сделана следующая процедура для оценки фона в ДМФ. Двухмерный спектр с ФЭУ (Рис.2) поворачивался вокруг начала координат, а затем сдвигался вправо таким образом, чтобы окно, соответствующее истинным событиям стало параллельно оси ординат. После этого делалась проекция на ось X . В результате этой процедуры получалось экспериментальное распределение для фона вне области истинных событий. Описывая полученные данные распределением Гаусса, было получено количество случайных совпадений в окне отвечающем истинным событиям, которое составило 3-10%.

В четвёртой главе приведены результаты экспериментов с установкой "ФАЗА" при исследовании ^4He (3,65 ГэВ/нукл) + Au.

На рис.3 представлены спектры масс фрагментов при разном значении ассоциативной множественности в ДМФ. Хорошо видно наличие делительной компоненты в массовом спектре при отсутствии срабатываний в ДМФ. Распределение фрагментов промежуточной массы по A соответствует степенному закону $A^{-\tau}$ ($\tau = 2,6 \pm 0,6$). Измерены распределения по множественности фрагментов для разных порогов в ДМФ. Получена функция отклика ДМФ, что позволило сделать переход от измеряемого

распределения по ассоциативной множественности к распределению по множественности в событии, которое описывается законом Пуассона со средней множественностью $\langle M \rangle = 5,3 \pm 0,8$. На рис. 4 представлено сравнение экспериментального распределения по ассоциативной

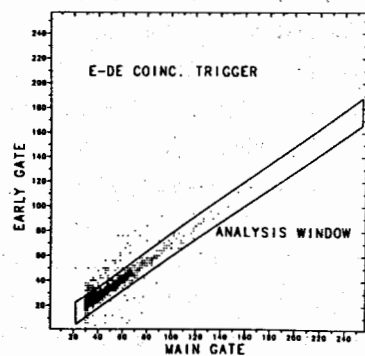
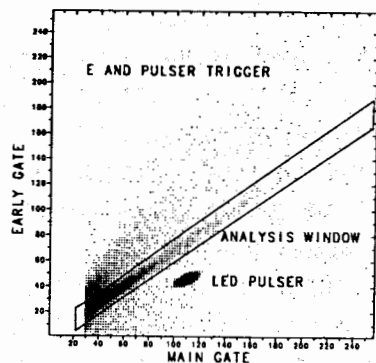


Рис.2. Двухмерные спектры с ФЭУ с координатами пропорциональными амплитуде сигнала на его максимуме и на его фронте. Верхний спектр соответствует запускам от Si(Au)-детектора (E-trigger) или запускам от светодиода (pulser trigger). Нижний спектр соответствует запускам от совпадений лавинного счётчика (DE) и Si(Au)-детектора в TOF-телескопе. Выделено окно, в которое попадают "истинные" события.

множественности с расчётными значениями. В правом верхнем углу на рис.4 показано распределение по множественности в событии.

Проведены расчёты корреляционной функции :

$R_{12}(\Delta\Phi) = \text{const} \cdot Y_{12}(\Delta\Phi) / Y_{12\text{mix}}(\Delta\Phi)$, где $Y_{12}(\Delta\Phi)$ - выход совпадений фрагментов с углом $\Delta\Phi$ между ними; $Y_{12\text{mix}}(\Delta\Phi)$ - генерируется путём использования фрагментов 1 и 2 из различных событий.

Найдено, что $R_{12}(\Delta\Phi)$ имеет минимум при $\Delta\Phi=0$. Показано, что эффект подавления скорости счёта для малых относительных углов между импульсами фрагментов возрастает с увеличением зарядов взаимодействующих частиц. Это указывает на то, что кулоновское взаимодействие в конечном состоянии между фрагментами ответственно за этот эффект. Количественное описание его позволит оценить время жизни ядерной системы,

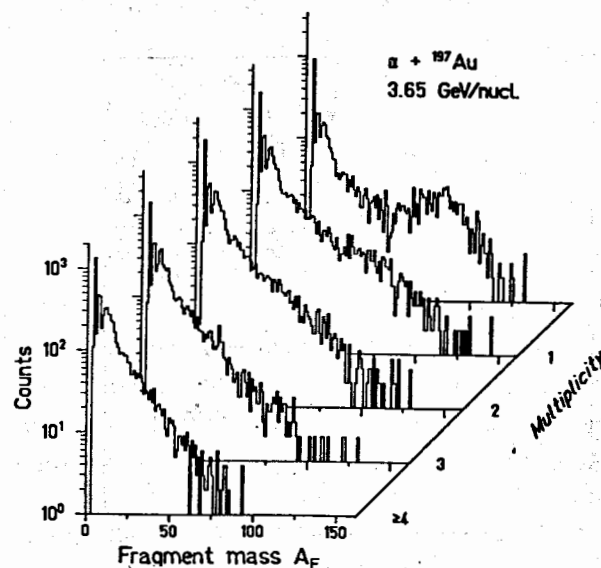


Рис.3. Спектры масс фрагментов при различных значениях ассоциативной множественности определяемой в ДМФ.

которое, повидимому, не более 10^{-21} с. Найдено также, что эффект подавления совпадений при малых углах уменьшается при наличии только двух фрагментов в событии. Следует ожидать, что энергия возбуждения системы, дающей 2 фрагмента заметно ниже, чем в случае распада на большее число фрагментов. Время жизни при меньшей энергии возбуждения больше, эффект подавления событий с малыми углами между фрагментами - слабее.

В заключении кратко сформулированы основные результаты, полученные в диссертации:

1. Разработана и создана 4 π -установка "ФАЗА", предназначенная для исследования процесса множественной эмиссии фрагментов промежуточной массы в ядро-ядерных соударениях. Установка состоит из ДМФ - детектора множественности фрагментов, 5 TOF-спектрометров фрагментов - триггеров установки и РРАС. ДМФ составлен из 53 сцинтилляционных счётчиков с плёночными

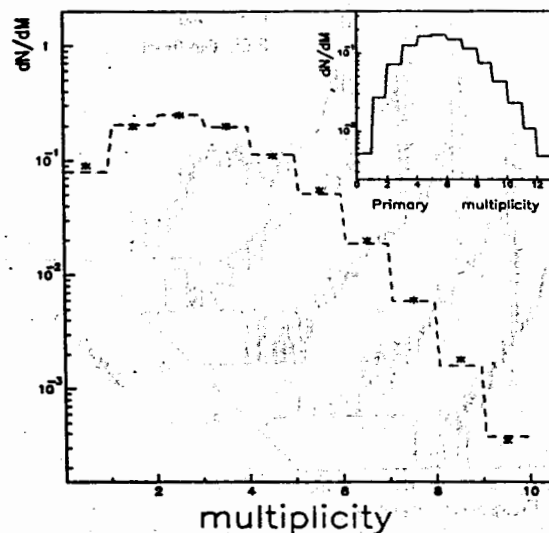


Рис. 4. Сравнение экспериментального распределения по ассоциативной множественности с расчётными значениями.

поликристаллическими сцинтилляторами CsI(Tl). TOF-телескопы дают полную информацию о триггерной частице (массовое число, скорость, энергия). С помощью ДМФ находятся распределения фрагментов по множественности, по углу вылета относительно пучка, угловые корреляции совпадающих фрагментов. РРАС вместе с пятью TOF-телескопами позволяет определять относительную скорость и относительный угол совпадающих фрагментов. Многопараметровая информация о событии мультифрагментации, получаемая с помощью установки "ФАЗА", позволит существенно продвинуться в понимании механизма этого процесса.

2. Исследованы характеристики сцинтилляционных счётчиков с плёночными CsI(Tl) большой площади и коническими световодами. Проведена оптимизация счётчиков для получения наилучшего разрешения.

3. Впервые исследована функция отклика поликристаллических сцинтилляторов CsI(Tl) при регистрации тяжёлых частиц с различными Z и энергиями. Для этого проведены специальные эксперименты на пучках циклотрона ИАЭ им. Курчатова И.В. Показано, что для поликристаллического CsI(Tl) зависимость удельного световыхода от энергии и заряда частиц (от He до N) такая же, как и для монокристалла, т.е. эффект "ионизационного тушения" не чувствителен к структуре сцинтиллятора.

4. Разработан двухстробовый метод измерения сигналов со счётчиков детектора множественности. Основной строб (60нс) используется для интегрирования сигнала в его максимуме, дополнительный строб (на 0,5 μ s раньше) измеряет сигнал на его фронте. Анализ получаемого двумерного спектра позволяет чётко выделить истинные события и существенно подавить фон случайных совпадений, связанный, в основном, с Черенковским свечением световодов в ореоле пучка.

5. Создана электронная система сбора информации установки "ФАЗА", которая включает около двух сотен аналоговых и

цифровых блоков. Полное число кодировщиков - 133. Событие мультифрагментации записывается в виде слова длиной 178 байт.

6. Разработано мат. обеспечение эксперимента :

программное обеспечение для on-line работы :

1) Мат. обеспечение для работы с программно управляемыми блоками КАМАК.

2) Мат. обеспечение для накопления данных во время эксперимента с возможностью мониторингования как одномерных, так и двумерных спектров.

программное обеспечение для off-line работы.

1) Мат. обеспечение, позволяющее реконструировать полученные в эксперименте одномерные и двумерные спектры.

2) Программа для вычисления относительных углов между фрагментами и построения корреляционной функции.

3) Программа для вычисления распределения по множественности в событии из измеренного распределения.

7. Проведены первые эксперименты с установкой "ФАЗА" на пучке ${}^4\text{He}$ синхрофазотрона ОИЯИ. Показано, что стабильность детекторов и электроники позволяет проводить длительные сеансы, необходимые для проведения систематических исследований процесса мультифрагментации.

8. Впервые получено распределение по множественности фрагментов для взаимодействия ${}^4\text{He} + \text{Au}$ при $E/A=3,65$ ГэВ/А. Ему отвечает среднее значение равное $5,3 \pm 0,8$.

9. Впервые измерены массовые спектры фрагментов при различных множественностях для ${}^4\text{He} + \text{Au}$ - взаимодействия при энергии α -частиц 3,65 ГэВ/А. Показано, что с увеличением множественности спектр существенно меняется : исчезает "делительный" пик, остаётся только экспоненциально спадающее распределение продуктов процесса мультифрагментации. Распределение фрагментов по массе для взаимодействия ${}^4\text{He}(3,65 \text{ ГэВ/А}) + \text{Au}$ может быть качественно описано

степенной функцией $A^{-\tau}$ ($\tau=2.6 \pm 0,6$), что согласуется с литературными данными.

10. Впервые измерены корреляции совпадающих фрагментов в функции относительного угла между ними, чувствительные к времени жизни горячего спектатора мишени.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах :

1. Avdeyev S.P., Karnaukhov V.A., Kuznetsov W.D., Petrov L.A. FASA - a device for investigation of multiple emission of intermediate mass-fragment in nucleus-nucleus interactions. Proceedings of XXIV Zakopane School on Physics, Poland (1989), p.129-130.
2. Авдеев С.П., Бочкарёв О.В., Василенко А.Т., Выдай Ю.Т., Карнаухов В.А., Кузнецов В.Д., Кузьмин Е.А., Муха И.Г., Петров Л.А., Толстой Н.С., Яньков Г.Б. "ФАЗА" - установка для исследования множественной эмиссии фрагментов промежуточной массы в ядро-ядерных взаимодействиях (конструкция, эксперименты на макете). Сообщение ОИЯИ (1989), Дубна, P7-89-29, с1-11.
3. Авдеев С.П., Карнаухов В.А., Карч В., Кузнецов В.Д., Выдай Ю.Т., Петров Л.А., Бочкарёв О.В., Кузьмин Е.А., Муха И.Г., Чулков Л.В., Яньков Г.Б. Плёночные сцинтилляторы CsI(Tl) большой площади. ПТЭ (1993), № 3, с104-108.
4. Авдеев С.П., Карнаухов В.А., Кузнецов В.Д., Петров Л.А. Дискретный сцинтилляционный монитор для пучков релятивистских ядер. ПТЭ (1993), № 1, с65-68.
5. Авдеев С.П., Карнаухов В.А., Кузнецов В.Д., Петров Л.А., Карч В., Ойшлер Х., Липс Ф., Барт Р. Электроника и программное обеспечение установки "ФАЗА". ПТЭ (1993), № 3, с104-108.
6. Avdeyev S.P., Karnaukhov V.A., Karcz W., Kuznetsov W.D., Petrov L.A., Bochkarev O.V., Kuzmin E.A., Tchulkov L.V., Yankov G.B., Vidaj Y.T., Neubert W., Oeschler H., Lips V., Barth R., Norbeck E. FASA - a 4 π detector setup for

- the investigation of target multifragmentation in nucleus-nucleus collisions. NIM A332 (1993), p149-164.
7. Lips V., Barth R., Oeschler H., Avdeyev S.P., Karnaukhov V.A., Kuznetsov W.D., Petrov L.A., Bochkarev O.V., Chulkov L.V., Kuzmin E.A., Karcz W., Neubert W., Norbeck E. Multifragmentation induced by relativistic α -projectiles studied with the 4π setup FASA. TH, Darmstadt (1993), IKDA 93/7, p1-11.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 сентября 1993 года.