

2692/94

ЛВЭ

# ДУБНА·1993

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

# 1993·DUBNA

# ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В 1993 году исполнилось 40 лет со времени основания Лаборатории высоких энергий. Основу научной программы в настоящее время составляют исследования взаимодействий релятивистских ядер. Эксперименты нацелены на поиск и изучение кварк-глюонных степеней свободы в ядрах и спиновых эффектов на пучках ускорительного комплекса синхрофазотрон — нуклотрон ЛВЭ [1] (рис.1) и других физических центров (SPS, RHIC, LHC).

В Лаборатории высоких энергий введен в действие первый сверхпроводящий ускоритель ядер на высокие энергии — нуклотрон. Он позволит получать пучки релятивистских ядер и многозарядных ионов с энергией до 6 ГэВ/нуклон. На новом ускорителе запланирована широкая программа исследований, основным направлением

которых является изучение особенностей атомных ядер, выходящих за рамки протон-нейтронной модели ядра, и построение физической картины ядерной материи на языке кварков и глюонов. Начало этим исследованиям было положено в 1971 г. на дубненском синхрофазотроне, когда впервые были получены пучки релятивистских дейтронов. В 1994 г. продолжатся работы по комплексу медленного вывода пучка из кольца нуклотрона и планируются первоочередные физические эксперименты на внутренней мишени нуклотрона.

Ввод в действие нуклотрона является крупным научно-техническим достижением коллектива ЛВЭ. Он имеет важнейшее значение для развития исследовательской базы ученых из стран-участниц ОИЯИ.

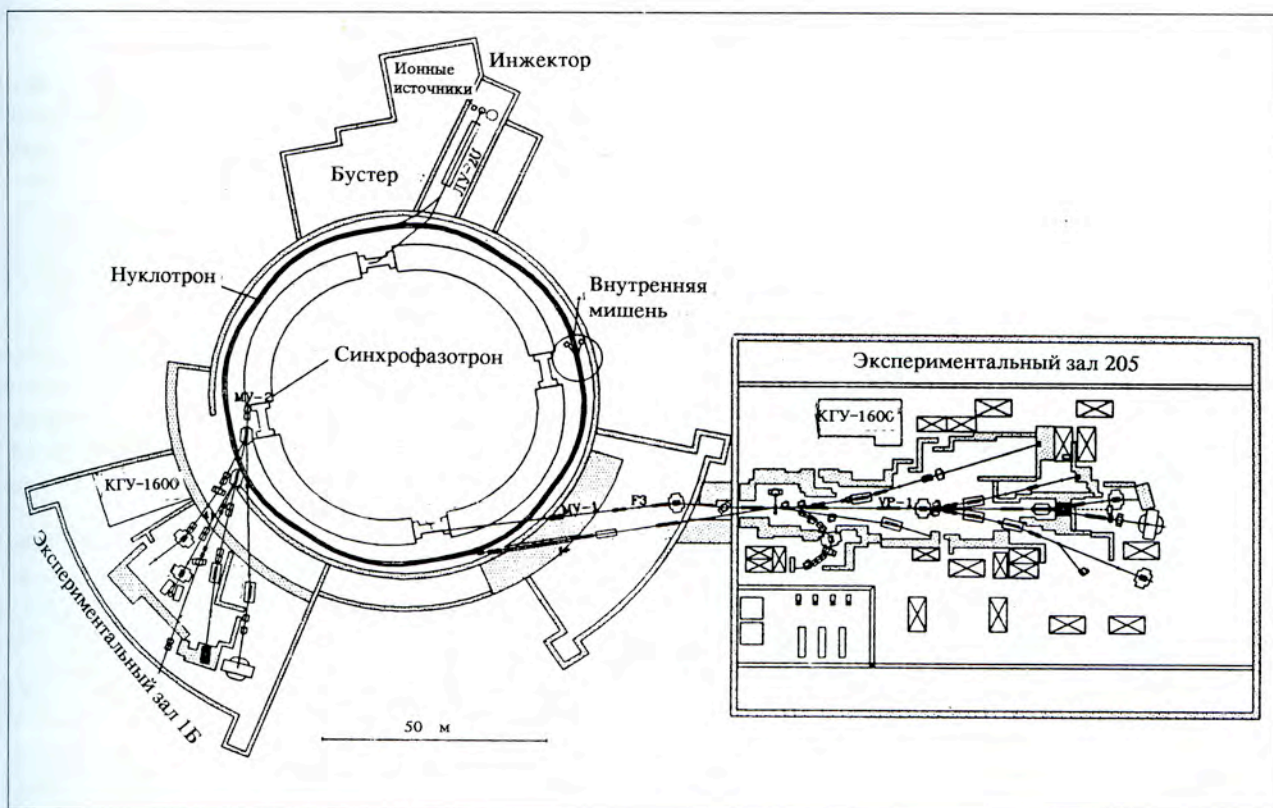


Рис. 1. План ускорительного комплекса ЛВЭ

Синхрофазотрон — знаменитый ускоритель, и ныне функционирующий, — по-прежнему привлекает физиков всего мира, заинтересованных в работе на пучках релятивистских ядер и поляризованных дейтронов [3]. Активная работа на пучках старой машины позволит сохранить сложившееся сообщество физиков и развитие экспериментальные установки к моменту полного ввода нуклотрона. При таком плавном переходе потенциал нового ускорителя будет использован для исследований с самого начала.

## РАЗВИТИЕ УСКОРИТЕЛЬНОЙ БАЗЫ

### НУКЛОТРОН

К концу 1992 г. кольцо нуклотрона было полностью собрано в технологическом тоннеле синхрофазотрона и прошло вакуумные испытания. Основной задачей в 1993 г. стала работа по адаптации ускорителя — сложного криогенного комплекса — для работы с внутренним пучком.

Кольцо нового ускорителя имеет периметр 251 метр и вес около 80 тонн. Магнитную систему синхротрона составляют 96 дипольных магнитов и 64 квадрупольные линзы, которые охлаждаются жидким двухфазным гелием. Основу криогенного комплекса составляют три ожигителя типа КГУ-1600/4,5 производительностью 500 литров в час [2,7].

17 марта было начато охлаждение кольца. За 100 часов во всех элементах были достигнуты температура 4,5 К, вакуум в камере ускорителя  $10^{-9}$ — $10^{-10}$  торр. Надежность работы системы криообеспечения составила свыше 98%. Полученный опыт позволяет рассчитывать на сокращение времени охлаждения примерно в два раза.

Диполи и линзы были запитаны постоянным током 90 А. Затем пучок дейтронов с энергией 5 МэВ/нуклон был инжестрирован в вакуумную камеру нуклотрона, и началась работа по проводке пучка. 26 марта зарегистрированы первые обороты пучка в кольце. В ходе этих работ в течение 12 часов успешно прошла испытания ускоряющая высокочастотная станция при напряжении 8 кВ, частоте 0,6 МГц.

С 26 июня по 6 июля состоялся второй сеанс работы на нуклотроне. С самого начала работы была получена устойчивая циркуляция пучка дейтронов при энергии инъекции 5 МэВ/нуклон и интенсивности около  $10^9$  в цикл. После дополнительной настройки магнитной системы время циркуляции превысило 100 мс при интенсивности не менее 80% от начальной. Затем были



Испытательный стенд систем вывода пучков из нуклотрона

отлажены параметры циклов питания магнитов и линз в динамическом режиме и настроен режим ускорения. В соответствии с программой сеанса достигнута энергия 200 МэВ/нуклон. Параметры пучка независимо контролировались как по показаниям с пикап-электродов, так и по свечению от взаимодействия пучка с веществом внутренних мишеней.

Физические группы спектрометра ядер отдачи и сотрудничества СФЕРА выполнили первые измерения спектров вторичных частиц от ядерных реакций, вызванных ускоренными дейтронами [4].

15 декабря завершился третий, длившийся тринадцать суток, сеанс адаптации нуклотрона. Этот сеанс, так же как и два предыдущих, оказался весьма успешным. Основные цели программы работы достигнуты. Получен ряд новых результатов по режимам работы нуклотрона:

- Впервые опробован режим инъекции и ускорения ядер углерода. В цикле длительностью более 0,6 секунды интенсивность ускоренного пучка составила  $10^9$  ядер/цикл.

## СИНХРОФАЗОТРОН

- Впервые получен, ускорен в линейном ускорителе и инжектирован в камеру нуклотрона пучок ионов  $^{84}\text{Kr}^{29+}$ .

- Опробованы в рабочем режиме две ускоряющие станции. Совместное их включение обеспечивает работу при темпе набора энергии, близкой к проектной.

- Основное внимание было уделено тщательной проверке и отладке защит магнитов и линз, питания их током и изучению различных режимов работы криомагнитной системы.

- Прошедший сеанс еще раз показал высокую надежность системы криогенного обеспечения нуклотрона и, что очень важно, повторяемость и воспроизводимость режимов настройки динамики пучков.

Итак, в 1993 г. удалось, привлекая внебюджетные средства, обеспечить проведение трех сеансов работы на нуклотроне общим объемом около 800 часов из запланированных 2000 часов. Вместе с тем их результаты позволяют сегодня вполне обоснованно планировать в 1994 г. физические эксперименты на внутренней мишени нуклотрона.

## ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ

### МНОЖЕСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СОУДАРЕНИЯХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

**Сотрудничество СФЕРА.** Одним из твердо установленных свойств спектров вторичных частиц, образованных при фрагментации ядер, является переход к асимптотическому поведению, начиная с энергии соударения около 4 А ГэВ, при которой достигается разность скоростей между сталкивающимися ядрами  $\Delta u = 2$ . При этом инвариантные дифференциальные сечения, представленные в зависимости от релятивистски-инвариантных масштабных переменных, становятся слабо зависящими от энергии соударения и типа сталкивающихся адронов и ядер.

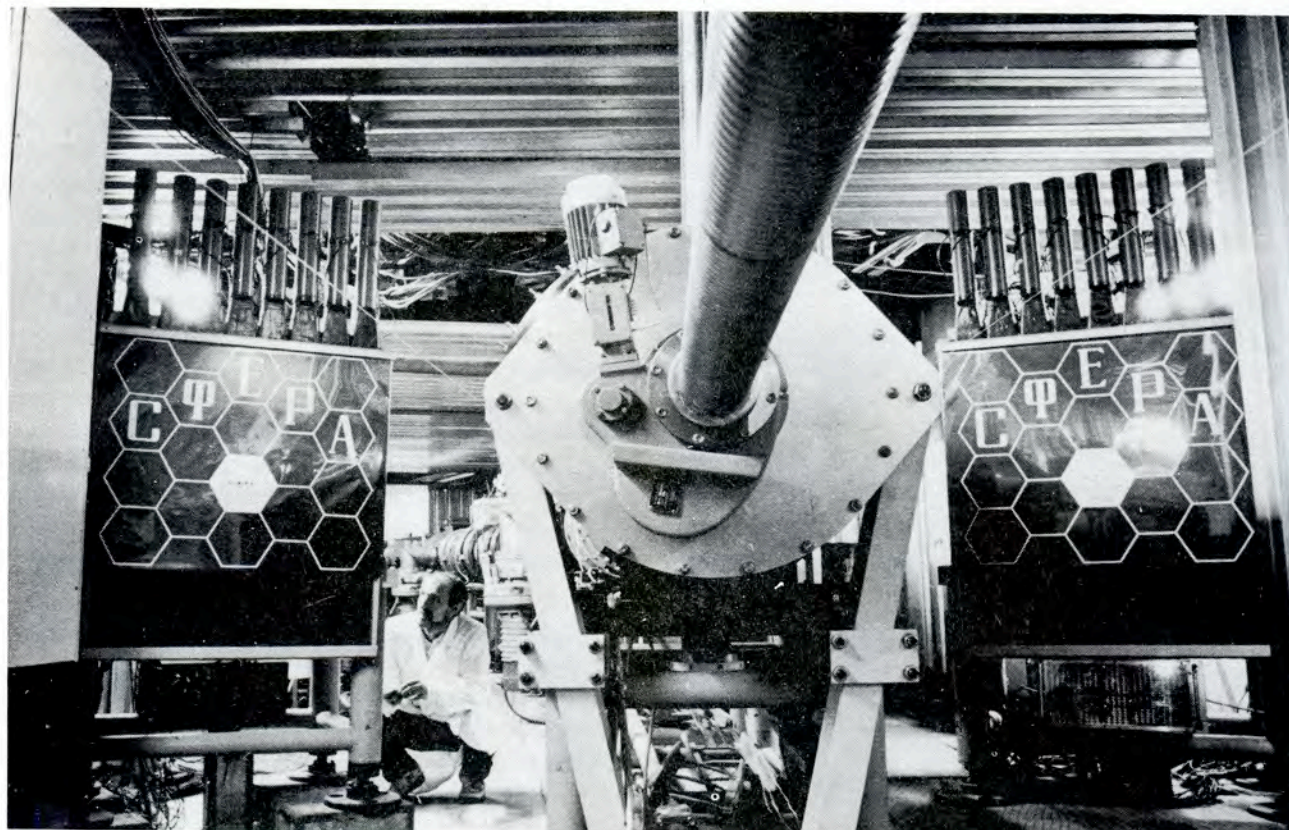
Картина предельной фрагментации должна быть подвергнута систематической проверке в ядро-ядерных соударениях при одновременном измерении множественности вторичных частиц. Это дает возможность сравнить инклюзивные спектры вторичных частиц при различных степенях неупругости реакции и приступить к интерпретации процессов ядро-ядерных соударений в терминах числа взаимодействовавших нукло-

В январском сеансе работы на синхрофазотроне впервые были ускорены ядра серы до энергии 3,65А ГэВ [6]. Источником ядер служил электронно-лучевой ионизатор «Крион-С». Интенсивность пучка на выходе линейного ускорителя-инжектора составила  $(3\div 5) \cdot 10^6$  ядер в цикл, а ускоренного до максимальной энергии —  $(3\div 4) \cdot 10^3$ . Для уменьшения потерь пучка в камере синхрофазотрона использована система криогенной откачки, охлаждаемая жидким гелием от штатного гелиевого ожижителя нуклотрона. Физическая программа сеанса включала облучение пластиковых трековых детекторов в рамках соглашения с Университетом в Зигене (ФРГ), фотоэмульсионных камер, а также мишеней для Университета в Марбурге (ФРГ).

Интерес к пучкам ускорительного комплекса ЛВЭ возрос в 1993 г. и в связи с проработкой ядерно-физических аспектов электроядерного метода генерации энергии и трансмутации радиоактивных отходов [9]. Обзор экспериментальных результатов и концепция гибридной энергоцентрали «ускоритель + реактор» даны в последней работе проф. К.Д.Толстова [8].

нов, прицельного параметра соударения и других параметров, соотносящихся с теоретическими моделями. В частности, полуэксклюзивный подход дает дополнительную возможность проверить идеи о кварковой природе механизма генерации кумулятивных  $\pi$ -мезонов по экспериментальной оценке длины формирования пионов или параметров цветовой прозрачности ядерной материи.

Зависимость от ядра-мишени фрагментации ядер углерода с импульсом 4,5А ГэВ/с была изучена для пионов, рожденных под нулевым углом с импульсами  $P_z^{\pi^-} > 3$  ГэВ/с, или  $X_I > 1$  ( $X_I \approx P_z^{\pi^-} / P_{\text{beam}}$ ), на переднем спектрометре установки СФЕРА [10—12]. Это соответствует процессу, когда более чем один нуклон передает свою кинетическую энергию пиону. Не наблюдается значительных эффектов изменения формы спектров для  $CC$ -,  $CPb$ - и  $CP$ -соударений по отношению к инклюзивным спектрам, несмотря на рост множественности реакции (рис.2). Возможно, это проявление цветовой прозрачности ядерной среды для кумулятивных пионов, произошедших от «сверхбыстрых» кварков.



Подготовка электромагнитного калориметра СФЕРА к эксперименту на внутренней мишени нуклотрона

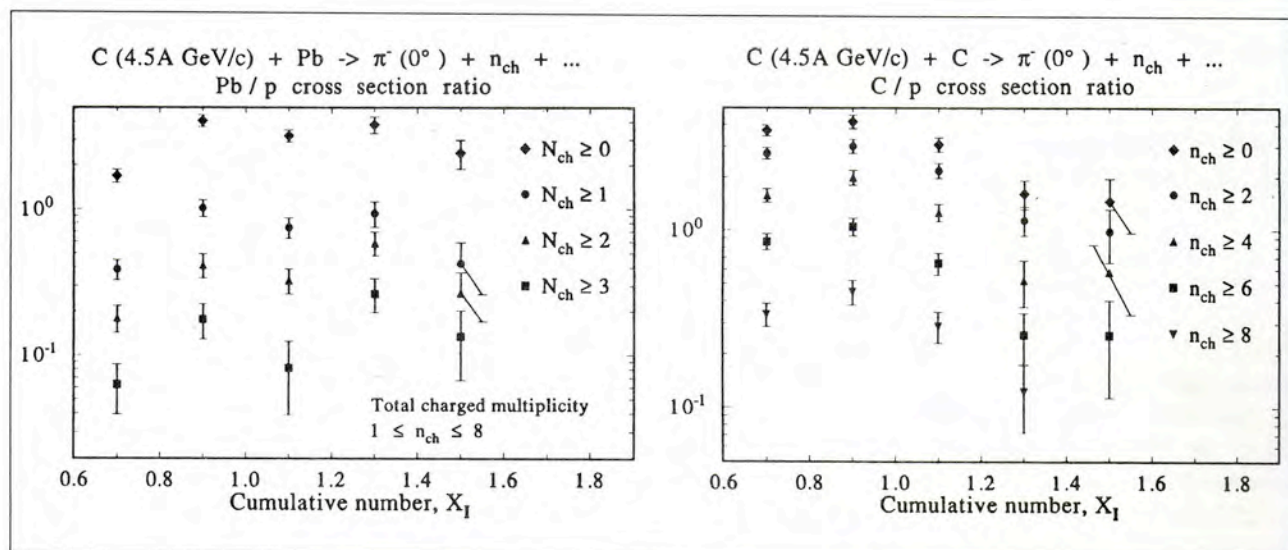


Рис. 2. Отношение спектров пионов от фрагментации ядер углерода на свинце и углероде к инклюзивному спектру на мишени из водорода при различных ограничениях на жесткую зарядовую множественность реакции  $N_{\text{ch}}$  ( $P_T > 600$  МэВ/с для протонов) [12]. Экспериментальные данные с переднего спектрометра установки СФЕРА

Во время июльского сеанса группами СФЕРА и СЯО выполнены первые измерения продуктов ядерных реакций на внутренней мишени нуклотрона (рис.3). Пучок дейтронов был ускорен до энергии 200 МэВ/нуклон [4,14], и с помощью

$\Delta E-E$  методики были идентифицированы вторичные протоны и дейтроны (рис.4).

Сотрудничеством СФЕРА и группой ИЯИ РАН создается многоканальный электромагнитный калориметр на кольце нуклотрона для

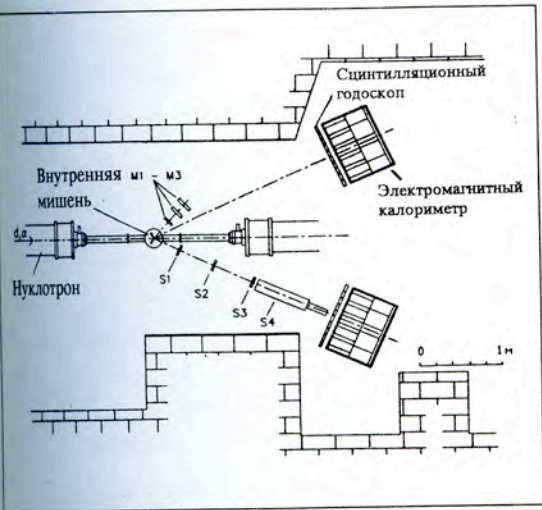


Рис. 3. Схема расположения на внутреннем пучке нуклотрона двухплечевого электромагнитного калориметра и  $\Delta E-E$  телодоскопа

изучения энергетических зависимостей рождения псевдоскалярных и векторных мезонов в ядро-ядерных взаимодействиях. Предполагается исследовать процессы, в которых флутоны из двух сталкивающихся ядер играют доминирующую роль (дважды кумулятивный эффект) [5,13], в частности подпороговое образование  $J/\psi$ -,  $\rho$ -,  $\omega$ -,  $\varphi$ -,  $\eta$ -,  $K$ -мезонов и лептонных пар в ядро-ядерных соударениях.

**Эксперимент ФОТОН-МАССЕР.** Обработаны и проанализированы экспериментальные данные по инклюзивному образованию  $\pi^0$ -мезонов в реакциях  $C + (C, Cu) \rightarrow \pi^0 + X$  при импульсе 4,5А ГэВ/с (рис.5). Получено инвариантное сечение инклюзивного образования  $\pi^0$ -мезонов в зависимости от кумулятивного числа  $X$  и поперечного импульса  $P_{\perp}^2$ . Цель исследований — получение новой информации о механизме кумулятивного эффекта в процессах рождения адронов в ядро-ядерных взаимодействиях. Особенностью данной постановки является возможность измерения в одном эксперименте  $\pi^0$ -мезонов в широком интервале поперечных импульсов. Для области фазового объема  $E_{\pi^0} \geq 2$  ГэВ,  $\theta_{\pi^0} \leq 16^\circ$  (л.с.) измерены инвариантные сечения образования  $\pi^0$ -мезонов в зависимости от  $P_{\perp}^2$  и кумулятивного числа  $X$  в пределах  $0,1 \leq P_{\perp}^2 \leq 0,8$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> и  $1,0 \leq X \leq 2,0$ . Для указанных интервалов зависимость инвариантного сечения от атомной массы ядра-мишени представлена в виде  $\sigma \sim A_T^n$ . Среднее значение показателя степени составляет

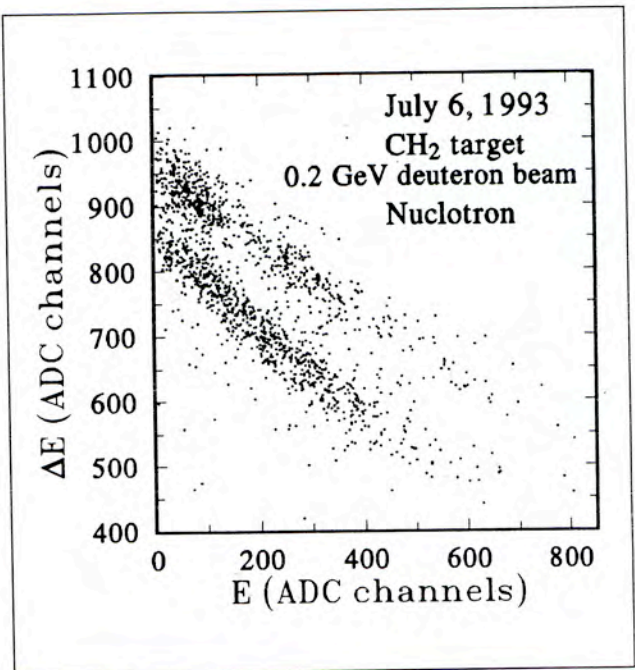


Рис. 4. Спектр  $\Delta E-E$  вторичных частиц от ядерных реакций во внутренней мишени нуклотрона [14]

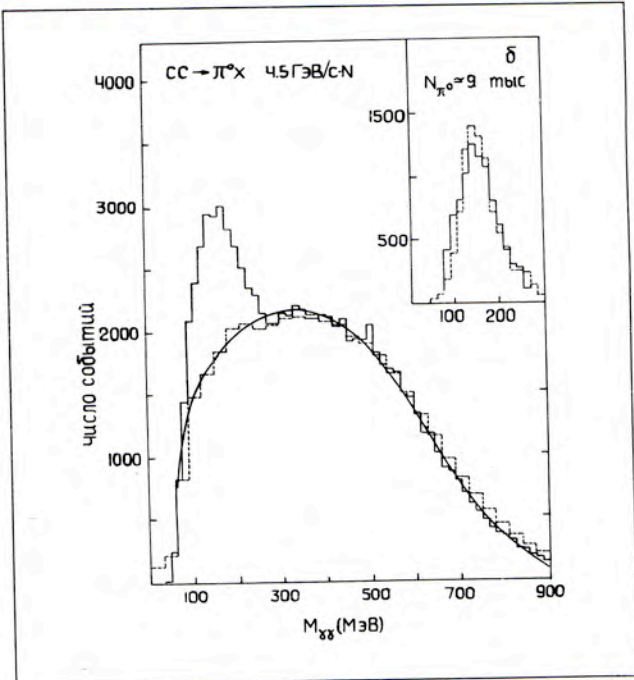


Рис. 5. Спектр инвариантных масс пар  $\gamma$ -квантов, зарегистрированных в углерод-углеродных взаимодействиях при 4,5 А ГэВ/с. Виден отчетливый вклад от распадов  $\pi^0$ -мезонов. (Обработка данных с установки ФОТОН-МАССЕР)

$n = 0,36 \pm 0,02$ . Из анализа данных для реакций  $C + A_T \rightarrow \pi^0 + X$  и  $\alpha + A_T \rightarrow \pi^0 + X$  определена зависимость инвариантного сечения от атомной

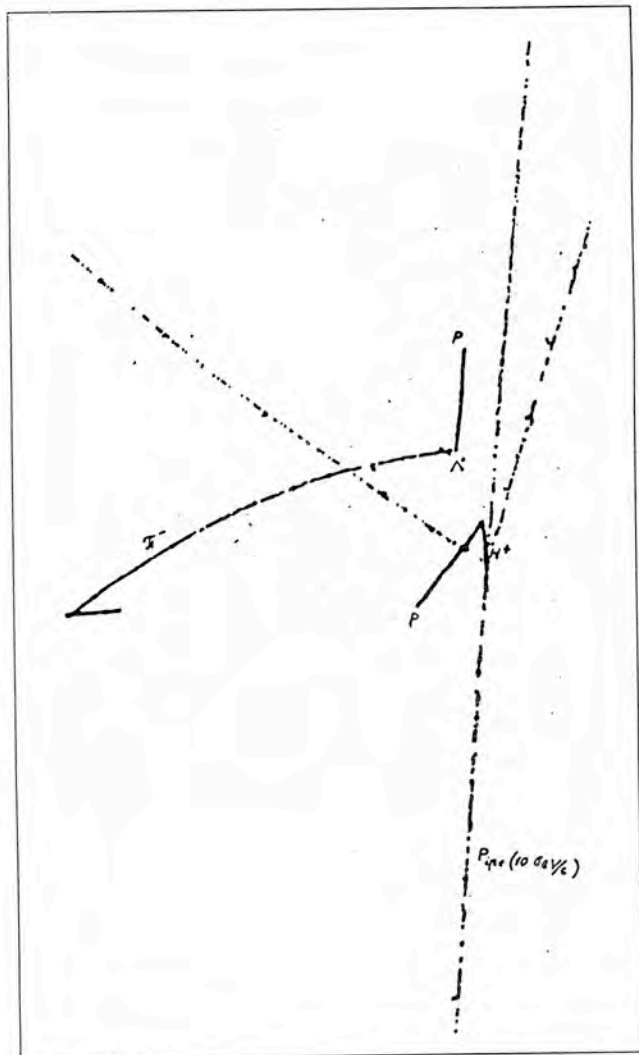


Рис. 6. Еще одно событие, интерпретируемое как стабильный дибарион  $H^+$ , идентифицировано на материале с пропановой пузырьковой камеры

массы ядра-снаряда. Наблюдается сильная зависимость степени  $m$  ( $\sigma \sim A_B^m$ ,  $A_B = \alpha, C$ ) от  $X$ :  $m \cong 1,0$  при  $X \sim 1$  и достигает значения  $m \cong 2,0$  при  $X = 1,9$ .

**Поиск стабильных дибарионов.** На материале с пузырьковой пропановой камеры обнаружено еще два события, содержащих кандидатов в стабильные положительные дибарионы со странностью  $S = -2$  и массой около  $(2392,6 \pm \pm 23,6)$  МэВ/с (рис.6). Продолжительности жизни по модам слабого распада  $H^+ \rightarrow p + \pi^0 + \Lambda$ ,  $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ ,  $H^+ \rightarrow p + \Lambda$ ,  $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$  составляют в этих событиях 0,26 и более 0,047 нс соответственно [21,22].

**Сотрудничество ГИБС.** В 1993 г. на установке ГИБС продолжались исследования возбуждения  $\Delta$ -изобары [19] в реакции  $Mg(t, {}^3\text{He})$ . Ввиду

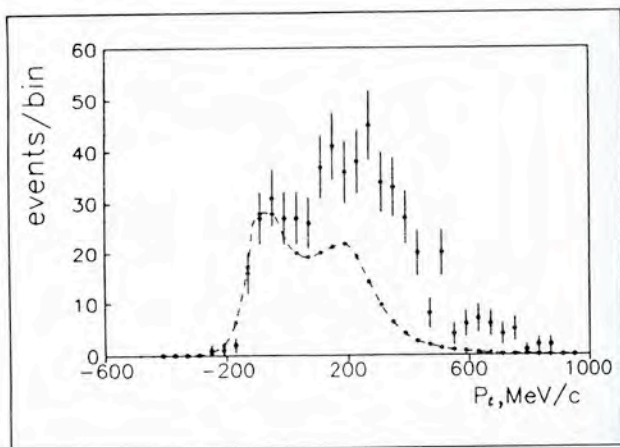


Рис. 7. Спектры продольных импульсов пионов —  $P_{\pi^+}^l$  со стримерной камеры ГИБС: ● — эксперимент, × — расчет для рождения изобары на квазисвободном нуклоне в ядре магния. Энергия связи  $\Delta$ -изобары в ядре Mg оценена в 40 МэВ [20]

сложности процесса необходимо не только выявить все возможные каналы реакции, но и оценить интенсивность каждого. Стримерная камера ГИБС является 4 $\pi$ -детектором, обеспечивающим преимущество для решения этой проблемы — получение неискаженных спектров без введения модельно зависимых поправок.

В [20] оценена вероятность рождения  $\Delta$ -изобары на квазисвободном нуклоне ядра-мишени. С этой целью сравнивались спектры продольных импульсов пионов, полученные в эксперименте и рассчитанные в предположении квазисвободного рождения  $\Delta$ -изобары. Ожидалось, что в канале с одним  $\pi^-$ -мезоном ( $t + Mg \rightarrow {}^3\text{He} + \pi^- + \dots$ ) квазисвободные  $\Delta$ -изобары могут составить до 90%. Оказалось, однако, что в этом канале (вероятность самого канала с одним  $\pi^-$  равна  $0,380 \pm 0,016$ ) не более 50% пионов рождены распадом квазисвободной изобары (рис.7). Неожиданно также и то, что правую часть пионного спектра нельзя описать известными механизмами реакции (предварительный результат).

## СТРУКТУРА МАЛОНУКЛОННЫХ СИСТЕМ

На синхрофазотроне ОИЯИ в 1993 году было проведено два сеанса с пучками поляризованных дейтронов. Экспериментальные исследования на пучке векторно и тензорно поляризованных дейтронов провели три группы физиков: коллаборация АЛЬФА (ОИЯИ — Болгария — Россия — Украина — США), коллаборация АНОМАЛОН (ОИЯИ — Польша — Россия — Япония) и группа СМС МГУ (Россия). Впервые интенсивность пучка достигла  $5 \cdot 10^9$  дейтронов в цикл, что поз



Профессор Ч.Пердрисат (СЕБАФ) обсуждает предварительные результаты сеанса на поляризованных дейтронах с участниками коллаборации АЛЬФА из США, России и Украины

волило выполнить основную часть запланированных измерений. Участники экспериментов из США и Японии внесли финансовый вклад в проведение этих измерений, работы поддерживались также Российским фондом фундаментальных исследований.

В сентябре в Дубне был проведен Международный симпозиум «Дейтрон-93», посвященный исследованию структуры дейтрона на малых межнуклонных расстояниях.

**Сотрудничество АЛЬФА.** Коллаборация АЛЬФА занимается исследованием структуры легких ядер на малых расстояниях, где ненуклонные степени свободы могут играть существенную роль [24,26,27]. 1993 год был, в основном, посвящен изучению дейтрона на поляризованных дейтронных пучках синхрофазотрона ОИЯИ и SATURNE (Сакле, Франция) [25] в рамках коллаборации физиков из Болгарии, Испании, Канады, России, США, Украины, Франции.

В Дубне были измерены [23] анализирующие способности  $T_{20}$  в упругом  $dp$ -рассеянии назад,  $p(d,p)d$ , в диапазоне внутренних импульсов  $k = 0,35 \pm 0,8$  ГэВ/с, и в реакции фрагментации дейтрона на водороде,  $p(d,p)X$ , в диапазоне  $k = 0 \pm 0,8$  ГэВ/с. В Сакле было изучено поведение

$T_{20}$  и коэффициента передачи поляризации от дейтрона к протону в реакции  $p(d,p)d$  при меньших энергиях.

В импульсном приближении в предположении о наличии в дейтроне только  $S$ - и  $D$ -волн упомянутые поляризационные характеристики имеют одинаковые выражения для обеих реакций. Сечение для реакции фрагментации пропорционально квадрату волновой функции дейтрона  $\Phi^2$ , а для реакции упругого дейтрон-протонного рассеяния назад —  $\Phi^4$ .

Значения квадратов волновых функций дейтрона, извлеченных ранее из экспериментальных данных по сечениям реакций упругого рассеяния назад (мировые данные) и развала дейтрона (Дубна), хорошо совпадают друг с другом. Однако более чувствительные поляризационные характеристики показывают заметную разницу в поведении для двух упомянутых реакций (на сегодняшний день пока только для  $T_{20}$ ) (рис.8). Если данные по  $T_{20}$  в реакции фрагментации на водороде, так же как и опубликованные ранее данные в реакции на углероде, при больших  $k$  имеют тенденцию плавного выхода на асимптотику, предсказанную в рамках КХД, то аналогичные данные



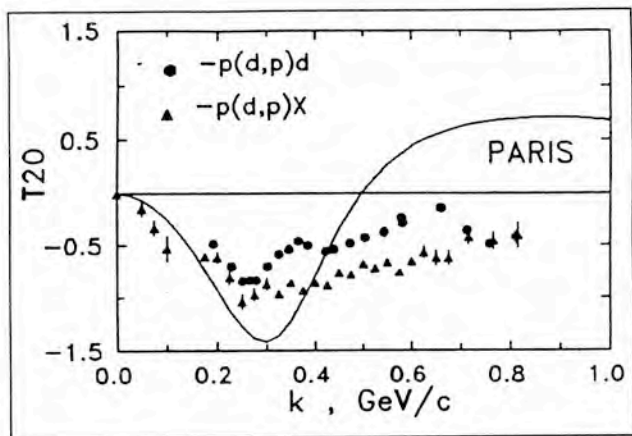


Рис. 8. Данные сотрудничества АЛЬФА по тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  в реакции дейтрон-протонного упругого рассеяния назад  $p(d, p)d$ , полученные в 1993 г. в Дубне и Сакле, и в реакции фрагментации дейтрона на водороде  $p(d, p)X$ , полученные в октябре 1993 г. в Дубне [25]. Сплошная линия — предсказания парижского  $NN$ -потенциала в импульсном приближении

в реакции упругого  $dp$ -рассеяния имеют тонкую структуру в диапазоне  $k = 0,2+0,75$  ГэВ/с, и только в интервале  $k = 0,75+0,8$  ГэВ/с возможна та же тенденция, что и в реакции фрагментации. Обнаруженный эффект ранее не был предсказан.

Было продолжено измерение коэффициента передачи поляризации от дейтрона к протону в реакции фрагментации дейтрона на углероде; верхний предел по внутреннему импульсу поднят до  $k = 0,58$  ГэВ/с.

В процессе проведения упомянутых экспериментов было осуществлено пробное измерение  $T_{20}$  в неупругой реакции  $p(d, d')X$  под нулевым углом в области передач энергий, достаточных для рождения одного или двух пионов и возбуждения нуклонных резонансов:  $\Delta$  и  $N(1440)$ . Была обнаружена заметная чувствительность этой реакции к тензорной поляризации дейтрона: ее анализирующая способность  $T_{20} \sim -0,4$ .

В 1994 году планируются:

- измерения  $T_{20}$  в реакции упругого  $dp$ -рассеяния назад в окрестности  $k \approx 0,6$  ГэВ/с (для уточнения тонкой структуры) и продвижение к рекордным значениям внутреннего импульса, до  $k \approx 0,9$  ГэВ/с (для подтверждения выхода на асимптотику);
- измерения  $T_{20}$  в реакции  $H(d, d')X$  с целью выяснения механизма рождения резонансов;
- измерение коэффициента передачи поляризации от дейтрона к протону в реакции фрагментации дейтрона с выходом на значение внутреннего импульса, близкого к 0,7 ГэВ/с.

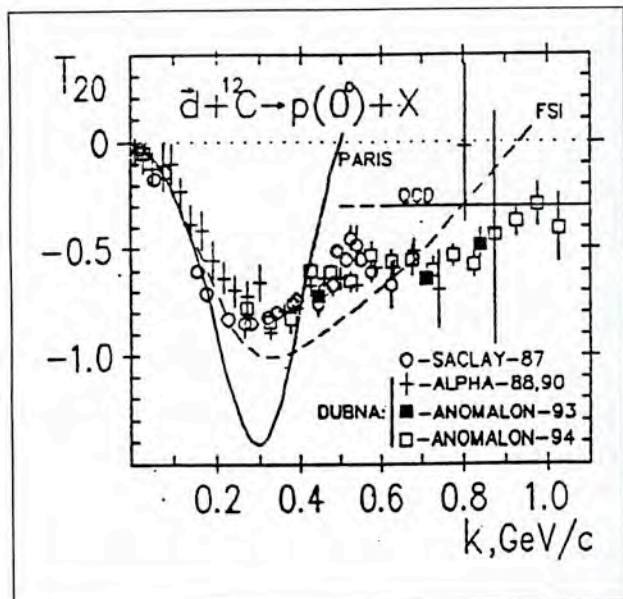


Рис. 9. Результаты с установки АНОМАЛОН по  $T_{20}$

**Установка АНОМАЛОН.** Коллаборация АНОМАЛОН проводит исследования спиновой структуры дейтрона в области кора дейтрона, т.е. при больших относительных импульсах нуклонов в дейтроне. Исследования базируются на использовании пучка поляризованных дейтронов ЛВЭ с импульсом до 9 ГэВ/с и широкоапертурного поляриметра АНОМАЛОН для измерения поляризации протонов от развала дейтронов [28—32].

В 1993 г. завершена обработка данных по измерению коэффициента передачи поляризации  $k$  в реакции стриппинга релятивистских поляризованных дейтронов при внутренних импульсах до  $k = 550$  МэВ/с (рекордное на сегодня значение  $k$  в экспериментах такого типа). Совместно с японской группой из университетов г. Нагоя и г. Миядзаки проведен сеанс по измерению тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  этой реакции на углеродной мишени. В измерении  $T_{20}$  удалось продвинуться до  $k = 1$  ГэВ/с, что соответствует кинематическому пределу в реакции рассеяния дейтрона на протоне (при 8,7 ГэВ/с) (рис.9).

В импульсном приближении анализ поведения  $T_{20}$  и  $k$  при высоких значениях  $k$  позволяет выделить вклад  $S$ - и  $D$ -состояний в волновую функцию дейтрона (DWF) в области кора и получить экспериментальную основу для разработки способов учета релятивистских эффектов в DWF. Однако, как показывает сравнение результатов расчетов и эксперимента, упрощенные модельные подходы, основанные на рассмотрении только спектаторного механизма и игнорирующие взаимодействия в конечном состоянии и

кварковые степени свободы, не в состоянии объяснить поведение спиновых наблюдаемых при больших значениях внутриднейтронных импульсов.

**Водородная пузырьковая камера.** В течение 1993 г. продолжались обработка и накопление данных по эксперименту в пучке векторно поляризованных дейтронов на установке УПК. Проводился анализ результатов по  $Op$ -,  $Ne$ - и  $d$ -экспериментам (рис.10) [33,34]. Сделано сравнение топологий выхода вторичных фрагментов в кислород-протонных взаимодействиях с каскадной фрагментационно-испарительной моделью (КФИМ). Наблюдаются существенные расхождения, свидетельствующие о несовершенстве модели. В том же эксперименте получены новые данные по относительному выходу изотопов легких ядер при фрагментации ядра кислорода.

Изучались дейтрон-дейтронные и протон-протонные корреляции во взаимодействиях ядер гелия с протонами [35]. Сильные пространственные корреляции между вылетающими протонами при малых относительных импульсах согласуются с теоретическими расчетами в предположении их независимого испускания. Характерные пространственные размеры гауссова источника составили около  $(1,0 \pm 0,2)$  фм для ядра  ${}^4\text{He}$  и  $(1,5 \pm 0,2)$  фм для ядра  ${}^3\text{He}$ .

**Установка ДИСК.** Получены предварительные результаты обработки по импульсным и угловым спектрам кумулятивных  $\pi^+$ -мезонов и протонов в реакции  $pD \rightarrow \pi^+ X$  для импульсов налетающего протона  $k_p = 4,45$  и  $k_p = 8,9$  ГэВ/с и углов регистрации  $\theta = 90^\circ$  и  $\theta = 168^\circ$  [36]. Установлено, что скейлинговое поведение (независимость параметра наклона от энергии в переменной Ставинского) рождения вторичных пионов на ядрах дейтерия в кумулятивной области ( $X > 1$ ) наблюдается уже при импульсе начального протона  $k_p = 4,45$  ГэВ/с, что значительно раньше, чем для тяжелых ядер.

Проверена гипотеза о факторизации сечения в переменных  $X, \theta$  в кумулятивной области. Установлено, что в этих переменных имеется приближенная факторизация сечения, и определен параметр наклона  $\langle X \rangle^{-1} = 9,9 \pm 0,9$ . В импульсном спектре  $\pi^+$ -мезонов процесса  $pD \rightarrow \pi^+(90^\circ)X$  при  $k_p = 4,45$  ГэВ/с обнаружен наплыв. Предполагается, что он связан с рождением  $\Delta$ -изобары. Получен импульсный спектр рождения протонов в реакции  $pD \rightarrow p(90^\circ)X$  при  $k_p = 4,45$  ГэВ/с. Сравнение с результатами расчетов в рамках релятивистского импульсного приближения показало, что спектаторный механизм доминирует в жесткой части спектра ( $q > 0,7$  ГэВ/с) и суще-

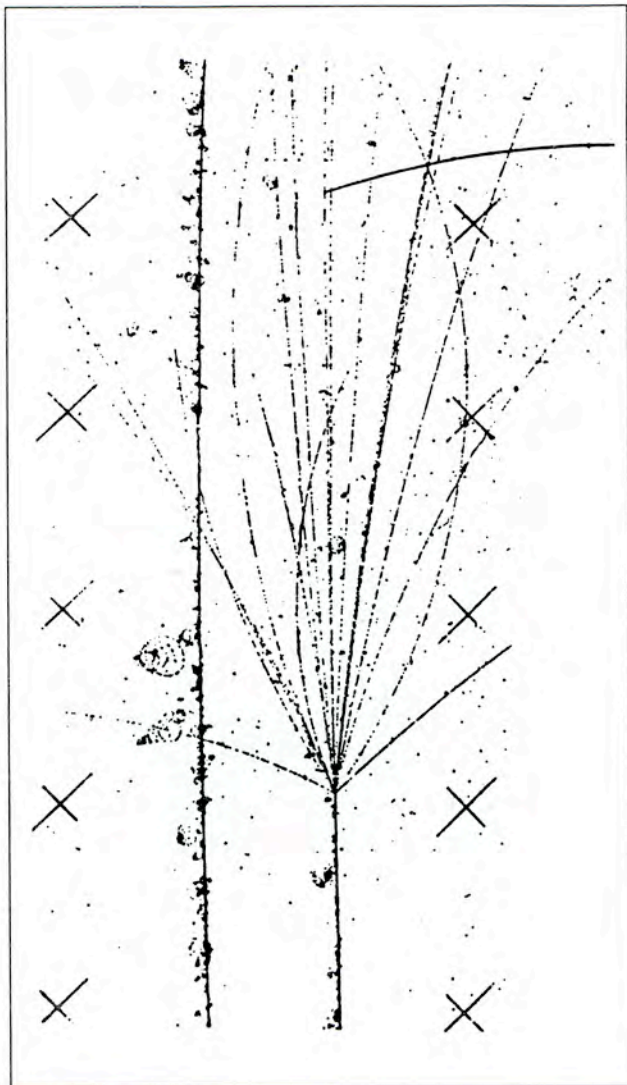


Рис. 10. Полная фрагментация ядра фтора на протоне в водородной пузырьковой камере

нен вклад неспектаторного механизма в мягкой части спектра ( $q < 0,7$  ГэВ/с).

Рассмотрен процесс глубоконеупругого рассеяния поляризованных мюонов на векторно поляризованных дейтронах в рамках ковариантного подхода в переменных светового конуса [37—41]. На основе релятивистской волновой функции дейтрона с одним нуклоном на массовой оболочке вычислена спинзависимая структурная функция  $g_1^D(x, Q^2)$ . Показано, что эффект релятивистского ферми-движения, описываемый отношением структурных функций  $R_g^{D/N} = g_1^D/g_1^N$  в области  $x = 10^{-3} \pm 0,7$ ,  $Q^2 = 1 \div 80$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> составляет  $\sim 9\%$ . Получена оценка ядерной поправки  $(\delta S_{Bj}/S_{Bj} \sim \sim 11 \div 16\%)$  для интеграла Бьеркена  $S_{Bj}(x, Q^2)$ . Результаты расчетов  $g_1^D(x, Q^2)$

сравниваются с экспериментальными данными коллаборации SMC. Обосновывается, что ядерный эффект должен учитываться при извлечении спинзависимой структурной функции нейтрона  $g_1^n(x, Q^2)$  из данных по  $g_1^p$  и  $g_1^D$ . Рассмотрен процесс глубоконеупругого рассеяния лептонов на неполяризованном дейтроне в рамках ковариантного подхода в переменных светового конуса. В релятивистском импульсном приближении вычислена структурная функция  $F_2^D(x, Q^2)$ . С использованием релятивистской функции дейтрона из экспериментальных данных по протону и дейтрону извлечена нейтронная структурная функция  $F_2^n(x, Q^2)$ . Показано, что эффект релятивистского ферми-движения в дейтроне достигает  $\sim 6\%$  при  $x = 0,7$ . Извлеченная структурная функция нейтрона  $F_2^n(x, Q^2)$  использовалась для проверки правила сумм Готтфрида. Установлено, что основной вклад в интеграл Готтфрида  $S_G(x, Q^2)$  вносит область больших  $x$  и малых  $Q^2$ . С ростом  $Q^2$  величина  $S_G(x, Q^2)$  уменьшается, что противоречит простой кварк-партоновой модели.

Подготовлено дополнение к поляризационной программе по исследованию ядерных хромодинамических эффектов при взаимодействии поляризованных протонов с ядрами на сооружаемом коллайдере RHIC [42, 43].

## РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

**Внутренняя мишень нуклотрона.** Линейный участок нуклотрона со станцией внутренних мишеней представляет собой автономную физическую установку со своей независимой системой вакуумной откачки. При этом она может функционировать и как элемент ионопровода нуклотрона, и независимо от него при выключенном ускорителе. Независимая вакуумная откачка и съемная конструкция станции позволяют достаточно оперативно менять функциональные возможности этой установки, без воздействия на вакуумную и криогенную системы остальных участков нуклотрона. При этом могут быть осуществлены монтаж очередной партии мишеней или образцов, подлежащих облучению на внутреннем пучке нуклотрона, а также полная замена станции для другого физического эксперимента. Таким образом, на данной установке возможно использование различных типов внутренних мишеней (фольговых, нитевидных, струйных, пучковых и др.), испытание новых методов диагностики пучка, а также проведение определенного класса экспериментов, аналогичных проводи-

мым на выведенном пучке в геометрии, близкой к  $4\pi$ -геометрии.

Станция внутренних мишеней [14], используемая в первом эксперименте на нуклотроне, выполнена в виде двух пересекающихся цилиндров ионопровода и цилиндра с тремя мишенями, имеющего больший диаметр. Габариты станции, ее конструкция и толщина стенок (0,5 мм) оптимизированы для регистрации вторичных частиц внешними детекторами при максимально возможном телесном угле и с минимальными потерями. Фольговые мишени из  $\text{CH}_2$  (толщиной 1,6 мкм),  $\text{Cu}$  (0,55 мкм) и  $\text{Au}$  (1,7 мкм) подвешены на кварцевых нитях диаметром 9 мкм в С-образных рамках, закрепленных вертикально на вращающемся с помощью шагового двигателя столике. Вывод всех рамок с мишенями из ионопровода, поиск необходимой для эксперимента мишени, а также контроль ее пространственного положения по отношению к оси ионопровода осуществляются с помощью электронно-оптического устройства, связанного с осью вращения столика и электронной системой управления двигателем. Это позволяет дистанционно и в нужный по отношению к началу цикла ускорения ионов момент времени вводить мишень в пучок на контролируемые глубину и время экспозиции.

Для контроля интенсивности и времени жизни  $t$  части пучка, взаимодействующей с мишенью, в эксперименте использовалось излучение материала мишени под воздействием ионов. Излучение регистрировалось через смотровое окно фотоэлектронным умножителем, а в вакууме — вторично-электронным умножителем на базе микроканальных пластин (ВЭУ-7). Полученные осциллограммы отражают временную структуру пучка, а спад интенсивности во времени хорошо согласуется с теоретическими оценками для используемых мишеней и энергии дейтронов ( $E = 100$  МэВ/нукл.,  $t_{\text{CH}_2} = 17$  мс,  $t_{\text{Cu}} = 1$  мс). При отладке режима ускорения нуклотрона (при отсутствии мишеней в ионопроводе) эпизодически наблюдались сигналы излучения, соответствующие попаданию части пучка на стенку ионопровода мишенной станции.

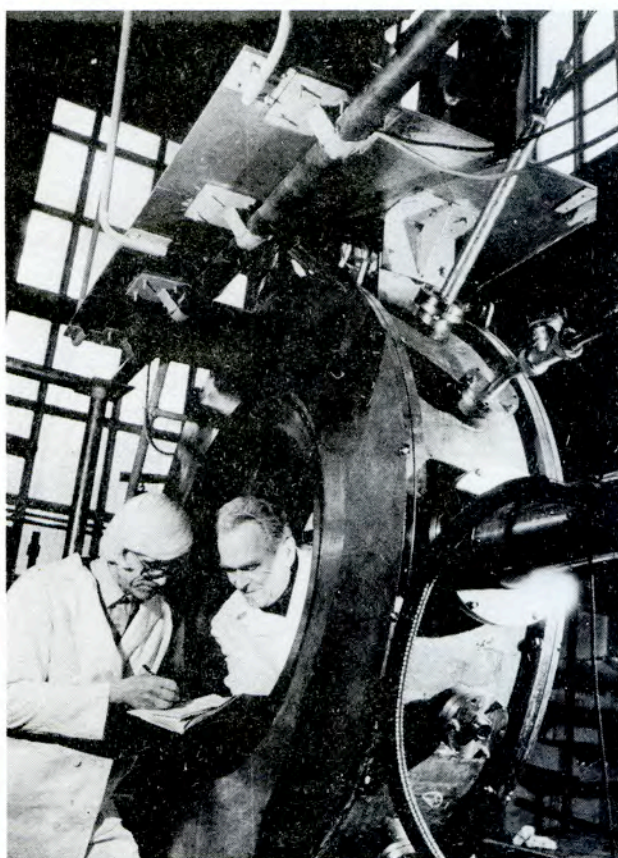
**Источник ПОЛЯРИС.** В 1993 г. проведено два рабочих сеанса на синхрофазотроне с источником ПОЛЯРИС. Каждому сеансу предшествовала большая работа по сборке установки. Оба сеанса в техническом отношении прошли хорошо. Ускоренный пучок отличался стабильностью, интенсивность в последнем сеансе достигала значения  $5 \cdot 10^9$  дейтр./имп. Коррекция магнитного профиля в зоне резонаторов атомных переходов с помощью специальных обмоток позволяет повышать значения поляризации пучка на 15—20%.

Продолжается изготовление и ведется сборка на стенде узлов нового ионизатора для источника ПОЛЯРИС, основанного на зарядово-обменной реакции.

В фазу экспериментов по экстракции пучка перешла работа по получению ультрахолодных поляризованных атомов водорода. В ряде экспериментов зафиксирован поток  $\approx 10^{17}$  атомов/имп. Создан стенд для изучения вопросов получения поляризованного атомарного пучка водорода в случае криооткачки газа криопанелями ( $T = 4 \text{ К}$ ) в сочетании с турбомеханической системой откачки. Начаты эксперименты по детектированию пучка с целью показать, что криогенный тип источника целесообразен не только для дейтерия, как это доказано на примере ПОЛЯРИСа, но и для водорода.

**Сверхпроводящий спектрометрический магнит.** Выполнена серия экспериментов по запуску и испытаниям сверхпроводящего соленоида СПМС-1 для спектрометра СФЕРА. Внутренний диаметр нового соленоида равен 700 мм, внешний — 1500 мм. Длина криостата — 350 мм. Сверхпроводящая обмотка имеет систему косвенного охлаждения. В магнит заводился ток 640 А, что соответствует индукции в центре соленоида около 1,3 Тл. При токе 500 А магнит работает стабильно. Расход жидкого гелия составлял примерно 10 л/час. Испытания показали правильность конструкторских решений и работоспособность основных узлов. Проводятся доводка и испытания этого соленоида, позволяющего достигать величины поля в центре 2,2 Тл.

Продолжалась разработка другого, более крупного магнита СПМС-2 для спектрометра СФЕРА. Уточнены его геометрические параметры и требования к магнитному полю. Проведены



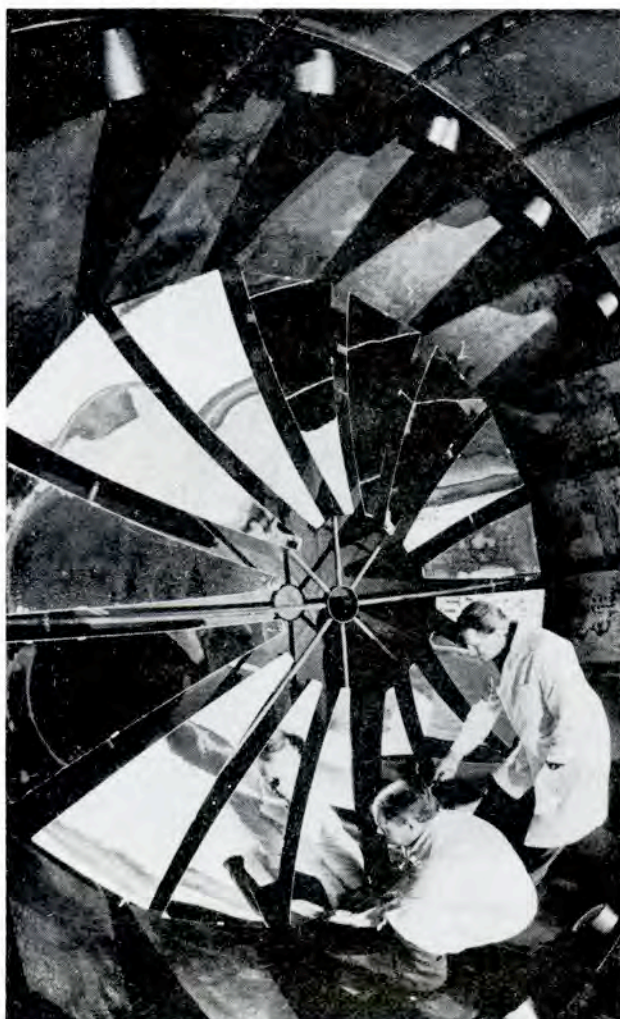
Сверхпроводящий соленоид — один из элементов центрального детектора спектрометра СФЕРА

расчеты по оптимизации геометрии, обеспечивающей минимум осевых сил.

**Сцинтилляционные детекторы.** Группой СФЕРА завершена сборка экструдера для получения длинных сцинтилляционных полос высокой прозрачности. Получены первые образцы радиаторов для сцинтилляционных счетчиков

Испытание экструзионного устройства для изготовления сцинтилляторов методом вытяжки расплавленной массы





Многоканальный газовый черенковский счетчик

большой длины. Начаты их испытания на пучке дейтронов синхрофазотрона. Сцинтилляторы такого типа предполагается использовать для времяпролетных детекторов на установке СФЕРА, а также на ускорителе RHIC в эксперименте PHENIX. Испытаны сцинтилляторы и фотоумножители ФЭУ-87 для эксперимента NA-49 на пучке синхрофазотрона и SPS (ЦЕРН) [15,16], достигнуто временное разрешение  $\approx 70$  пс.

**Кремниевые лавинные детекторы.** Участниками эксперимента СФЕРА и сотрудниками группы кремниевых детекторов в ЛВЭ проведены предварительные исследования возможностей достижения временного разрешения около 100 пс с кремниевыми лавинными детекторами площадью  $1 \times 1$  см на низкоомном  $p$ -кремнии [17,18]. Преимущества такого детектора, по сравнению с обычным, состоят в более низкой цене, почти абсолютной радиационной стойкости, независимости работы от магнитного поля и в по-

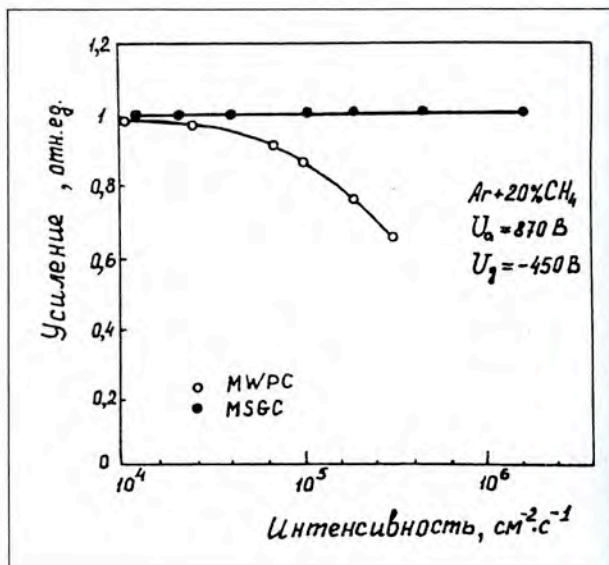


Рис. 11. Зависимость коэффициента газового усиления от интенсивности пучка для проволоочной пропорциональной камеры (MWPC) и микроstriпового детектора (MSGC)

тенциальной возможности размещения на кремниевой пластине ассоциированной электроники.

**Каналирование.** С помощью компьютерного моделирования траекторий частиц в кристалле исследована эффективность отклонения изогнутым монокристаллом кремния ядер с максимальной энергией, проектируемой на нуклотроне — 6 ГэВ/нуклон. Дан анализ различных методов наведения частиц на дефлектор. Для вывода пучка из нуклотрона целесообразно использовать одновременно локальное искажение орбиты и поперечную диффузию частиц. Показано, что уменьшение длины дефлектора до 1 см позволит заметно увеличить эффективность вывода за счет вклада кратных проходов частиц через дефлектор перед выводом [44—46].

Проведено компьютерное моделирование вывода пучка протонов с энергией 120 ГэВ изогнутым кристаллом кремния из ускорителя SPS (ЦЕРН). Наведение частиц на кристалл осуществлялось в результате введения белого шума, иницирующего поперечную диффузию частиц. Результаты моделирования показали, что причиной возникновения двух максимумов в профиле выведенного пучка в направлении, поперечном изгибу, является паразитный поперечный изгиб кристалла.

**Детекторы изображений.** В 1993 г. завершена разработка рентгеновского двумерного детектора со сферическим входным окном и начаты в ИК РАН первые эксперименты с белковыми монокристаллами. Основные параметры детектора: число разрешаемых элементов  $500 \times 500$ , фокусное расстояние 12 см, телесный угол (без параллакса)

60 рад, максимальное быстродействие  $10^6$  соб./с, эффективность регистрации излучения 75%.

Совместно с Институтом Лауэ — Ланжевена (Гренобль) разработан и исследован одномерный координатный детектор на основе микростриповой структуры, нанесенной на стеклянную пластину. Исследованы различные методы считывания информации, детектор надежно работает при нагрузках более  $10^6 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  (рис.11). На основе

стекла с объемной проводимостью изготовлена микростриповая структура размером  $4 \times 12 \text{ см}$ .

Результаты исследований представлены в работах [47—51] и доложены на конференциях [52—54]. На 4-й школе ИКФА по аппаратуре в физике элементарных частиц (Бомбей, 15—27 февраля 1993 г.) сотрудниками ЛВЭ была представлена лабораторная работа «X-Ray Photon Imaging», явившаяся практикумом для 77 участников из 21 страны.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Baldin A.M., Malakhov A.I. — *JINR Rapid Comm. No.3[60]-92, Dubna, 1993, p.52.*
2. *LHE Users Handbook.* — Eds. Baldin A.M., Kuehn B., *JINR, Dubna, 1993.*
3. Baldin A.M. et al. — *JINR Preprint E9-93-273, Dubna, 1993 (to be published in «Proc. of Cryogenic Eng. Conf., July 12—16, Albuquerque, USA»).*
4. Baldin A.M., Kovalenko A.D. — *In: CERN Bulletin 14/93:4, Geneva, 1993.*
5. Baldin A.M. et al. — *JINR Rapid Comm. No.4[61]-93, Dubna, 1993, p.13.*
6. Балдин А.А. — *Краткие сообщения ОИЯИ №3[54]-92, Дубна, 1992, с.27.*
7. Kovalenko A.D. et al. — *JINR Rapid Comm. No.2[59]-93, Dubna, 1993, p.53.*
8. Tolstov K.D. — *JINR Rapid Comm. No.5[62]-93, Dubna, 1993, p.5.*
9. Шелаев И.А. — *Краткие сообщения ОИЯИ №5[62]-93, Дубна, 1993, с.16.*
10. Afanasiev S.V. et al. — *Physica Scripta, 1993, vol.48, p.124.*
11. Afanasiev S.V. et al. — *JINR Rapid Comm. No.1[58]-93, Dubna, 1993, p.21.*
12. Afanasiev S.V. et al. — *JINR Rapid Comm. No.3[60]-93, Dubna, 1993, p.40.*
13. Litvinenko A.G. et al. — *JINR Rapid Comm. No.1[58]-93, Dubna, 1993, p.27.*
14. Artiornov A.S. — *JINR Rapid Comm. No.4[61]-93, Dubna, 1993, p.6.*
15. Anisimov Yu.S. et al. — *JINR Rapid Comm. No.3[60]-93, Dubna, 1993, p.68.*
16. Afanasiev S.V. et al. — *Subm. to «JINR Rapid Comm.».*
17. Govorkov B.B. et al. — *Lebedev Phys. Inst. Preprint N14, Moscow, 1993.*
18. Afanasiev S.V. et al. — *ALICE Internal Note 93—95/SIL, CERN, 1993.*
19. Avramenko S.A. et al. — *Conf. «Delta in Nuclei», May 26—29, RIKEN, JAPAN, 1993.*
20. Avramenko S.A. et al. — *JINR Rapid Comm. No.6[63]-93, Dubna, 1993, p.5.*
21. Shahbazian B.A. et al. — *JINR Rapid Comm. No.1[58]-93, Dubna, 1993, p.15.*
22. Shahbazian B.A. et al. — *Phys. Lett. B, 1993, vol.316, p.563.*
23. Ladygin V.P., Manyakov P.K., Piskunov N.M. — *JINR Rapid Comm. No.1[58]-93, Dubna, 1993, p.27.*
24. Gareev F.A. et al. — *JINR Preprint E2-93-232, Dubna, 1993.*
25. Perdrisat C.F. et al. — *Nouvelles de Saturne, 1993, vol.17, p.104.*
26. Строчковский Е.А., Гареев Ф.А., Ратис Ю.Л. — *ЭЧАЯ, 1993, т.24, вып.3, с.603.*
27. Gareev F.A., Ratis Yu.L., Stokovsky E.A. — *JINR Preprint E2-93-426, Dubna, 1993 (subm. to «Zeitschrift fur Phys. C»).*
28. Golutvin I.A. et al. — *Proc. of the 10th Int. Symposium on High Energy Spin Physics, Nov. 9—14, 1992, Nagoya, Japan, p.501; JINR Preprint E2-93-16, Dubna, 1993.*
29. Nomofilov A.A. et al. — *Few Body XIV Conf. Handbook, 14th Europ. Conf. on Few Body Problems, Aug. 23—27, Amsterdam, p.160.*
30. Nomofilov A.A. et al. — *PANIC-93 Conf. Book of Abst., 27 June — 3 July 1993, Perugia, Italy, p.741.*
31. Nomofilov A.A. et al. — *Int. Symp. «Dubna.Deuteron-93», Sept.14—18, 1993.*
32. Nomofilov A.A. et al. — *JINR Preprint E1-93-405, Dubna, 1993 (subm. to «Phys. Lett. B»).*
33. Botvina A.S. et al. — *Z. Phys. A, 1993, vol.345, 4, p.413.*
34. Глаголев В.В. и др. — *Письма в ЖЭТФ, 1993, т.58, вып.7, с.497.*
35. Galazka-Friedman J. et al. — *Z. Phys. A, 1993, vol.345, 2, p.125.*
36. Averichev G.S. et al. — *In: Proc. International Symposium «Dubna. Deuteron-93», Dubna, Sept. 14—18, 1993, p.12.*
37. Tokarev M.V. — *JINR Preprint E2-93-211, Dubna, 1993.*

38. Braun M.A., Tokarev M.V. — *JINR Preprint E2-93-184, Dubna, 1993.*
39. Tokarev M.V. — In: *14 European Conference on Few Body Problems in Physics, Amsterdam, Aug. 23—27, 1993, p.199.*
40. Tokarev M.V. — In: *Proc. XIII International Conference Particles and Nuclei, Perugia, 28 June — 2 July 1993, vol. 1, p.235.*
41. Kochelev N.I., Tokarev M.V. — *Phys. Lett. B, 1993, 309, p.416.*
42. Агакишиев Г.Н. и др. — *Депонированное сообщение ОИЯИ Б1,2-93-231, Дубна, 1993.*
43. Agakishiev G.N. et al. — In: *Proc. International Symposium «Dubna. Deuteron-93», Dubna, Sept. 14—18, 1993; Proc. International V Workshop on High Energy Spin Physics, Sept. 20—24, 1993, Protvino, Russia.*
44. Akbari H. et al. — *Phys. Lett. B, 1993, vol.313, p.491.*
45. Коваленко А.Д., Михайлов В.А., Таратин А.М., Цыганов Э.Н. — *ОИЯИ, Р9-93-383, Дубна, 1993.*
46. Kovalenko A.D. et al. — *JINR Rapid Comm. No.6[63]-93, Dubna, 1993, p.13.*
47. Заневский Ю.В., Донец Д.Е., Черненко С.П. и др. — *Кристаллография, 1993, т.38, вып.2, с.252.*
48. Мержанов А.Г., Пономарев В.И., Заневский Ю.В. и др. — *Доклады Академии наук (физическая химия), 1993, т.328, №1, с.72.*
49. Chernenko S.P., Smykov L.P., Zanevsky Yu.V., Stelzer H. — *JINR Preprint E13-93-258, Dubna, 1993 (subm. to «ПТЭ»).*
50. Zanevsky Yu.V. — *Physica Medica, 1993, v.IX, No.2—3, p.69.*
51. Brandt U., Daumiller K., Smykov L. et al. — «*Cosmic Ray Tracking by Streamer Tubes*» (subm. to «NIM»).
52. Zanevsky Yu.V., Fateev O.V. — «*Test Results of Position-Sensitive Detectors Based on MSPC's*» Workshop on Progress in Gaseous Microstrip Proportional Chambers, ILL, Grenoble, June 21—23, 1993.
53. Chernenko S.P., Fateev O.V., Smykov L.P. et al. — «*X-Ray Detectors for Structure Investigations Constructed at JINR*». 3-d London Conference on Position-Sensitive Detectors, London, Sept. 6—9, 1993.
54. Bencivelli W., Del Guerra A., Vasiliev S. et al. — «*Towards 100 mkm Spatial Resolution Digital Mammography with Microstrip Silicon Crystals: Experimental Tests with a Detector Prototype*» — Medical Imaging Conference, 1993, San Francisco (subm. to «NIM»).