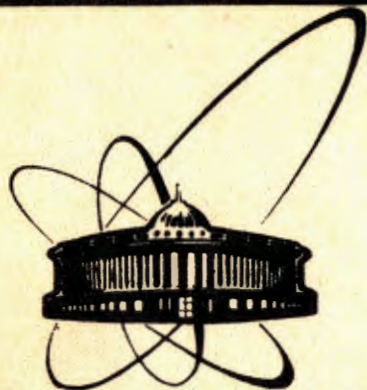


92 225



**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

9-92-225

**Е.М.Андреев, А.В.Демьянов, Т.Н.Мамедов,
В.С.Роганов, В.М.Цупко-Ситников**

**ТРАКТ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ
СЕПАРИРОВАННЫХ МЮОНОВ
ФАЗОТРОНА ОИЯИ
В НИЗКОФОНОВУЮ ЛАБОРАТОРИЮ**

1992

1. Введение

Тракт транспортировки сепарированных пучков мюонов фазотрона в низкофоновую лабораторию (тракт II) функционирует с 1986 г. Его основное назначение - формирование мезонных пучков из канала $I^{1/}$ фазотрона в помещении с пониженным уровнем фона (см. рис.1). В этом помещении фон от ускорителя практически на два порядка ниже уровня фона в экспериментальном зале (лаборатория № 4), куда выводятся мезонные пучки канала I.

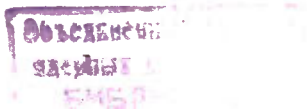
На рис.1 видно, что в низкофоновой лаборатории имеются 3 направления мезонных пучков. Первое направление - на установку для исследования реакций мю-катализа, второе направление - для экспериментов с укороченным трактом II у стены 4-ой лаборатории, третье направление - на установку для экспериментов с использованием μSR -метода. Далее описывается работа мезонного канала II в первом направлении.

Первоначально канал транспортировки мезонов в низкофоновую лабораторию (на расстояние 16,35 м от элемента № 30 тракта I) был дискретным и состоял из 6 дублетов линз типа МЛ29 и двух магнитов МЛ31. В 1988 г. вместе с каналом $I^{1/}$ он был модернизирован в непрерывный тракт из 13 дублетов линз с апертурой 20 см, и интенсивность пучков мюонов $I^{2/}$ на 1 мкА протонного пучка была увеличена в 5 раз. В 1991 г. в этом тракте изменена конструкция магнитного анализатора импульсов, состоящего из двух магнитов МЛ31, что привело к улучшению параметров пучков мюонов на выходе из тракта II и росту интенсивности вдвое.

В настоящей работе приводятся данные о пучках мюонов с импульсом 125 МэВ/с на выходе тракта II в направлении I.

2. Описание мезонного тракта II фазотрона

На выходе распадной части мезонного канала $I^{1/}$ (после эл.30, рис.1) имеются две возможности вывода пучков (см. рис.2): либо в 4-ю лабораторию (система вывода тракта I), либо в низкофоновую лабораторию (система вывода тракта II). Для получения пучков используется или одна, или другая система. Перевод одной системы в



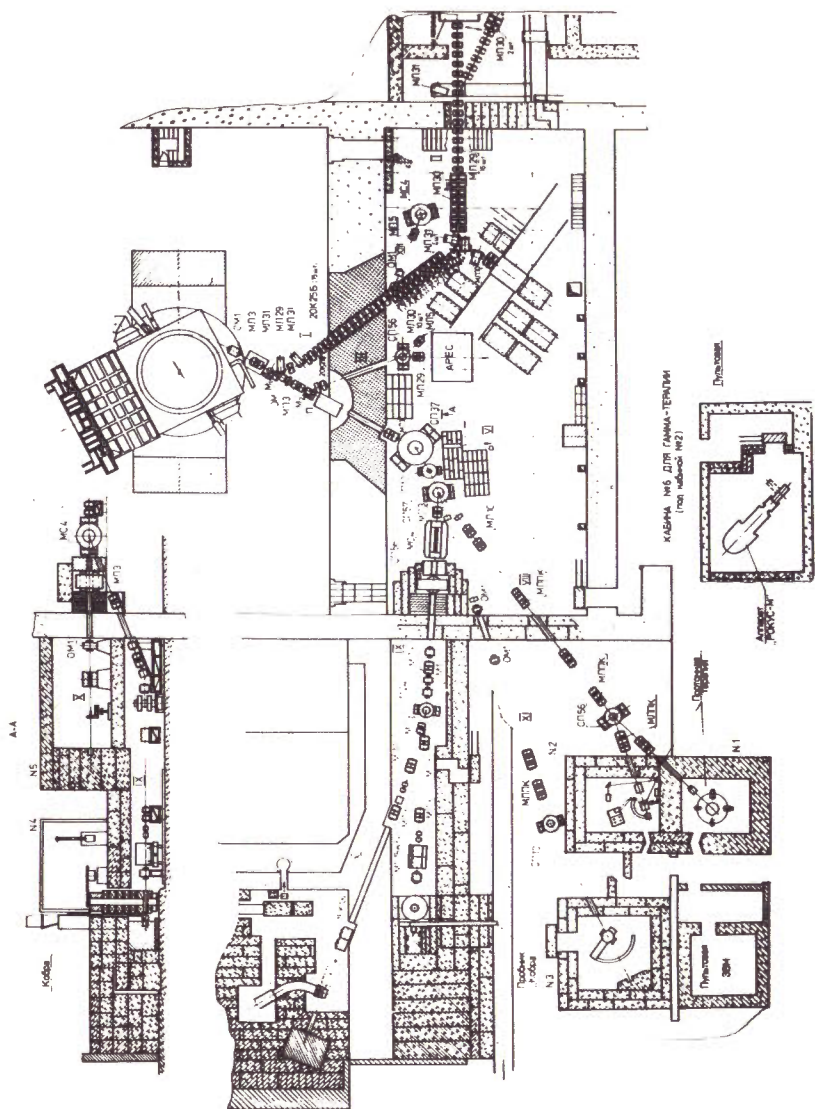
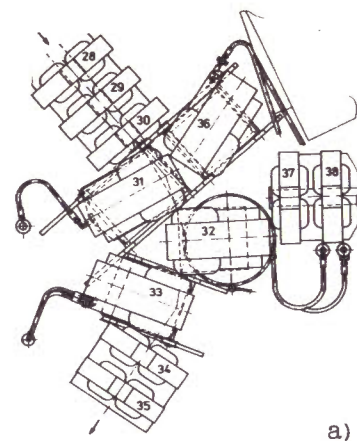
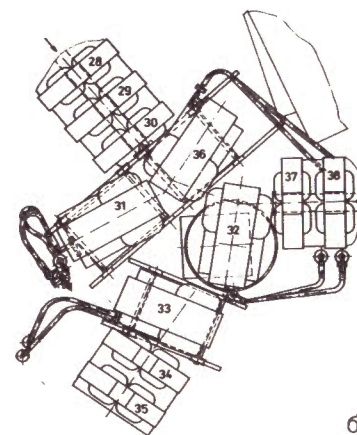


Рис.1. Схема разводки каналов пучков фазотрона ОИЯИ.



а)



б)

Рис.2. Расположение магнитных анализаторов системы вывода мезонного тракта I (первые отклоняющие магниты анализаторов - вертикально фокусирующие):

- а) в направлении 4-й лаборатории;
- б) в направлении низкофоновой лаборатории (тракт II).

другую осуществляется путем механического перемещения магнитов анализатора импульсов.

Система вывода пучков своим основным назначением^{/3/} имеет сепарацию мюонов, рожденных в обратном направлении относительно пионного импульса в системе центра масс пионов, т.е. мюонов с импульсом около $0,6 P_{\pi}$, полученных от распада пионов с импульсом $P_{\pi} \pm \Delta P_{\pi}$, которые захвачены в тракт I из мезонообразующей мишени. Кроме этого, оптимизация тракта II (т.е. соответствующее расположение магнитно-оптических элементов и нахождение режимов их работы) преследует еще несколько целей^{/3/}. Они включают в себя: а) получение наибольшей возможной интенсивности мюонов; б) выделение мюонов с заданным импульсом; в) получение максимального числа мюонных остановок; г) создание условий фокусировки пучка, оптимальных для данного эксперимента. Описываемый тракт II реализует эти цели.

На рис.2а приведено расположение магнитных анализаторов систем вывода мезонного тракта I. В направлении 4-й лаборатории^{/1/} анализатор состоит из трех магнитов (эл.31-33) типа МЛ31 (эффективная длина 59 см)^{/4,5/}, обладающих градиентной знакопеременной фокусировкой. Система вывода заканчивается дублетом линз (эл.34,35), фокусирующих мезоны на детекторы частиц.

В направлении низкофоновой лаборатории анализатор состоит из двух магнитов МЛ31, расположенных, как это показано на рис.2б (эл.36 и 32), что обеспечивает вертикальную фокусировку в первом отклоняющем магните анализатора (эл.36) и сохранение знакопеременной последовательности градиента в трактах I и II. Угол отклонения в двух магнитах составляет 51° , радиус поворота 144 см, общая длина центральной траектории в магнитах около 180 см.

Работа с мезонными пучками из тракта I осуществляется либо в 4-й, либо в низкофоновой лаборатории путем изменения положения магнитов МЛ31 анализатора импульсов (на рис.2 — соответственно варианты "а" и "б"). Для перехода из положения 2а в 2б необходимо откатить эл.31 с оси пучка, а эл.36 накатить на ось (перемещая их на ~50 см каждый), а эл.32 повернуть на угол $\sim 105^{\circ}$ и передвинуть на ~10 см с траектории пучка в направлении 4-й лаборатории на траекторию в направлении низкофоновой лаборатории. В существовавшем до 1991 г. варианте магнитного анализатора тракта II, где первый отклоняющий магнит МЛ31 был горизонтально фокусирующим,

переход из расположения рис.2а был существенно проще (путем небольшого перемещения и поворота одного магнита эл.31). Однако это приводило к нарушению знакопеременной последовательности градиента при переходе от распадной части тракта I к анализатору тракта II, следствием чего были потери интенсивности пучка мезонов через тракт II. Для устранения этих потерь, а также для изменения геометрии пучка на выходе тракта II и было реализовано расположение магнитных анализаторов, показанное на рис.2.

Помимо магнитного анализатора, тракт II включает в себя знакопеременную по градиенту последовательность 26 электромагнитных линз с апертурой 20 см. Этот канал транспортировки состоит из линз типа МЛ30, МЛ29, МЛ29А, МЛ29Б (см. табл.1), имевшихся в наличии. Линзы имеют примерно одинаковую эффективную длину 35,5 см^{/4/}. Линзы МЛ30 и МЛ29 (МЛ29А, МЛ29Б) существенно различаются^{/4,5/} по конструкции ярма, линзы МЛ29, МЛ29А, МЛ29Б отличаются типом проводника и конструкцией обмоток, поэтому для создания одинакового градиента в линзах тракта требуются разные токи в обмотках. Расстояние между центрами линз в тракте II — 56 см. Это несколько больше, чем в тракте I (50,5 см), что приводит к некоторому уменьшению аксептанса тракта II по сравнению с трактом I и, соответственно, к меньшей интенсивности частиц из канала II.

Как тракт I, так и тракт II содержат в себе вакуумпроводы с форвакуумом. Исключение составляют магнитные анализаторы, содержащие воздушные промежутки так же, как и последний дублет (эл.34,35) тракта I.

Система электропитания тракта II вместе с системой питания тракта I^{/6/} и части тракта I^{/1/} приведена в таблице 1. Для оптимизации ввода мезонов в магнитный анализатор линзы последнего дублета (эл.29,30) распадной части тракта I питаются отдельно, дублет линз (эл.37,38) после анализатора также питается независимо в целях согласования с последующим каналом транспортировки. Раздельное электропитание эл.39÷44, эл.45÷52, эл.53÷57, эл.58÷60 обусловлено конструктивными особенностями линз, о которых говорилось выше. Линзы № 61 и № 62 также питаются раздельно для оптимизации условий фокусировки мезонов на детекторы

Таблица 1. Система электропитания и режимы работы трактов Т, I и II для получения пучков сепарированных отрицательных мюонов с импульсом 125 МэВ/с в низкофоновой лаборатории (направление I)

Тракт элемент	Источник питания	Магнит, линза	Ток источника питания А	Напряжение на шунте мВ	Напряжение источника питания В
Тракт Т					
I-1	МГ-19	ОМ-1*	-350	-35,0	70
I-2,3	16АП	МЛ-3	-350	-17,5	90
III-6	МГ-21	ОМ-2	-50	-5,0	27
УШ-4	8АП	МЛ-3	-380	-19,0	48
УШ-5	10АП	МЛ-3	-380	-19,0	46
Тракт I					
I-4	12АП	МЛ-31	+300	+15,0	50
I-5	18АП	МЛ-29	+380	+19,0	30
I-6	20АП	МЛ-31	-230	-11,5	37
I-7	21АП	20К25	-252	-12,5	15
I-8,9	19АП	20К25	-392	-19,6	46
I-10÷19	МГ-17	20К25	-380	-30,7	200
I-20,20А	23АП	20К25	+420	+21,0	47
I-21÷28	МГ-16	МЛ-30	-450	-33,7	150
I-29÷30	25АП	МЛ-30	+380	+19,0	20
Тракт II					
I-36	13АП	МЛ-31	-178	-8,9	25
II-32	22АП	МЛ-31	-152	-7,6	20
II-37,38	14АП	МЛ-30	+320	+16,0	30
II-39÷44	26АП	МЛ-30	+254	+25,2	30
II-45÷52	МГ-15	МЛ-29	+190	+14,5	92
II-53÷57	МГ-22	МЛ-29Б	+195	+21,0	167
II-58÷60	6АП	МЛ-29А	-230	-11,5	62
II-61	7АП	МЛ-29А	-250	-12,5	24
II-62	МГ-20	МЛ-29А	+230	+25,0	32

* Апертура по вертикали 40 мм.

частиц и формирования различных пространственных распределений пучка.

Режим электропитания (см. табл.1) линз и магнитов оптимизировался, исходя из условий получения максимальной интенсивности сепарированных мюонов на два сцинтилляционных счетчика размером 10×10×1 см³, расположенных в 50 см от последней линзы (эл.62) и включенных в совпадения. Исходный режим для мезонного тракта II выбирался на основе расчетов на ЭВМ для жесткофокусирующего тракта, настроенного на транспортировку мезонов с импульсом 125 МэВ/с, по программе TRANSPORT^{/7/}, а также использовались данные о режиме работы тракта I^{/1/}. В дальнейшем отдельные элементы тракта настраивались методом последовательных приближений.

Режим работы тракта II для транспортировки в низкофоновую лабораторию пучка сепарированных мюонов с импульсом 125 МэВ/с (от распада пионов с импульсом 210 МэВ/с) приведен в таблице 1. Там же даны режимы протонного тракта Т и части мезонного тракта I, без работы которых получение пучков в низкофоновой лаборатории невозможно. Канал I настраивается на импульс 210 МэВ/с, а магнитный анализатор вместе с последующими линзами (тракт II) - на импульс 125 МэВ/с.

Режимы для других импульсов получаются из этого режима, если установить токи в соответствии с условием, что градиент в линзах и поле в отклоняющих магнитах прямо пропорциональны импульсу. Зависимость градиента от тока в линзах МЛ30, МЛ29, МЛ29Б приведена в работе^{/4/}, а кривая зависимости градиента от тока в МЛ29А проходит на 5% выше зависимости в МЛ30. Для настройки тракта II, например, на пионы с импульсом 125 МэВ/с, на этот импульс перестраивается канал I, а настройка канала II остается неизменной. При этом необходимо несколько изменить ток в ОМ2 тракта Т^{/6/}, поскольку для вывода другого импульса мезонов изменение тока в первом отклоняющем магните тракта I (эл.1-4) из-за его рассеянного поля изменяет направление пучка протонов в тракте Т на доли градуса.

3. Параметры пучков сепарированных мюонов с импульсом 125 МэВ/с в низкофоновой лаборатории

На выходе мезонного тракта П в низкофоновой лаборатории (направление I) для отработки режимов работы и измерения параметров пучков используется следующая диагностическая аппаратура^{/1/}. Интенсивность измеряется телескопом из двух сцинтилляционных счетчиков ($10 \times 10 \times 1$ см³), а состав пучка (количество π , μ , e) - по времени пролета. По кривой остановок, когда после первых двух счетчиков устанавливается фильтр переменной толщины, за которым располагаются счетчики 3 и 4, измеряется импульс частиц в пучке. Счетчик 3 ($15 \times 15 \times 1$ см³) включен в совпадения, а счетчик 4 ($20 \times 20 \times 1$ см³) - в антисовпадения. Остановки происходят в 3-м счетчике толщиной 1 г/см² и определяются как $(N(1234)/N(12))$. Профиль пучка в двух плоскостях измеряется путем сканирования специальным двухкоординатным устройством, в котором используются два счетчика с тонким сцинтиллятором (диаметр 0,2 см, длина 10 см).

Параметры протонного пучка, на котором располагаются мезоно-образующая мишень, тракт транспортировки протонов (тракт Т, см. рис.1) до тормозителя, описаны в работе^{/6/}, а сведения о тракте I, продолжением которого является тракт П, даны в работе^{/1/}. Там же приводится описание режима растяжки пучка во времени.

Измеренная на выходе тракта П (после линзы № 62) интенсивность отрицательных мюонов ($P_{\mu} = 125$ МэВ/с) составляет 6×10^4 в секунду на 1 мкА интенсивности протонного пучка. Это несколько меньше интенсивности пучка мюонов на выходе тракта I - 10^5 в секунду^{/1/}, что естественно при транспортировке мюонов на большое расстояние в низкофоновую лабораторию (разница пролетного пути П и I трактов составляет 12,65 м). Другими словами, аксептанс одного дублета на выходе тракта I больше, чем аксептанс 13 дублетов периодической структуры тракта П, что для большого^{/8/} эмиттанса пучка в тракте приводит к некоторым потерям интенсивности. Отметим также, что наличие трубы вакуумпровода в тракте П уменьшает апертуру в линзах до 18,9 см по сравнению с 20 см в линзах (без вакуумпровода) на выходе тракта I.

Полученная интенсивность 6×10^4 в секунду на 1 мкА из тракта П вдвое выше интенсивности в случае, когда магнитный анализатор в первом отклоняющем магните имел фокусировку в горизонтальной плоскости (3×10^4 в секунду^{/2/}), и на порядок выше интенсивности (5×10^3 в секунду) в дискретном тракте, существовавшем до 1988 г.

Хотя непрерывный тракт П имеет периодическую структуру, аналогичную структуре распадной части канала I^{/1/}, и совпадающую с распадную частью длину (~12,5 м), к интенсивности мюонов из-за распада пионов в канале П практически ничего не добавляется.

Пучки положительных мюонов из тракта П имеют интенсивность втрое выше интенсивности отрицательных мюонов, т.е. около 2×10^5 в секунду на 1 мкА пучка протонов.

Важным параметром пучка мюонов является импульсный интервал мюонов на выходе из тракта П. Обычно он определяется из кривой остановок мюонов в веществе, когда с определенным пробегом частиц в веществе отождествляется определенный импульс. На рис.3 приведена кривая остановок отрицательных мюонов, полученная с помощью фильтра из меди для режима работы трактов I и П по

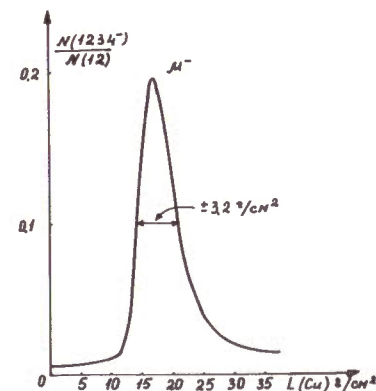


Рис.3. Кривая остановок отрицательных мюонов с импульсом 125 МэВ/с, полученная с помощью медного фильтра в низкофоновой лаборатории за линзой № 62.

таблице 1. Она практически совпадает с кривой^{1/}, полученной на выходе из тракта I для того же импульса. Из кривой находится импульс мюонов и его разброс 125 ± 6 МэВ/с ($\Delta P_{\mu}/P_{\mu} = \pm 5\%$). Этот интервал импульсов (так же, как и его величина) определяет плотности остановок в 1 г/см^2 вещества (около 0,2 в максимуме мюонных остановок от числа падающих на фильтр мюонов).

В работе^{1/} с помощью "звездного" детектора^{9/} измерена примесь пионов в пучке отрицательных мюонов с импульсом 125 МэВ/с на выходе тракта I. Она составляет $(2,4 \pm 0,2)\%$. Из-за распада пионов (для этого импульса распадная длина 6,87 м) на базе 12,56 м на выходе мезонного тракта II пионов остается лишь $(0,38 \pm 0,04)\%$. Поэтому на кривой остановок, приведенной на рис.3, не наблюдается пика пионных остановок в области 10 г/см^2 меди.

Пучки сепарированных мюонов помимо небольших примесей пионов имеют в своем составе и электроны. Для определения состава пучка используется метод времени пролета. Он основан на том, что при одном и том же импульсе частиц на выходе из тракта времени их пролета через тракт различны для частиц с разными массами. Состав пучка из канала I измерен в работе^{1/}. В тракте II для пионов и электронов пролетная база от мезонообразующей мишени до телескопа счетчиков составляет 32 м. Для мюонов пролетная база не определяется, поскольку мюоны возникают от распада пионов на протяжении тракта I, в основном, в начальной его части. Естественно, для большей, чем в тракте I, базы в тракте II разделение пиков частиц лучшее.

В настоящей работе импульс от высокочастотной системы ускорителя служил одним из сигналов для измерения состава пучка по времени пролета, а в качестве другого использовался сигнал из пластического сцинтилляционного счетчика на выходе из тракта. Недостаток использования сигнала высокой частоты ускорителя состоит в том, что он вносит дополнительный вклад в действительную ширину временных пиков из-за разброса частиц в микроструктуре пучка протонов.

На рис.4 показан состав пучков сепарированных положительных и отрицательных мюонов с импульсом 125 МэВ/с, полученный по времени

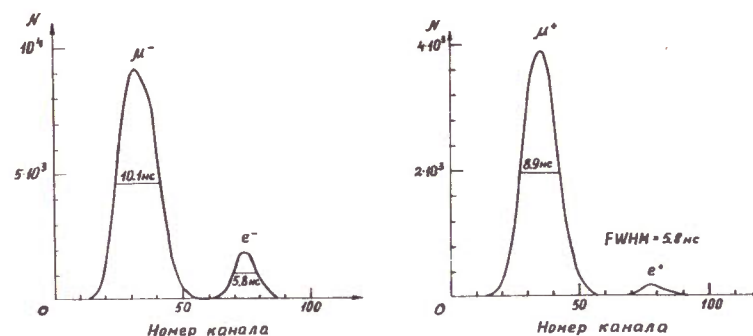


Рис.4. Состав пучков сепарированных отрицательных и положительных мюонов с импульсом 125 МэВ/с, полученный по времени пролета в низкофоновой лаборатории за линзой № 62. Ширина канала 0,579 нс.

пролета за линзой № 62. Примесь электронов в пучке отрицательных мюонов составляет ~9%, а в пучке положительных мюонов - ~3%. Эта примесь зависит от импульса частиц в пучке и толщины мезонообразующей мишени по направлению мезонного пучка. В месте расположения пионного пика пионов не заметно, так как их примесь менее процента.

При настройке тракта II на положительные пионы с импульсом 125 МэВ/с, т.е. когда система захвата в канал I, его распадная часть и тракт II настроены на этот импульс, число пионов становится заметным. Это видно на рис.5. В этом пучке соотношение $e^+:\mu^+:\pi^+$ составляет 1:0,75:0,1. Естественно, из-за распада пионов число их из тракта II в несколько раз меньше, чем из тракта I^{1/}.

Существенными характеристиками пучка являются его размеры и расходимость. На рис.6 приведено пространственное распределение в горизонтальной (x) и вертикальной (y) плоскостях интенсивности пучка отрицательных мюонов с импульсом 125 МэВ/с за линзой № 62 (для положительных мюонов распределение аналогично). Мюонный пучок в горизонтальной плоскости уже, чем в вертикальной, и имеет полуширины в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно $\pm 2,6$ см и $\pm 5,2$ см, измеренная расходимость около $\pm 3^\circ$ в вертикальной плоскости и такая же сходимостъ - в горизонтальной.

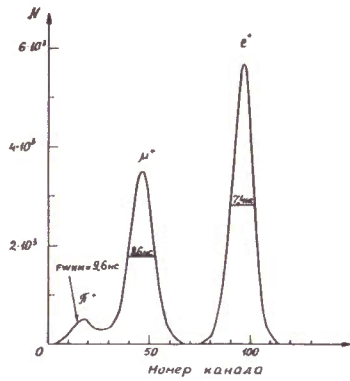


Рис.5. Состав пучка положительных "пионов" с импульсом 125 МэВ/с, полученный по времени пролета в низкофоновой лаборатории.

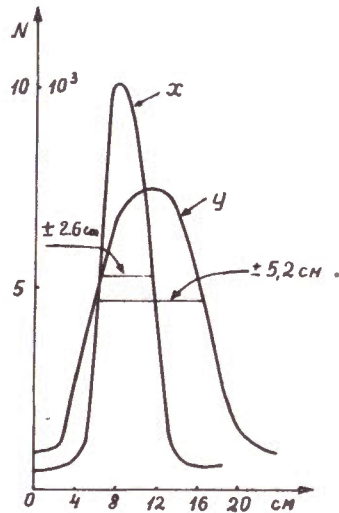


Рис.6. Распределение в горизонтальной (x) и вертикальной (y) плоскостях интенсивности пучка сепарированных отрицательных мюонов с импульсом 125 МэВ/с в низкофоновой лаборатории (для расположения магнитного анализатора рис.2б).

Приведенное пространственное распределение получено, когда магнитный анализатор тракта II расположен, как показано на рис.2б. Это распределение соответствует мишени (или детекторам) экспериментальной установки, вытянутой по вертикали, что имеет место для проводимых на этом пучке экспериментов по исследованию реакций мю-катализа. На рис.7 показано пространственное

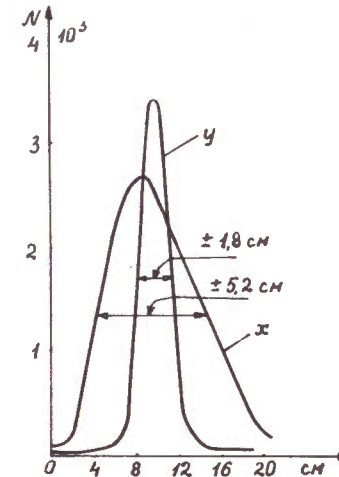


Рис.7. Распределение в горизонтальной (x) и вертикальной (y) плоскостях интенсивности пучка сепарированных отрицательных мюонов с импульсом 125 МэВ/с за линзой № 62 (для магнитного анализатора, в котором первый отклоняющий магнит горизонтально фокусирующий). Токи питания последнего дублета тракта II 285 А.

распределение пучка за линзой № 62 для случая, когда первый отклоняющий магнит магнитного анализатора — горизонтально фокусирующий. Видно, что пучок шире в горизонтальной плоскости и уже в вертикальной, т.е. использование расположения элементов магнитного анализатора рис.2б не только увеличило интенсивность мюонов на выходе тракта II, но и существенно изменило пространственное распределение пучка частиц.

Надо заметить, что изменение тока в двух последних линзах тракта II существенным образом влияет на пространственное распределение пучка. Полуширина пучка может изменяться в несколько раз, уменьшаясь в одной плоскости и увеличиваясь в другой, при этом интенсивность пучка уменьшается. Распределения рис.6 и рис.7 соответствуют максимуму интенсивности пучка, попадающего на счетчики размером $10 \times 10 \text{ см}^2$.

4. Заключение

В настоящее время тракт II транспортировки пучков сепарированных мюонов в низкофоновую лабораторию является эффективным жесткофокусирующим трактом с интенсивностью отрицательных мюонов (импульс 125 МэВ/с) 6×10^4 на 1 мкА протонного пучка. Интенсивность пучка положительных мюонов втрое выше. Изменение положения магнитного анализатора тракта II привело не только к росту интенсивности вдвое, но и к существенному изменению геометрии пучка на выходе, лучше соответствующей геометрии физической установки, на которой в настоящее время ведутся исследования реакций мю-катализа.

Несмотря на некоторое уменьшение интенсивности пучка мезонов из тракта II по сравнению с интенсивностью из тракта I, физические исследования на пучках канала II имеют ряд полезных особенностей:

а) на два порядка меньший уровень фоновых излучений из-за наличия дополнительной защиты, удаления физических установок от ускорителя и мезонообразующей мишени, отсутствия выхода других пучков в низкофоновой лаборатории;

б) доступ к физическим установкам во время работы ускорителя на других пучках, а в некоторых случаях и на пучках тракта II.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить за помощь в работе сотрудников Лаборатории ядерных проблем: Л.М.Онищенко, В.Г.Зинова, А.Д.Кониная, М.П.Баландина, А.Е.Дребушко, В.А.Фадееву.

Литература

1. Баландин М.П. и др. ОИЯИ, 9-90-435, Дубна, 1990.
2. Демьянов А.В. и др. ОИЯИ, Д1-90-480, Дубна, 1990, с.10.
3. Демьянов А.В. и др. ОИЯИ, 9-8270, Дубна, 1974.
4. Роганов В.С. ОИЯИ, Б1-4707, Дубна, 1969.
5. Демьянов А.В. и др. ОИЯИ, Р9-8222, Дубна, 1974.
6. Андреев Е.М. и др. ОИЯИ, 9-90-376, Дубна, 1990.
7. Brown K.L. et al. CERN. 73-16. Geneva, 1973.
8. Демьянов А.В. и др. ОИЯИ, 1-4156, Дубна, 1968.
9. Варламов В.Г. и др. ОИЯИ, 1-4084, Дубна, 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 мая 1992 года.