

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С34521
Д-321

311-75
9 - 8270 e

417/2-75

А.В.Демьянов, В.П.Джелепов, Б.И.Замолдчиков,
А.А.Кропин, В.С.Роганов

ПРОЕКТИРУЕМЫЕ КАНАЛЫ ПУЧКОВ МЮОНОВ
ФАЗОТРОНА
С ВАРИАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

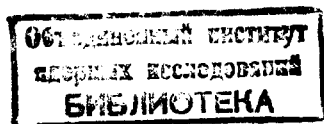
1974

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

9 - 8270

А.В.Демьянов, В.П.Джелепов, Б.И.Замолодчиков,
А.А.Кропин, В.С.Роганов

ПРОЕКТИРУЕМЫЕ КАНАЛЫ ПУЧКОВ МЮОНОВ
ФАЗОТРОНА
С ВАРИАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ



1. Введение

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ планируется реконструкция существующего синхроциклотрона в фазотрон с вариацией магнитного поля /установка "Ф"/. В работе /1/ сообщены основные параметры фазотрона и отмечены особенности проведения экспериментов на нем. Там же приведена схема каналов пучка частиц и указаны принципы, на основе которых выбрана эта схема /рис. 1/. Настоящая работа содержит описание каналов I и X, в которых формируются пучки мюонов.

Пучки мезонов формируются 5 каналами / I, II, III, X и через линзу ШМЛ канала IX /. Они получаютс я как от мишеней, расположенных внутри ускорителя, M_1, M_2 /через каналы I, II, X/, так и от мишеней, находящихся вне его, M_3, M_4 /через канал III / и M_π /в канале IX / /1/. На рис. 2 показано расположение внутренней мишени M_1 для образования мезонных пучков в широком интервале импульсов. В системе каналов фазотрона будут созданы пучки во всем интервале энергий мезонов, образованных протонами с энергией 700 МэВ при взаимодействии с ядрами мишени. Чистые мюонные пучки получаютс я от внутренней мишени M_1 /через каналы I и X/.

Магнитное поле фазотрона для мезонов, образованных от внутренней мишени, играет роль линзы с фокусирующими и анализирующими свойствами. Однако в отличие от поля синхроциклотрона, где эти свойства зависят от радиуса мишени и угла вылета мезонов /2/, для поля фазотрона имеется зависимость от азимута мишени из-за наличия пространственной вариации магнитного поля.

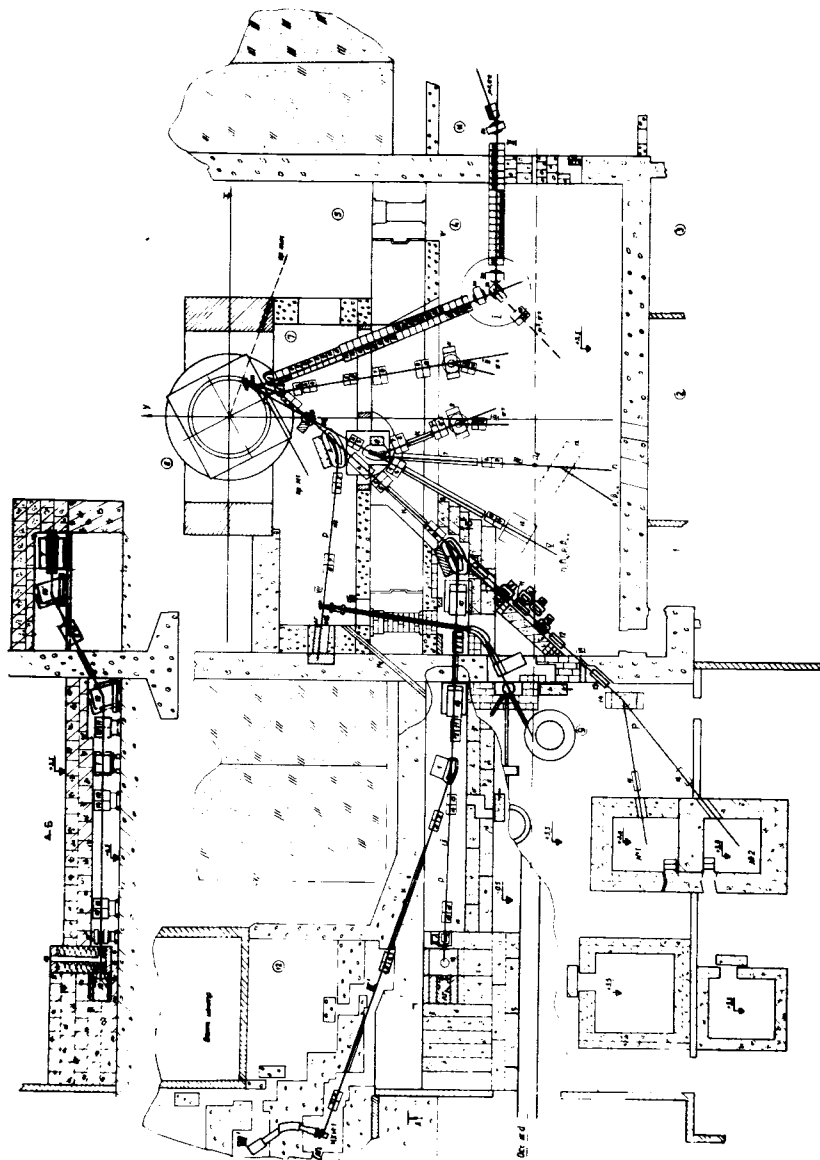


Рис. 1. Схема расположения каналов пучков фазотрона.

2. Канал I сепарированных мюонов

Основное назначение канала - получение пучков мюонов с малыми пионными примесями /сепарированных мюонов/ в диапазоне энергий $30 \div 300$ МэВ. Для получения таких пучков фокусируются мюоны, рожденные в направлении, обратном пионному импульсу в системе центра масс. Кроме этого, в канале формируются пучки пионов и мюонов, летящих по направлению пионного импульса.

Принцип получения сепарированных мюонных пучков состоит в двойном магнитном анализе по импульсу /на входе в канал и на выходе из него/ и эффективной фокусировке мюонов, образованных при распаде пионов в канале. Поэтому канал I включает в себя 3 части: 1/ систему инжекции пионов в канале, 2/ жесткофокусирующий тракт квадрупольных магнитов, 3/ систему вывода из канала мезонов определенного импульса и их фокусировки на детекторы физических установок.

Тип и количество элементов, используемых в канале I, указаны в табл. 1. Все линзы имеют апертуру 20 см. Параметры линз и магнитов приведены в работе /1/.

Оптимизация системы инжекции преследует несколько целей:

1/ захват пионов из мишени в возможно большем телесном угле и в определенном импульсном интервале, 2/ ограничение наименьшего импульса захватываемых пионов на входе для получения пучков мюонов без пионных примесей, 3/ фокусировку пионов на вход тракта.

Система инжекции включает в себя магнитное поле фазотрона на протяжении от мишени до входа в магнит СП-034 и элементы 1, 2, 3 канала. Поле фазотрона слабо дефокусирует пионы в вертикальной плоскости и довольно сильно фокусирует их в горизонтальной плоскости, примерно вдвое увеличивая угол захвата в канал. В этом поле происходит также импульсный анализ пионов. Магнит СП-034 отклоняет пионы выбранного импульса на ось канала, а две последующие линзы производят их фокусировку на вход тракта из чередующихся по знаку градиента фокусирующих линз.

Таблица I. Элементы канала I и X

Канал I	Тип элемента	Кол-во	Мощность (кВт)
I	СП-034	1	350
2, 3	20К-25Б-1000 (П)	2	133
4 + 11	20К-25Б-1000 (П)	8	532
12 + 19	20К-25Б-1000 (I)	8	532
20 + 27	20К-25Б-1000 (I)	8	532
28 + 31	МЛ-30А	4	240
32 + 34	МЛ-31	3	249
35, 36А	МЛ-30А	2	120
Максимальная мощность электропитания канала I			2688 кВт

Канал X	Тип элемента	Кол-во	Мощность (кВт)
37 + 46	МЛ-30А	10	600
47 + 53	МЛ-30А	7	420
54	МЛ-31	1	83
55, 56	МЛ-29	2	208
Максимальная мощность электропитания канала X			1311 кВт

В отличие от системы инжекции в мюонный канал синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем, где фокусировка и отклонение совмещены в 1-ом квадрупольном магните^{/3/}, в канале 1 фазотрона эти функции разделены для расширения диапазона энергий пионов, которые могут захватываться в канал. Рассеянного поля фазотрона /около 1,5 Т/ вполне достаточно, чтобы ограничить захват пионов со стороны малых импульсов для сепарации мюонов от пионных примесей.

В мезонный канал пионы захватываются от мишени, которая может размещаться на пучке протонов, либо циркулирующем / M_1 / внутри камеры, либо выводимом / M_2 / из нее. Из мишени M_1 захватываются отрицательные пионы, образованные под углами около 0° относительно пучка протонов, и положительные пионы, образованные под углами около 180° . Магнитное поле фазотрона не позволяет вывести из ускорителя пионы с энергией меньше 90 МэВ.

Из мишени M_2 система инжекции может захватывать мезоны с меньшей энергией. Интенсивность пучков будет несколько меньшей из-за отсутствия кратности прохождения, из-за меньшего тока протонного пучка /вывод составляет около 50%/ и больших углов мезообразования /около 50° /. Кроме того, примеси электронов и пионов в пучках мюонов будут большими, как это было установлено при моделировании^{/4/} подобных условий на синхроциклотроне. Тем не менее мишень M_2 следует использовать также для получения пучков положительных мезонов с энергией больше 100 МэВ, которые практически недоступны при использовании мишени M_1 вследствие малости сечения образования пионов под углами вылета около 180° .

Жесткофокусирующий тракт канала I состоит из 26 квадрупольных линз, чередующихся по направлению поля /эл. 4 ÷ 29/. Он предназначен для непрерывной фокусировки мюонов, возникающих от распада на лету пионов вдоль всего тракта. Непрерывность тракта обеспечивает достаточно высокую его эффективность к захвату мюонов, зависящую от апертуры линз, протяженности их полюсов, расстояния между ними, градиента магнитного поля в них, энергии пионов и мюонов, длины канала^{/5/}.

В отличие от мюонного канала синхроциклотрона плоскости фокусировки пионов в магнитном поле фазотрона и системы вывода совпадают с плоскостями фокусировки жесткофокусирующего тракта. В существующем мезонном канале на синхроциклотроне это условие не соблюдалось: наклон плоскостей под углом в 45° был обусловлен конструкцией использованных на участке амбразуры линз МЛ-29. Специально спроектированные квадрупольные линзы вытянутой прямоугольной формы 20К25 /Б/ - 1000 позволили избежать этого недостатка и упростить согласование выхода из тракта со входом в анализирующей магнит системы вывода.

Конечный участок мезонного канала - система вывода - имеет своим основным назначением 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 импульсами $P_\pi \pm \Delta P_\pi$, захваченных в канал. Это уменьшает примеси пионов до 10^{-3} . Система вывода обеспечивает также и фокусировку мезонов.

Оптимизация системы вывода преследует несколько целей:

- 1/ получение возможно более высокой интенсивности мюонов,
- 2/ выделение мюонов с заданным импульсом,
- 3/ достижение высокой степени сепарации мюонов от π , e , p , γ ,
- 4/ достижение максимальной плотности мюонных остановок при наименьшем потоке падающих на мишень мюонов,
- 5/ получение максимального числа мюонных остановок,
- 6/ вариация величины и направления поляризации пучка мюонов,
- 7/ создание условий фокусировки, оптимальных для конкретного физического эксперимента,
- 8/ обеспечение возможности относительно-го мониторинга во время эксперимента детекторами, расположенными вне основного пучка.

Такая оптимизация достигается в системе вывода мезонного канала с помощью квадрупольных линз и жесткофокусирующих магнитов /эл. 30 ÷ 36А/. Дублет линз МЛ-30А /эл. 30, 31/ служит для фокусировки мезонов, выходящих из тракта, на выход анализирующего магнита, состоящего в свою очередь из трех жесткофокусирующих

диполей МЛ-31 /эл. 32, 33, 34/, в котором осуществляется отклонение пучка на 66° . Дублет линз после анализирующего магнита /эл. 35, 36А/ обеспечивает фокусировку мезонов на детекторы и мишени.

Пять элементов /31-35/ могут поворачиваться как единое целое для обеспечения выхода мезонов по двум направлениям /угол между которыми составляет 132° / /рис. 1/. Детекторы относительного мониторингирования могут располагаться под углом около 30° к этим направлениям. Система транспортировки физических установок подобна существующей в настоящее время на синхротроне /6/.

В апертуре линз мезонного канала располагается вакуумная труба, обеспечивающая вакуум порядка 10^{-2} мор на всем протяжении тракта. В необходимых случаях элементы канала, расположенные в зале ускорителя, удаляются с помощью крана и манипулятора, при этом вакуумная труба выдвигается в зал экспериментальных установок /4/.

Интенсивность мюонных пучков зависит от значительного числа факторов. Количество пионов с импульсом P_π , образованных в мишени толщиной t протонами с энергией E под углом θ , определяется выражением

$$\frac{d^2 N_\pi(P_\pi)}{d\Omega_\pi dP_\pi} = i_p \cdot k \cdot \rho_{я} \cdot \frac{d^2 \sigma(P_\pi, \theta_\pi, E_p)}{d\Omega_\pi \cdot dP_\pi} \cdot \eta_p \cdot \delta_\pi,$$

где i_p - интенсивность протонного пучка, k - кратность прохождения пучка через внутреннюю мишень или коэффициент вывода протонов из ускорителя для внешней мишени, $\rho_{я}$ - число ядер в мишени, $\eta_p(E_p)$ и $\delta_\pi(P_\pi)$ - коэффициенты, учитывающие поглощение протонов и пионов в мишени.

Число пионов N_π , захваченных в канал,

$$N_\pi = \int_{P_\pi^{\min}}^{P_\pi^{\max}} \frac{d^2 N_\pi(P_\pi)}{d\Omega_\pi \cdot dP_\pi} \cdot \Delta\Omega_\pi(P_\pi) \cdot \epsilon_\pi(P_\pi) \cdot dP_\pi,$$

определяется пространственным углом захвата $\Delta\Omega_\pi(P_\pi)$, импульсным интервалом $\Delta P_\pi = (P_\pi^{\max} - P_\pi^{\min})$ и

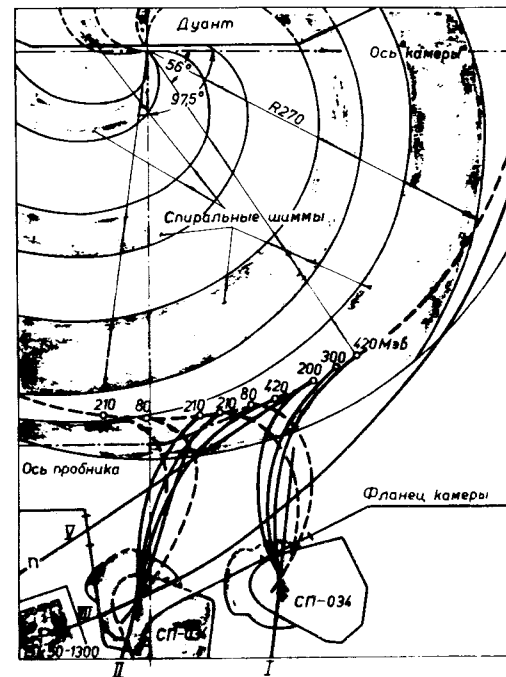


Рис. 2. Расположение мишени внутри вакуумной камеры фазотрона.

эффективностью $\epsilon_\pi(P_\pi)$ захвата пионов в канал, учитывающей распад пионов в канале. Отсюда вычисляется число мюонов N_μ на выходе из канала в импульсном интервале ΔP_μ , определяемом разрешением анализирующего магнита системы вывода:

$$N_\mu(P_\mu) = \int_{P_\pi^{\min}}^{P_\pi^{\max}} \frac{d N_\pi(P_\pi)}{d P_\pi} \cdot \frac{P_\mu + \frac{1}{2} \Delta P_\mu}{P_\mu - \frac{1}{2} \Delta P_\mu} \cdot \epsilon_\mu(P_\pi, P_\mu) \times \\ \times \frac{dn_\mu(P_\pi, P_\mu)}{dP_\mu} dP_\mu dP_\pi,$$

где $\frac{dn_\mu(P_\pi, P_\mu)}{dP_\mu}$ - дифференциальный импульсный

спектр мюонов, образованный при распаде пионов, а $\epsilon_{\mu}(P_{\pi}, P_{\mu})$ - эффективность захвата мюонов в канале, учитывающая углы распада, кинематику распада и параметры элементов канала.

Эффективность канала I к мюонам довольно велика. Она составляет около 15% для мюонов с импульсом $P_{\mu} = 0,6 P_{\pi} / P_{\pi} = 200 \text{ МэВ/с}$ и около 60% для $P_{\mu} \approx P_{\pi}$ от числа мюонов, образованных в канале. Эта эффективность существенно зависит от энергии пионов, поскольку величины распадных углов мюонов сильно возрастают с уменьшением энергии пионов. Максимальный распадный угол для $P_{\pi} = 200 \text{ МэВ/с}$ составляет $11,4^{\circ}$, а для 100 МэВ/с - $23,2^{\circ}$ и эффективность уменьшается примерно в 7 раз для сепарированных мюонов.

Следует обратить внимание на противоречивость требований к длине канала при формировании сепарированных мюонных пучков или пучков пионов. Для мюонных пучков жесткофокусирующий тракт должен быть по возможности длиннее, чтобы в нем больше распалось пионов, т.к. $\epsilon_{\mu} \sim [1 - \exp(-\ell_T/\lambda(P_{\pi}))]$, где ℓ_T - длина фокусирующего тракта, а $\lambda(P_{\pi})$ - распадная длина пионов. Для пионных пучков канал должен быть возможно короче, т.к. $\epsilon_{\pi} \sim \exp(-\ell_K/\lambda(P_{\pi}))$, где $\ell_K = \ell_u + \ell_T + \ell_B$ - длина канала, а ℓ_u и ℓ_B - протяженность системы инжекции и вывода. Очевидно также, что эффективность к мюонам при заданной длине канала будет увеличиваться с ростом ℓ_T/ℓ_K .

Жесткофокусирующий тракт из квадрупольных линз не является единственно возможной системой для фокусировки мюонов. Сравнение каналов из квадрупольных спиралевидными полюсами^{/7/} сверхпроводящего соленоида^{/8/} и канала транспортировки "мюонного облака", образованного около пионной мишени^{/9/}, показало, что серьезно конкурировать могут каналы из квадрупольных линз и сверхпроводящего соленоида /подробнее см.^{/10/}/. Однако большой эмитанс пучка на выходе из сверхпроводящего соленоида и технические трудности при конструировании и размещении соленоида не позволяют использовать такой канал в условиях реконструкции синхроциклотрона.

В табл. 2 приведены данные о проектируемых мюон-

Таблица 2. Параметры проектируемых мюонных каналов

Ускоритель	E _π МэВ	E _μ МэВ	И _π МэВ	Мишень		Инжекция пионов		Фокусирующ. тракт			Вывод	
				t г/см ²	ρ _π г/см ³	θ _π град.	ρ _μ м	α	H	Тес.	ℓ _T м	ℓ _B м
ЛЯП ОИЯИ	700	50	Be	8	0	2,5	20	10	14	5,6	5	5
ЛАМЦФ	800	1000	Cu	32	60	6,1	30	0,53	11	5,6	5	5
СИН	590	100	Be	22	0	5,5	14	40	8	7,0	3,5	5
ЦЕРН	600	10	Be	8	0	3,0	20	10	11	5,0	5	5

α - диаметр апертуры;

H - величина магнитного поля на полюсе.

ных каналах на разных ускорителях. В канале СИИ^{/11/} используется сверхпроводящий соленоид, а в каналах ускорителей Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, ЛАМПФа^{/10/}, ЦЕРНа^{/12/} - квадрупольные линзы. В табл. 3 показаны ожидаемые интенсивности пучков отрицательных мюонов на выходе из каналов. Сравнение интенсивностей мезонов, приведенных к одному значению тока протонов N_p/i_p , дает соотношение для каналов Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, ЛАМПФа, СИИ и ЦЕРНа - 1,0 : 0,8 : 2,0 : 0,5. Можно отметить, что большее значение N_p/i_p в мюонном канале СИИ достигнуто за счет применения сверхпроводящего соленоида, в котором эффективность ϵ_μ больше. С другой стороны, в канале ЛАМПФа значение N_p/i_p , близкое к тому, которое ожидается в канале фазотрона Лаборатории ядерных проблем, обусловлено применением линз с очень большой апертурой /30 см/.

В табл. 3 приведены интенсивности сепарированных пучков отрицательных мюонов с импульсом 115 МэВ/с, в которых примесь пионов не превосходит 1% /меньше 0,002 в остановках/. Интенсивность таких мюонов довольно велика и составляет $5 \cdot 10^6$ в сек для канала 1.

С помощью системы вывода из фокусирующего тракта можно получить целый спектр мюонных /и пионных/ пучков. Например, для канала, работающего в режиме формирования пучков мюонов от распада пионов с импульсом 200 МэВ/с, можно получать пучки мюонов в интервале от 105 до 200 МэВ/с с содержанием пионов от 1 до 70%. Интенсивность пучков несепарированных мюонов в несколько раз больше интенсивности сепарированных мюонов и для $P_\mu = 200$ МэВ/с составляет $3,6 \cdot 10^7$ в сек /табл. 3/. Пучки несепарированных мюонов вполне могут быть использованы в экспериментах, особенно с положительными мюонами, поскольку пионы в этих экспериментах не создают существенного уровня фона.

Интенсивности пучков сепарированных мюонов от фазотрона даны в табл. 4. Потoki μ^+ -мезонов с импульсом 85, 90, 95 МэВ/с примерно в 3 раза меньше. Интенсивность μ^- -мезонов в несепарированных пучках приведена в табл. 5. Потoki μ^+ -мезонов с импульсом

Таблица 3. Интенсивности пучков сепарированных (115 МэВ/с), несепарированных (200 МэВ/с) мюонов и пионов (200 МэВ/с) из каналов:

Ускоритель	$P_\mu = 115$ МэВ/с		$P_\mu = 200$ МэВ/с		$P_\pi = 200$ МэВ/с	
	$\pm \Delta R_\mu$ г/см ²	N_μ 10 ⁶	N_μ 10 ⁶	N_μ 10 ⁶	N_μ 10 ⁶	N_π 10 ⁶
ЛЯП ОИЯИ	1,5	5,0	1,7	36	4,2	44
ЛАМПФ	1,5	80	26	350	40	780
СИИ	1,3	20	10	54	9,0	250
ЦЕРН	1,5	0,5	0,2	2,1	0,25	4,0
						5,3
						97
						44
						0,5

ΔR_μ - полуширина кривой пробегов в графите (без учета страгглинга и многократного рассеяния) мюонов, соответствующая $\pm \frac{\Delta R}{R}$;
 N_μ, N_π - потоки мюонов или пионов (в сек); N_μ, N_π - число оставок мюонов или пионов для максимума кривой остановок в мишени толщиной 1 г/см² графита в сек.

Таблица 4. Интенсивность N_μ μ -мезонов и плотность остановок R_μ (на 1 г/см² в сек для графита без учета страгглинга многократного рассеяния) в сепарированных пучках канала I.

P_μ (МэВ/с)	85	90	95	110	115	150	160	250
E_μ (МэВ)	30	33	36	44	50	78	85	165
N_μ (10 ⁶)	0,8	1,1	1,7	4,1	5,0	10,0	10,0	10,7
R_μ (10 ⁶)	0,7	0,8	1,0	1,6	1,7	1,8	1,6	0,9
N_μ/n_μ	1,2	1,4	1,6	2,6	2,9	5,6	6,2	11,4
$\Delta P/P = \pm 5\%$;	$N_{50}/N_\mu < 0,01$; $R_{50}/R_\mu < 0,002$							

180 МэВ/с в 4 раза меньше. Состав и энергетические спектры этих пучков аналогичны данным, приведенным в /6/.

Значительное число экспериментов будет проводиться на фазотроне с пучками сепарированных мюонов, останавливающихся в веществе. В настоящее время такие исследования проводятся с мишенями весом в сотни грамм. Мюонный канал I фазотрона позволит использовать мишени весом в десятки грамм.

Плотность остановок в 1 г/см²

$$n_\mu = \frac{N_\mu}{2 \chi P_\mu} \cdot \frac{dP_\mu}{dR_\mu}$$

для пучка с заданным значением $\chi = \frac{\Delta P_\mu}{P_\mu}$ существенно возрастет с уменьшением P_μ потому, что $\frac{dP_\mu}{dR_\mu}$ /в конце пробега R_μ / также растет с уменьшением P_μ . Например, для остановок мюонов с импульсами 50, 115

и 200 МэВ/с в графите отношение $\frac{dP_\mu}{dR_\mu}$ составляет 3,8 : 1 : 0,6 и соответственно отношение плотностей остановок - 8,7 : 1 : 0,35. Однако, как отмечалось выше, эффективность канала к мюонам с импульсом 50 МэВ/с / $P_\pi \approx 100$ МэВ/с / в 7 раз меньше, чем для мюонов с импульсом 115 МэВ/с, и при относительном росте плотности остановок их число существенно уменьшается.

Кроме того, еще два обстоятельства затрудняют использование мюонов малых энергий /50 МэВ/с/. Формирование таких сепарированных мюонов приводит к необходимости образовывать пучки от внешних мишеней, так как пионы, от распада которых получают эти мюоны, не выходят из ускорителя. Это еще в несколько раз снижает интенсивность последних. Использованию мюонных пучков с импульсом 50 МэВ/с / $E_\mu = 11$ МэВ / мешает также их небольшой пробег в веществе /около 1 г/см² в графите/. Выбранный для получения остановок импульс 115 МэВ/с вполне подходит для мишеней толщи-

Таблица 5. Интенсивность N_{μ} пучков несепаированных μ -мезонов и плотность остановок n_{μ} из канала I

P_{μ} (МэВ/с)	180	200	270	400
E_{μ} (МэВ)	104	129	185	307
N_{μ} (10^6)	19	36	45	34
n_{μ} (10^6)	2,6	4,0	3,5	1,7
N_{μ}/n_{μ}	7,5	8,9	12,7	20,0
$\Delta P/P = \pm 5\%$;	$N_{\mu}/N_{\pi} = 0,55$			

Таблица 6. Интенсивность N_{π} пучков отрицательных пионов и плотность остановок n_{π} (на 1 г/см^2)

P_{π} (МэВ/с)	180	200	270	400
E_{π} (МэВ)	89	104	165	288
N_{π} (10^6 I/сек)	33	44	55	66
n_{π} (10^6 I/сек)	4,6	5,3	4,5	3,5
N_{π}/n_{π}	7,2	8,3	12,2	18,9
$\Delta P/P = \pm 5\%$;	$N_{\pi}/N_{\mu} = 1,8$			

ной около одного $г/см^2$ с хорошим соотношением между интенсивностью падающих на мишень и останавливающихся в ней мюонов, а их пробег в веществе /12 $г/см^2$ графита/ также приемлем в большинстве экспериментов.

В табл. 3-5 даны значения плотности остановок на 1 $г/см^2$ для пучков мюонов из канала I и мюонных каналов других ускорителей. Значения n_μ получены без учета страгглинга, который в графите составляет $\pm 0,35$ $г/см^2$ для 115 $МэВ/с$ и $\pm 1,14$ $г/см^2$ для 200 $МэВ/с$, и без учета многократного рассеяния в веществе тормозящего фильтра и мишени, где мюоны останавливаются. Эмитанс пучков из различных каналов /табл. 2,3/ составляет 1-2 $см.рад$, а эффективная площадь S пучка, сфокусированного на мишень, - 20-50 $см^2$. Как можно видеть, плотность остановок на 1 $г$ мишени из графита, определяемая величиной n_μ/S , для мюонов с импульсом 115 $МэВ/с$ из канала I составляет $0,4 \cdot 10^5$ $1/сек$. Из табл. 4 следует, что для несепарированных мюонов интенсивность выше примерно в 7 раз, а плотность остановок увеличивается в 2,5 раза.

Из канала I формируется целый спектр мюонных пучков с импульсным разбросом в каждом пучке $\pm 5\%$. Эти пучки различаются не только изменением в них количества мюонов и пионов, но также изменением величины и направления продольной поляризации пучка. В настоящее время значительное число работ посвящено изучению остаточной поляризации положительных и отрицательных мюонов в различных веществах. Эти поляризационные эксперименты еще в большем объеме будут продолжаться на пучках канала I фазотрона.

Мюоны, образованные при распаде пионов, полностью продольно поляризованы в пионной системе покоя. В лабораторной системе продольная поляризация мюонов определяется проекцией их спина на направление движения. Она зависит от угла образования мюона в пионной системе покоя, т.е. от величины его импульса при фиксированной энергии пионов. Величина продольной поляризации определяется выражением /13/

$$\cos \psi = \pm \frac{(1 - \bar{\beta}) E_{0\pi} - E_{0\mu}}{\bar{\beta} P_\mu c}$$

/знак \pm для μ^\pm -мезонов/, где ψ - угол между вектором поляризации мюона и направлением его импульса, $\bar{\beta} = 0,2714$, $E_{0\pi}$ и $E_{0\mu}$ - полная энергия пиона и мюона.

Для вычисления величины поляризации пучка мюонов с импульсом P_μ функция, определяющая $\cos \psi$, должна быть проинтегрирована по спектру пионов и мюонов в канале /см. формулы на стр.11/ с учетом эффективности ϵ_π и ϵ_μ . Рассчитанная таким образом зависимость продольной поляризации от импульса пучка мюонов для мюонного канала синхроциклотрона / $P_\pi = 260$ $МэВ/с$ / показана на рис. 3. Измеренные значения поляризации на мюонном канале синхроциклотрона хорошо согласуются с этой кривой.

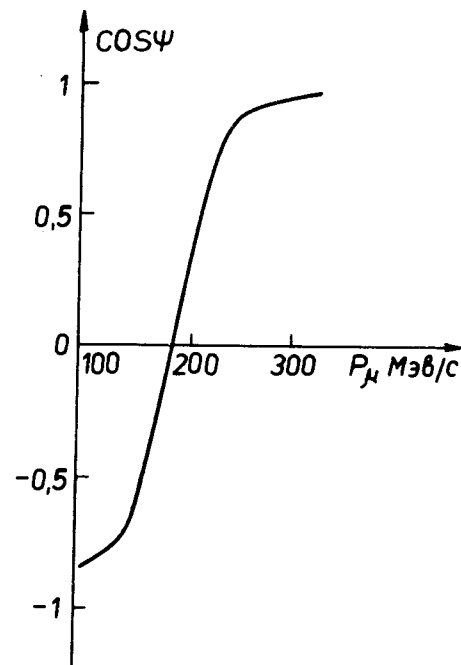


Рис. 3. Зависимость величины продольной поляризации от импульса мюонов на выходе из канала I для спектра пионов со средним импульсом 260 $МэВ/с$, захватываемых в канал.

Для канала I фазотрона эта зависимость аналогична. Из кривой видно, что поляризация сепарированных мюонов довольно значительна $\approx 0,8$ и изменяет знак для несепарированных мюонов. Из-за азимутальной симметрии процесса распада и системы фокусировки поперечная составляющая поляризации отсутствует в мюонных пучках канала.

Для проведения экспериментов на пучках с использованием электронной аппаратуры существенным является распределение пучка во времени. Нуклонные и пионные вторичные пучки практически повторяют временную структуру первичного протонного пучка. Для пучков мюонов из мюонного канала происходит заметное изменение этой структуры. На длине канала I $/21,4 \text{ м}/$ разброс во времени пролета возникающих при распаде мюонов приводит к размытию временной структуры.

Для пионных пучков с импульсом 200 МэВ/с из канала такое размытие составляет 3 нсек . Оно в основном обусловлено импульсным разбросом на выходе $/\pm 5\%/$ и геометрической разницей в длине пути частиц в жесткофокусирующем канале ($\Delta L/L \approx 0,01$). Для пионов и мюонов с импульсом, близким к пионному, такой разброс приводит лишь к 20% -ному увеличению коэффициента заполнения для микроструктуры пучка, аналогичной существующей на синхроциклотроне $/6/$ /микронимпульсы длительностью 15 нсек через 75 нсек , если не используется магнитная система растяжки пучка/.

Для сепарированных мюонных пучков ($P_\mu \approx 0,6 P_\pi$) разброс времени пролета $\approx 13 \text{ нсек}$, кроме того, обусловлен значительно большим интервалом импульсов пионов, захваченных в канал $/\pm 15\%/$, и тем обстоятельством, что мюоны могут возникнуть в любой точке вдоль фокусирующего тракта и до распада частицы летят со скоростью пионов ($\beta \approx 0,82$), после распада - со скоростью мюонов ($\beta = 0,72$). Это увеличивает коэффициент заполнения для микроструктуры почти вдвое - с $0,2$ до $0,37$. Разброс времени пролета возрастает с уменьшением импульсов пионов и мюонов. Этот разброс может оказать еще большее влияние на увеличение коэффициента заполнения при другой микроструктуре пучка. Например,

на мюонном канале остановок $/10/$ в Лос-Аламосе это обстоятельство приведет практически к отсутствию микроструктуры.

В заключение этого раздела отметим основные достоинства мюонных пучков из канала I фазотрона: 1. Значительная интенсивность мюонов. 2. Малые примеси других частиц в пучках. 3. Возможность управления геометрическими параметрами пучков на выходе из канала. 4. Возможность получения пучков частиц в широком диапазоне импульсов на одной экспериментальной установке. 5. Возможность получения частиц обоих знаков. 6. Варьируемая по величине и направлению продольная поляризация пучка. 7. Значительное число остановившихся мезонов и высокая плотность остановок. 8. Сглаживание временной структуры.

4. Пионные пучки из мезонного канала

При настройке системы вывода канала I на импульс P_π в этой системе формируются пионные пучки с примесью $\approx 0,3/$ мюонов и электронов. Интенсивности таких пучков значительны. Для них также характерны некоторые другие особенности, отмеченные в конце предыдущего раздела.

На рис. 4 показано распределение пионов с центральным импульсом 260 МэВ/с /положение максимума пионного спектра/ из канала I полученное на основе спектра, измеренного на мезонном канале синхроциклотрона $/6/$. Центральный импульс задается выбором положения мишени, режимом работы системы инжекции и жесткофокусирующего тракта. Режим работы системы вывода определяет импульс на выходе из канала. Расположение и параметры канала позволяют выбирать для пионов центральный импульс в диапазоне $150-450 \text{ МэВ/с}$. Эмитанс пучков пионов и условия их формирования аналогичны описанному для пучков мюонов.

В табл. 3 приведены данные об интенсивности пучков пионов и плотности остановок на 1 г/см^2 для каналов разных ускорителей. Хотя соотношение между интен-

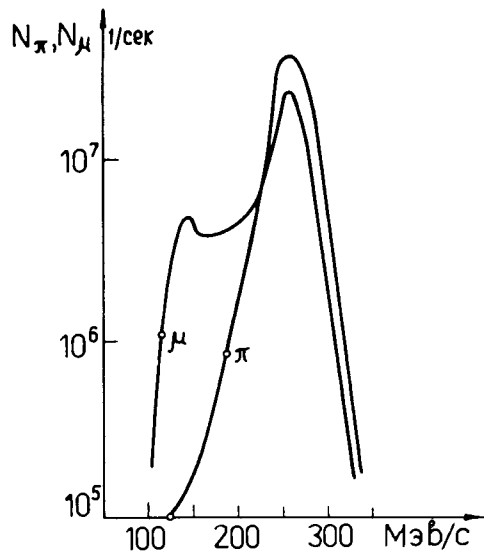


Рис.4. Спектры пионов и мюонов на выходе из канала для пионов со средним импульсом 260 МэВ/с, захватываемых в канал.

сивностью и плотностью остановок в этих пионных пучках хуже, чем для сепарированных мюонов, однако эти плотности значительно превосходят существующие в настоящее время. Интенсивности некоторых пучков отрицательных пионов из канала I показаны в табл. 6. Потоки π^+ -мезонов с импульсом 180 МэВ/с в 4 раза меньше.

Значительная интенсивность остановок отрицательных пионов из канала I позволяет использовать их для биомедицинских целей. Эти частицы обладают той особенностью, что в конце пробега, не считая ионизационных потерь, заметная часть /около 30 МэВ/ их энергии покоя превращается в кинетическую энергию протонов, α -частиц и тяжелых ионов, и, таким образом, имеется значительное удельное энерговыделение. Такое свойство отрицательных пионов позволяет использовать их в целях радиационной терапии ¹⁴. Для остановки пионов в объе-

ме 7 x 7 x 13 см³ на разных глубинах в ткани можно пучок пионов замедлять фильтрами разной толщины. Если использовать пучок ($\Delta P/P = \pm 15\%$) на входе в анализирующий магнит, где интенсивность пучка $2,5 \cdot 10^8$ в сек, то для депонирования дозы в 100 рад в указанном объеме потребуется около 10 мин., т.е. время, вполне подходящее для этих целей.

5. Канал X для формирования мезонных пучков в низкофоновой лаборатории

Основное назначение канала X - транспортировка мезонных пучков от канала I в помещении с пониженным уровнем фона. Канал состоит из 19 квадрупольных линз и одного отклоняющего магнита. Тип элементов и мощность их электропитания указаны в табл. 1.

В части канала X до защитной стены целиком используется существующий на мезонном канале синхротрона блок из 10 линз МЛ-30 вместе с системой его перемещения перпендикулярно оси канала. Такое перемещение блока необходимо для использования пучков канала I в двух направлениях в зале 4 /рис. 1/. Отклоняющий магнит канала X /эл. 54/ фактически уменьшает уровень фона посторонних частиц в физической установке, которые могут попасть при полностью открытой апертуре канала из помещения с более высоким уровнем фона. Вакуумная система и система транспортировки физических установок на пучки канала X аналогичны системам канала I.

Канал X подобен жесткофокусирующему тракту канала I. Хотя его длина /около 11 м/ почти вдвое больше длины ℓ_T канала I, это не приводит к росту эффективности ϵ_μ для сепарированных мюонов, поскольку разделение пионов и мюонов уже произошло в канале I. Вместе с тем дополнительный распадный промежуток для пионов уменьшает их примесь в пучке сепарированных мюонов /например, для 115 МэВ/с примесь пионов с 0,5% уменьшается до 0,1%/.

Некоторое нарушение структурного периода из-за

наличия трех жесткофокусирующих диполей МЛ-31, а также дополнительный импульсный анализ магнитом на выходе канала X приводит к уменьшению примерно в 1,5 раза интенсивности сепарированных мюонов из канала X по сравнению с указанными в табл. 4. Для несепарированных мюонов это уменьшение частично компенсируется ростом их числа за счет распада пионов в канале X /для 200 МэВ/с - примерно в 1,25 раза/. Распад пионов в канале X также дополнительно уменьшает интенсивность пионных пучков в низкофоновой лаборатории /для 200 МэВ/с - в 2,5 раза, а для 400 МэВ/с - в 1,7 раза/. Поляризация мюонных пучков в низкофоновой лаборатории такая же, как пучков из канала I.

Несмотря на некоторое уменьшение интенсивности мезонов, исследования на пучках канала X имеют ряд полезных особенностей: 1. Более чем на порядок уменьшаются уровни фоновых излучений из-за наличия дополнительной защиты и удаления физических установок от ускорителя. 2. Отсутствие выходов других пучков. 3. Укорочение кабельных и других коммуникаций от физических установок до электронной аппаратуры и ЭВМ. 4. Доступ к физическим установкам во время работы ускорителя на других пучках, а в некоторых случаях и на пучках канала X.

Интенсивность пучков сепарированных мюонов из канала X меньше приведенной в табл. 4 примерно в 2 раза. Интенсивность пучков несепарированных мюонов из канала X следует данным табл. 5 с уменьшением примерно в 1,5 раза. Интенсивность пионных пучков из канала X примерно втрое меньше, чем пучков из канала I /табл.6/.

6. Заключение

Мезонные пучки из каналов I и X фазотрона позволяют проводить разнообразные эксперименты в различных областях науки и техники. Параметры этих пучков приведены в табл. 3-6. Экспериментаторам будут доступны пучки пионов и мюонов с энергиями до 400 МэВ.

После запуска фазотрона интенсивность пучков от-

рицательных мюонов увеличивается до $4 \cdot 10^7$ в сек, а положительных - до 10^7 в сек; плотности остановок мюонов возрастут соответственно до $4 \cdot 10^6$ 1/сек.г/см² и 10^6 1/сек.г/см². Таким образом, интенсивность мюонных пучков увеличится почти на два порядка по сравнению с существующей на синхроциклотроне.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить многих сотрудников лаборатории за помощь в работе, особенно В.П.Дмитриевского, Ю.Н.Денисова, Н.Л.Заплатина, В.Г.Зинова, Ю.М.Казаринова, Л.И.Лапидуса, О.В.Савченко, Е.И.Розанова, С.И.Чеснову.

Литература

1. А.В.Демьянов, В.П.Джелепов, Б.И.Замолодчиков, А.А.Кропкин, В.С.Роганов. ОИЯИ, Р9-8222, Дубна, 1974.
2. В.Г.Кириллов-Угрюмов, А.А.Кропкин, В.С.Роганов, А.В.Самойлов. АЭ, 11, №3, 245 /1961/.
3. Ю.М.Грашин, Б.А.Долгошеин, В.Г.Кириллов-Угрюмов, А.А.Кропкин, В.С.Роганов, А.В.Самойлов, С.В.Сомов. ОИЯИ, Р-1902, Дубна, 1964.
4. А.В.Демьянов, В.С.Роганов. ОИЯИ, Б1-9-8234, Дубна, 1974.
5. A.Citron, M.Morpurgo, H.Overas. CERN, 63-35 (1963).
6. В.С.Роганов. ОИЯИ, Б1-4707, Дубна, 1969.
7. G.Salardi, E.Zanazzi, F.Uccelli. Nucl.Instr. Meth., 59, 152 (1968).
8. C.Petitjean. SIN, TM-09-10, 1969.
9. K.Tanabe. Part. Accel., 2, №3, 211/1972.
10. V.Highes, S.Ohnuma, K.Tanabe, P.Thomson, H.Vogel. LASL LA-4474-MS, 1971.
11. C.Petitjean. SIN, TM-09-27, 1972.
12. C.R.Cox, I.I.Domingo, P.Skarek. CERN, PHIII-72/21, 1972.
13. S.Hagakawa. Phys.Rev., 108, 1533 (1957).
14. P.H.Fowler. Proc.Phys.Soc., 85, 1059 (1965).

Рукопись поступила в издательский отдел
11 сентября 1974 года.