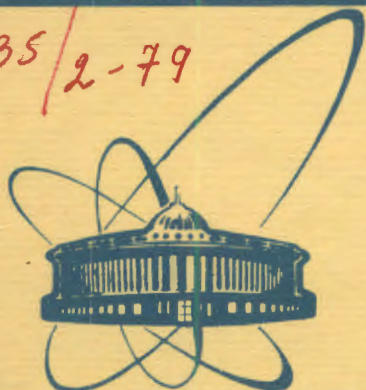


1235/2-79



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

СЗУУ.1к

К-652

2/10-79

13 - 12076

П.Конц, Ш.Конц, З.В.Крумштейн, Ю.П.Мереков,
З.Фодор, Г.Хемниц, Хон Сын Му, З.Шереш, Я.Эрё

ДВУХПЛЕЧЕВОЙ СПЕКТРОМЕТР
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
ТИПА А (p, xd)В
ПРИ ЭНЕРГИИ 670 МЭВ

1. Формирование и транспортировка протонного пучка

1979

13 - 12076

П.Конц, Ш.Конц, З.В.Крумштейн, Ю.П.Мереков,
З.Фодор, Г.Хемниц, Хон Сын Му, З.Шереш, Я.Эрё

ДВУХПЛЕЧЕВОЙ СПЕКТРОМЕТР
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
ТИПА А (p, xd)В
ПРИ ЭНЕРГИИ 670 МЭВ

1. Формирование и транспортировка протонного пучка

Объединенный институт
ядерных исследований
БНЭЛЛОТЕНА

Двухплечевой спектрометр для исследования ядерных реакций типа $A(p, xd)B$ при энергии 670 МэВ. 1. Формирование и транспортировка протонного пучка

Описана система формирования и транспортировки протонного пучка с энергией 670 МэВ в двухплечевом спектрометре, созданном для изучения прямых ядерных реакций с вылетом быстрого дейтрона на синхроциклотроне ОИЯИ. Изложена методика измерений двумерного распределения абсолютной интенсивности пучка по активации ^{12}C в полиэтилене. Для транспортировки и формирования пучка используются дублет квадрупольных линз и отклоняющий магнит. С целью уменьшения эмиттанса пучка и получения необходимой его интенсивности на выходе пучка из камеры синхроциклотрона установлен коллиматор. При оптимальном расположении коллиматора интенсивность непосредственно за коллиматором составляет $1,3 \cdot 10^{10}$ протонов/с, а эмиттанс как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях уменьшается до ~ 100 мм·мрад. В области мишени пучок имеет размеры 15 мм по вертикали и ~ 60 мм по горизонтали (что соответствует 2,5%-ному импульсному разбросу сразу после коллиматора), его интенсивность составляет 70–80% от интенсивности на выходе коллиматора. Для измерений интенсивности использовалась матрица из полиэтиленовых шариков. Наведенная активность в полиэтилене измерялась методом регистрации совпадений γ -квантов от аннигиляции позитронов при распаде $^{11}C \rightarrow ^{11}B + \beta^+ + \nu$.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

Two-Arm Spectrometer Investigation of Nuclear Reactions of $A(p, xd)B$ Type at 670 MeV. 1. Formation and Transport of Proton Beam

The formation and transport of a 670 MeV proton beam in a two-arm spectrometer constructed on the JINR synchrocyclotron for investigation of direct nuclear reactions with outgoing rapid deuteron is described. A method for measuring the beam intensity is also given.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Для проведения кинематически полных исследований реакций типа $A(p, xd)B$ на синхроциклотроне ОИЯИ создан двухплечевой спектрометр, размещенный на выведенном пучке протонов с энергией 670 МэВ. Схема установки приведена на рис. 1. Спектрометр дает возможность изучать реакции, в которых одновременно с вылетом вперед /под углом $\sim 7^\circ$ / частицы с большим импульсом $/P_{\text{макс.}} = 1800 \text{ МэВ/с/}$ назад вылетает частица с малой энергией $/20 \text{ МэВ} \leq E \leq 200 \text{ МэВ/}^{1/}$.

Ниже приводятся описание системы формирования и транспортировки протонного пучка, а также методика измерений, выполненных для получения карты его интенсивности.

1. СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА

1.1. Требования к пучку

Для трехчастичной реакции $a + A \rightarrow b + c + B$, в которой измеряются импульсы частиц a , b и c , энергию возбуждения остаточного ядра B E_g и его импульс можно определить с помощью законов сохранения импульса и энергии:

$$\vec{P}_B = \vec{P}_a - \vec{P}_b - \vec{P}_c,$$

/1/

$$E_g = T_a - T_b - T_c - T_B + Q_0,$$

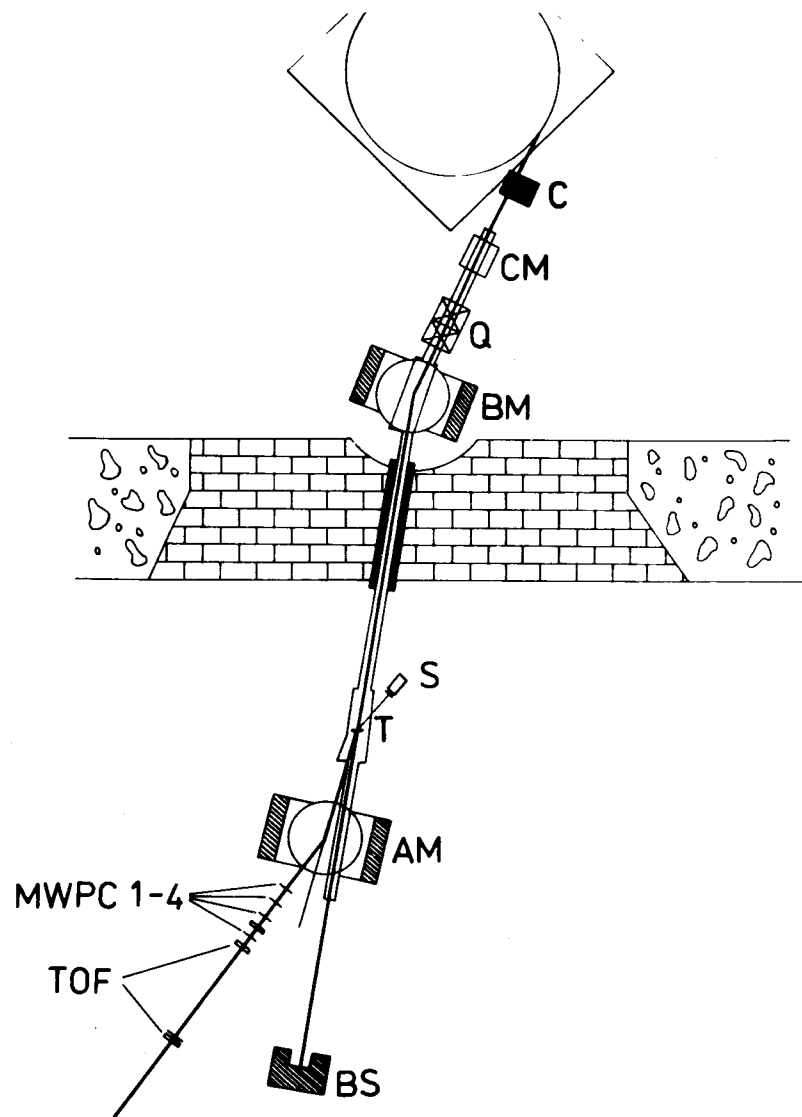


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. С - коллиматор, СМ - корректирующий магнит, Q - дублет квадрупольных линз, ВМ - отклоняющий магнит, АМ - анализирующий магнит, Т - мишень, BS - стопер пучка, S - сцинтилляционные счетчики второго плеча, MWPC - пропорциональные камеры, TOF - сцинтилляционные счетчики системы измерения времени пролета.

где \vec{P} - вектор импульса соответствующей частицы, T - ее кинетическая энергия, Q_0 - энерговыделение реакции в случае образования остаточного ядра в основном состоянии. Чтобы разделить, например, основное и возбужденное состояния ядра отдачи в реакции ${}^6\text{Li}(p, pd) \text{He}^4$, $E_{\text{в}}$ и $\vec{p}_{\text{в}}$ должны быть определены с точностью не хуже 20 МэВ и 20 МэВ/с соответственно. Такая точность может быть получена, если энергии частиц a, b и c измерять с точностью 10-12 МэВ, а компоненты их импульсов - с точностью 10-12 МэВ/с.

Для первичного пучка $T_a = 670 \text{ МэВ}$, $p_a = 1300 \text{ МэВ/с}$ это требование можно обеспечить при условии, если, с одной стороны, неопределенность абсолютной величины импульса остается ниже 1%, а, с другой стороны, расходимость пучка по вертикали и по горизонтали не превышает $\pm 5 \text{ мрад}$.

Чтобы обеспечить необходимую точность определения компонент импульса вторичных частиц, размеры области, в которой происходит реакция, не должны превышать 20 мм по вертикали и 5 мм по горизонтали. Это требование в наших условиях легче всего выполнить, если в горизонтальном направлении область взаимодействия задается размерами мишени, а по вертикали - размерами пучка. При этом по горизонтали размеры пучка не должны превышать 60-80 мм /диаметр ионопровода/.

Наконец, следует иметь в виду, что из-за фоновых условий интенсивность пучка не должна превышать $\sim 10^{10}$ протонов/с.

В итоге необходимо получить выведенный протонный пучок со следующими параметрами: интенсивность на мишени $\sim 10^{10}$ протонов/с; размеры на мишени $< 20 \text{ мм}$ по вертикали и $< 80 \text{ мм}$ по горизонтали; импульсный разброс ниже 1%; угловой разброс менее $\pm 5 \text{ мрад}$. Угловой разброс и размеры пучка определяют максимально допустимую величину эмиттанса пучка $\epsilon_x = \epsilon_y = \pi/4 \cdot \Delta x \cdot \Delta \theta_x = \pi/4 \cdot \Delta y \cdot \Delta \theta_y \approx 160 \text{ мм мрад}$.

1.2. Настройка пучка

Пучок, который выходит из синхротрона, не удовлетворяет приведенным требованиям. Его интенсивность

выше заданной примерно на два порядка величины, энергетический разброс в три раза больше допустимого и размер сечения значительно превышает требуемый. Для транспортировки и формирования пучка используются два магнитооптических элемента: дублет квадрупольных линз (Q) и отклоняющий магнит /ВМ/. Эти оптические элементы, как известно, не могут менять эмиттанса пучка. Поскольку использование коллиматора вблизи мишени привело бы к увеличению фона, необходимый эмиттанс нужно создать уже на месте выхода пучка из камеры синхротрона. С этой целью там был установлен медный коллиматор длиной 30 см с квадратным отверстием $10 \times 10 \text{ мм}^2$. При этом эмиттанс пучка как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости уменьшается до $\sim 100 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ и одновременно обеспечивается необходимая интенсивность, поскольку коллиматор пропускает пучок, составляющий только несколько процентов от первоначального. Чтобы выбрать оптимальное расположение коллиматора, на его выходе измерялось распределение интенсивности пучка по наведенной активности полиэтилена в реакции $^{12}\text{C}(p, pn)^{11}\text{C}$. Методика измерений карты интенсивности описана в разделе 2. При оптимальном расположении коллиматора интенсивность пучка непосредственно за коллиматором составляет $1,3 \cdot 10^{10}$ протонов/с.

Пучок, выходящий из коллиматора с расходимостью $\pm 5 \text{ мрад}$, фокусируется квадрупольным дуплетом Q на мишень. Поскольку магнит ВМ отклоняет пучок на 14° от первоначального направления и соответственно разделяет его по импульсу, фокусировка не только обеспечивает требуемое сечение пучка, но и дает возможность уменьшить энергетический разброс протонов, попадающих на мишень. В плоскости мишени дисперсия D такого спектрометра составляет 2000 мм. Если горизонтальный размер изображения магнитооптической системой зрачка коллиматора равен Δx_0 , то импульсный разброс частиц, попадающих на мишень размером Δx_t , составляет

$$\Delta P/P = \sqrt{\Delta x_0^2 + \Delta x_t^2} / D \sim \Delta x_0 / 2000 \quad \text{/при } \Delta x_t \ll \Delta x_0 \text{ /},$$

т.е. 1% в случае $\Delta x_0 = 200 \text{ мм}$.

Как известно, свойства изображения оптической системы, состоящей из элементов Q и ВМ, в горизонтальной

и вертикальной плоскостях различаются. На рис. 2 показаны результаты расчетов изображения в плоскости мишени для моноэнергетического пучка, выходящего из коллиматора размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$ с расходимостью в обеих плоскостях $\pm 5 \text{ мрад}$. На рис. 2а показана зависимость горизонтального и вертикального размеров пучка от тока в симметрично возбужденном Q-дублете при таком направлении тока, когда первый элемент дублета в горизонтальной плоскости дефокусирует. Видно, что горизонтальный размер можно уменьшить до 10 мм, что с точки зрения импульсного разброса является весьма хорошим значением. К сожалению, при этом вертикальный размер

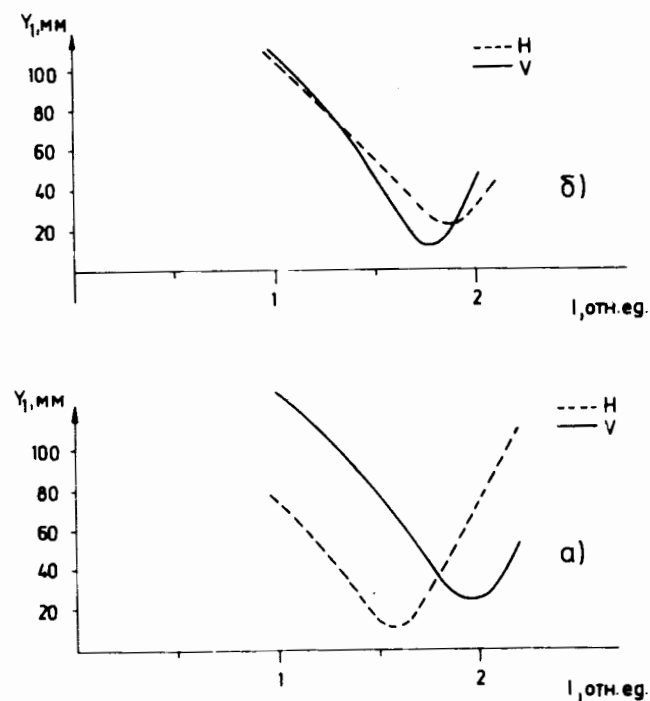


Рис. 2. Расчетная зависимость размеров пучка от тока в симметрично возбужденном дублете Q. H - горизонтальный размер, V - вертикальный размер. а/ Первый элемент дублета дефокусирует в горизонтальной плоскости, б/ первый элемент дублета фокусирует в горизонтальной плоскости.

пучка очень велик, и поэтому такое решение нельзя использовать. На *рис. 26* показан случай, когда первый элемент дублета фокусирует в горизонтальной плоскости. В этом случае вертикальный размер пучка может быть менее 20 мм, в то же время горизонтальный размер также не сильно превышает эту величину, соответствующую 1%-ному импульсному разбросу. Следовательно, такое возбуждение Q-дублета оптимально соответствует требованиям эксперимента. Наконец, следует заметить, что варианты расчета реализуются на практике только при условии, если пучок проходит от коллиматора до мишени в вакууме. Из-за многократного рассеяния на атомах воздуха расходимость пучка увеличивается на ± 1 мрад на каждый метр, так что в результате на мишени пучок размоется на несколько сантиметров, и именно поэтому в систему транспортировки пучка включен легко собирающийся и разбирающийся вакуумный ионопровод, обеспечивающий вакуум лучше чем 10^{-1} мм ртутного столба. Трубы ионопровода соединяются одна с другой с помощью переходных муфт, уплотненных резиновыми чулками /*рис. 3*/.

Частицы первичного пучка, не испытавшие взаимодействия в мишени, проходят без отклонения анализирующий магнит спектрометра АМ в трубе из мягкого железа, экранирующей магнитное поле, и затем гасятся в поглотителе пучка BS, представляющем собой блок из свинца, железа и железобетона.

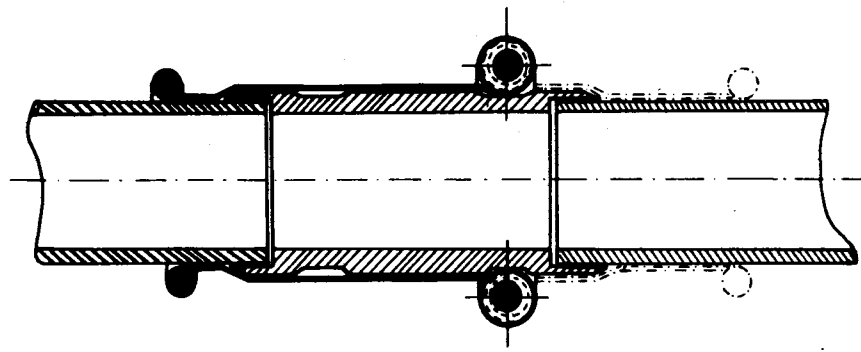


Рис. 3. Соединение труб ионопровода.

1.3. Экспериментальная проверка параметров пучка

Точность наведения пучка на мишень и качество его фокусировки проверялись с помощью фотобумаги. Вертикальный размер пучка, равный 15 мм, был получен при значении тока в квадрупольях, близком к расчетному. При этом горизонтальный размер пучка оказался равным примерно 60 мм. Последняя цифра означает, что сразу после коллиматора пучок обладает импульсным разбросом 2,5% /разброс по энергии 25 МэВ/.

Распределение интенсивности пучка по горизонтали измерялось по выходу ядерной реакции в узкой мишени ($\Delta x_1 \ll \Delta x_0$) из полиэтилена. Для измерения распределения интенсивности менялось магнитное поле в отклоняющем

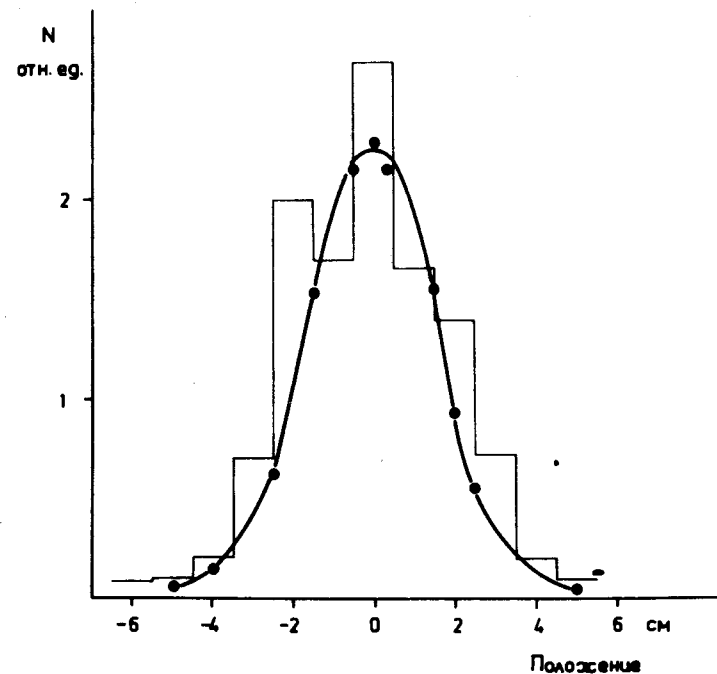


Рис. 4. Распределение интенсивности пучка в области мишени. Кривая - выход ядерной реакции в зависимости от положения пучка. Гистограмма - результаты активационных измерений.

магните ВМ, так что на мишень попадали разные участки пучка. Смещение пучка определялось по дисперсии магнита ВМ. Измеренная зависимость выхода ядерной реакции от положения пучка приведена на рис. 4.

Распределение интенсивности и полная интенсивность пучка в плоскости мишени определялись также с помощью методики активации, упоминавшейся выше. По данным этих измерений в плоскости мишени остается 70-80% от интенсивности пучка на выходе коллиматора.

Из-за периодичности ускорения временное распределение интенсивности имеет микроструктуру с периодом, совпадающим с периодом высокочастотного ускоряющего поля $f = 71 \text{ нс}$, и длительностью отдельного импульса, равной 15 нс^2 . На рис. 5 показана временная зависимость числа случайных совпадений, обусловленная существованием микроструктуры пучка.

Наконец, следует упомянуть, что частота ускоряющего напряжения однозначно определяет энергию частиц. Следовательно, если во время регистрации события измерить

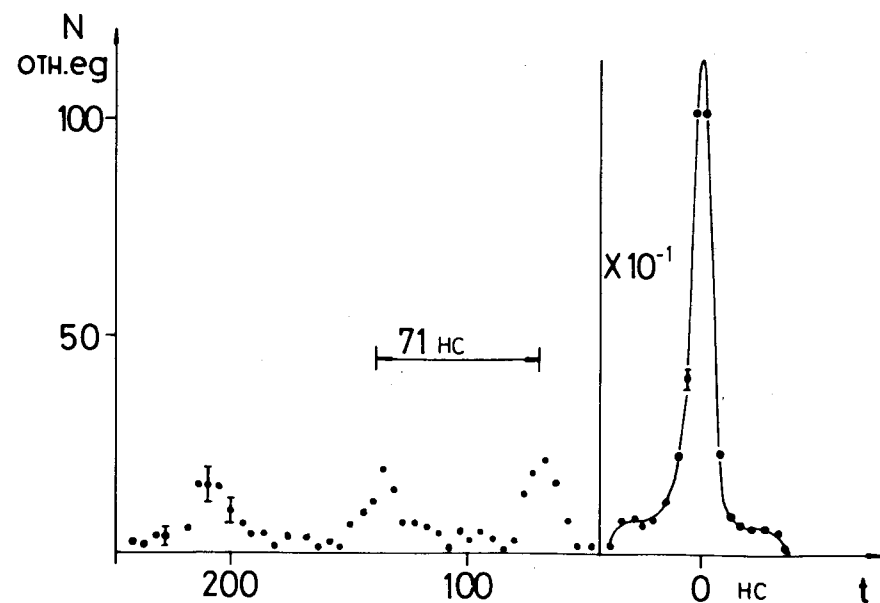


Рис. 5. Временная зависимость числа случайных совпадений.

частоту ускоряющего напряжения, можно определить энергию первичной частицы, что позволяет уменьшить неопределенность результатов эксперимента.

2. ПОЛУЧЕНИЕ КАРТЫ ИНТЕНСИВНОСТИ

Как упоминалось выше, измерение двумерного распределения абсолютной интенсивности протонного пучка основано на активации ^{12}C . Изучаемым протонным пучком облучается мишень из полиэтиленовых шариков, упорядоченным образом расположенных в узлах квадратной сетки. На ядрах ^{12}C в полиэтилене происходит реакция $^{12}\text{C}(p, pn)^{11}\text{C}$. Образующиеся ядра ^{11}C распадаются с испусканием позитрона: $^{11}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B} + \beta^+ + \nu$ с периодом полураспада $20,34 \text{ мин}$. Позитроны останавливаются уже в $0,1 \div 0,5 \text{ г/см}^2$ вещества и аннигилируют с испусканием в противоположных направлениях двух γ -квантов с энергией $0,51 \text{ МэВ}$. Регистрируя совпадения двух γ -квантов, можно определить число распадов ядер ^{11}C и отсюда получить абсолютную интенсивность пучка протонов, падающего на шарик. Важным преимуществом этой методики является то, что она основана на регистрации числа совпадений, поэтому при измерении активности шариков, которое проводится после облучения, не возникает особых проблем из-за значительного фона, существующего вблизи ускорителя.

Держатель мишени представляет собой алюминиевую пластину, в которой на площади $10 \times 10 \text{ см}^2$ размещены 20×20 полиэтиленовых шариков в гнездах квадратной сетки на расстоянии 5 мм друг от друга. Мишень помещается в изучаемый пучок на $10-20 \text{ мин}$ /если измеряется и абсолютная интенсивность, то необходимо точно регистрировать времена начала и конца облучения, а также контролировать стабильность интенсивности с помощью пучкового монитора/. После облучения шарики поочередно вынимаются из пластины и помещаются в измерительную головку, находящуюся между двумя кристаллами NaI размером $\phi 50 \times 50 \text{ мм}^2$, удаленными на 10 мм один от другого. Облученная алюминиевая пластина с шариками может являться источником значительного фона, поэтому

целесообразно ее удалять от детекторов по крайней мере на ~ 1 м/.

При заданном времени облучения поток протонов, падающих на i -й элемент мишени ϕ_i , можно определить, измеряя число совпадений C_i и время, истекшее после облучения:

$$\phi_i = \frac{C_i}{\eta N_0} e^{\lambda(t_i - t_0)} \quad /2/$$

где η - эффективность регистрации детекторами изотропно распределенных γ -пар, возникающих от позитронов низкой энергии внутри измерительной головки /эту эффективность можно определить до начала измерений с помощью β^+ -источника ^{22}Na известной активности: $\eta \sim 4 \cdot 5 \times 10^{-2}$ /; λ - постоянная распада ^{11}C , равная $5,68 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$; $(t_i - t_0)$ - время, истекшее от конца облучения /с/; $N_0 \phi_i$ - число ядер ^{11}C в конце облучения,

$$N_0 = \frac{\sigma q N_A}{M} (1 - e^{-\lambda T_B}); \quad /3/$$

σ - сечение реакции $^{12}\text{C}(p, p_n)^{11}\text{C}$ при энергии изучаемого пучка / $\sigma_{660 \text{ МэВ}} = 3 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$ /³/; q - масса облучаемого полиэтиленового шарика / $31,8 \pm 1,0 \text{ мг}$ /; N_A - число Авогадро / $6,02 \cdot 10^{23} / \text{мол}$ /; M - молекулярный вес CH_2 / $M = 14 \text{ г/мол}$ /; T_B - время облучения /с/.

В относительную ошибку отдельного измерения вносят вклад следующие факторы:

- а/ статистическая ошибка числа совпадений C_i / $< 10\%$, если $\phi_i \geq 10^8 \text{ частиц}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$ /;
- б/ нестабильность электроники / $\leq 3\%$ /;
- в/ фон от работающего ускорителя / $\leq 10 \text{ отсчетов/с}$ /;
- г/ разброс масс шариков / $\sim 3\%$ /, который в принципе может быть исключен взвешиванием каждого шарика.

Систематическая ошибка абсолютной интенсивности не превышает 10% .

Чтобы получить распределение интенсивности с достаточно хорошим разрешением, измерения нужно произвести в большом числе точек, однако суммарное время экспозиции не может сильно превышать период полурас-

пада. Поэтому целесообразно автоматизировать измерения, используя ЭВМ. В нашем случае экспериментальная аппаратура была подключена к ЭВМ HP-2116 С /рис. 6/.

Перед измерениями с пультавого дисплея вводятся константы, необходимые для обработки данных / σ , q ,

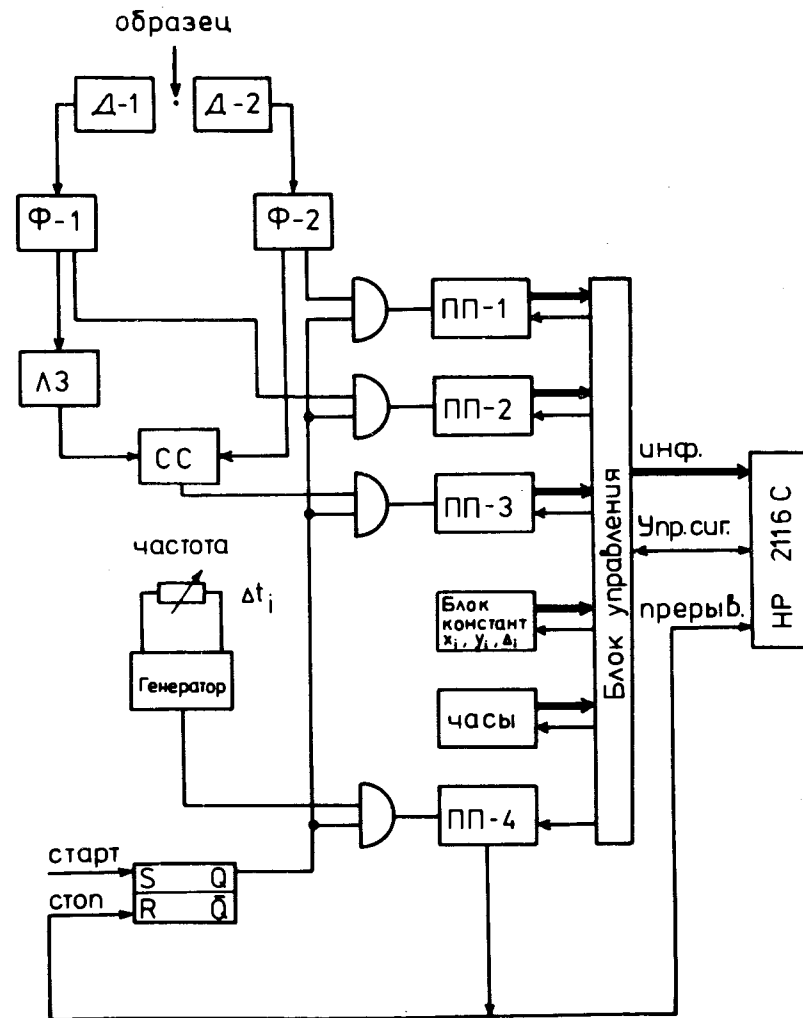


Рис. 6. Блок-схема связи с ЭВМ при проведении активационных измерений.

λ , T_B и др./ По истечении заданного времени Δt /1-5 с/ после помещения в измерительную головку i -го шарика и установки идентификационного номера, однозначно связанного с координатами шарика x_i и y_i , аппаратура автоматически передает в ЭВМ параметры C_i , x_i , y_i , t_i , Δt , N_{1i} , N_{2i} , на основании которых ЭВМ вычисляет ϕ_i и $\Delta\phi_i$ и выдает их на телетайп вместе со входными параметрами. Измерение одной точки занимает 10-15 с.

На экран пультового дисплея можно вывести полученные ранее результаты в хорошо обозримом виде, так что легко определить, в каких точках и с какой точностью следует провести дополнительные измерения. Можно выдавать двумерное распределение интенсивности также на телетайп /в виде матрицы/ или на плоттер /в виде одномерных сечений/.

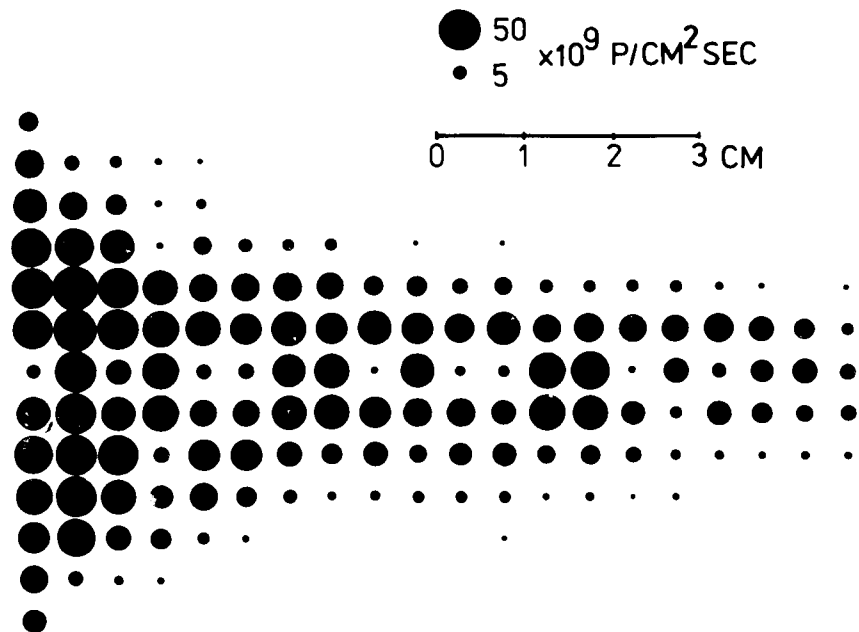


Рис. 7. Распределение интенсивности протонного пучка на выходе синхроциклотрона, за магнитными насадками.

В качестве примера на рис. 7 показано распределение интенсивности протонного пучка на выходе синхроциклотрона, сразу же за магнитными насадками.

Иногда вместо карты интенсивности необходимо быстро получить полную интенсивность пучка на некоторой площади в его сечении /например, на мишени/. Для этого полиэтиленовая пленка необходимой формы помещается в интересующее экспериментатора место и после активации пучком кладется в свернутом виде в измерительную головку, а затем производится обычный цикл измерений.

В заключение авторы выражают благодарность В.И.Петрухину за постоянное внимание и поддержку, Д.Альбрехту, Н.Н.Хованскому, Б.А.Хоменко, Л.Йеник за помощь при измерениях интенсивности, Э.Реван за участие в подготовке публикации к печати.

ЛИТЕРАТУРА

1. Albrecht D. et al. JINR, E1-8935, Dubna, 1975.
2. Зинов В.Г., Медведь С.В., Озеров Е.Б. ОИЯИ, P-2657, Дубна, 1966.
3. Cumming F.B. Ann. Rev. of Nucl.Sci., 1963, 13, p.261.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 декабря 1978 года.