

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



с3450

Д-321

22/1к-75

9 - 8782

3551/2-75

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

ПРОЕКТИРУЕМЫЕ КАНАЛЫ ПУЧКОВ ПИОНОВ
ФАЗОТРОНА
С ВАРИАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

1975

9 - 8782

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

**ПРОЕКТИРУЕМЫЕ КАНАЛЫ ПУЧКОВ ПИОНОВ
ФАЗОТРОНА
С ВАРИАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Демьянов А.В., Желепов В.П., Замолотчиков Б.И.,
Кропин А.А., Роганов В.С.

9-8782

Проектируемые каналы пучков пионов фазотрона с вариацией магнитного поля

Описываются проектируемые каналы пучков пионов с энергиями до 400 МэВ фазотрона с вариацией магнитного поля как от внутренней, так и от внешней мишеней. Ожидаемые потоки составят для отрицательных пионов от $5 \cdot 10^6$ 1/сек при энергии 23 МэВ до 10^8 1/сек при энергии 300 МэВ, а для положительных пионов от 10^7 1/сек при энергии 23 МэВ до $8 \cdot 10^8$ 1/сек при энергии 300 МэВ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1975

1. Введение

На рис.1 показана схема расположения каналов пучков фазотрона. Назначение каждого из каналов, параметры элементов ионной оптики на пучках, принципы, на основе которых выбрана эта схема, приведены в работе^{/1/}.

В настоящей работе описываются мезонные пучки каналов П, Ш и широкоугольный пучок пионов от мишени M_{gr} на канале IX. Пучки мезонов формируются пятью каналами (I, П, Ш, X и IX - через линзу МЛШ). Они образуются от мишеней, расположенных как внутри фазотрона (через каналы I, П, X), так и вне его (через канал Ш и от мишени M_{gr} в канале IX)^{/1/}.

В системе каналов фазотрона пучки получаются во всем интервале энергий мезонов, образованных протонами с энергией 700 МэВ при взаимодействии с ядрами мишени. Мезонные пучки из каналов I, X, основным назначением которых является получение сепарированных мезонных пучков, описаны ранее^{/2/}.

2. Канал П пионных пучков с дисперсионными свойствами

Канал П формирует пучки пионов от внутренней мишени фазотрона. Основное назначение канала - получение хорошего разрешения (\sim несколько МэВ) в широком диапазоне энергий (100-400 МэВ) при достаточно высокой интенсивности.

Действие магнитного поля фазотрона на пионы, образованные от внутренней мишени, подобно действию поля "толстой" линзы. Его фокусирующие, анализирующие и дисперсионные свойства зависят от радиуса и, вследствие пространственной вариации магнитного поля, азимута расположения мишени внутри ускорителя, а также от угла вылета мезонов.

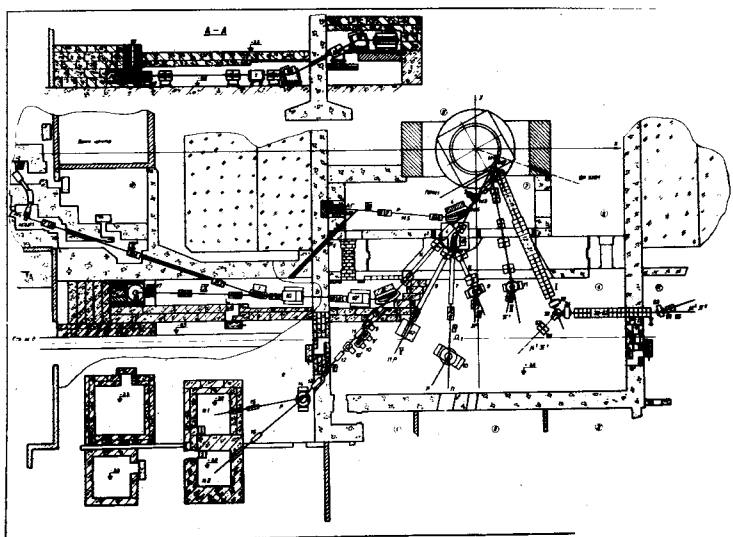


Рис.1. Система каналов пучков фазотрона с вариацией магнитного поля.

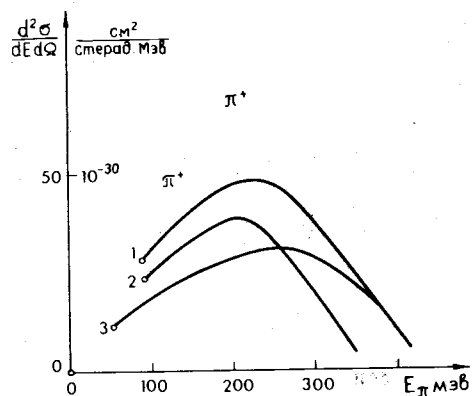


Рис.2. Спектр положительных пионов из графита, образованных под углом $19,5^\circ$ протонами с энергией 660 МэВ^{/8/} (кривая 1), под углом $21,5^\circ$ протонами с энергией 600 МэВ^{/7/} (кривая 2), под углом 20° протонами с энергией 730 МэВ^{/6/} (кривая 3).

Особенности формирования пучка пионов в канале II позволяют получить хорошее разрешение по импульсу. Импульсный анализ пучка в магнитном поле фазотрона происходит в радиальной плоскости, т.е. в направлении, где размеры источника пионов наименьшие и составляют несколько миллиметров, благодаря незначительному забросу протонов по радиусу на мезонную мишень. Это достоинство отсутствует при получении пионов от мишени на выведенном пучке протонов, когда размер его по горизонтали составляет около 3 см. Использование же наименьших размеров источника пионов от внешней мишени (около 0,5 см) в вертикальной плоскости для разделения по импульсам затруднено из-за недостаточных размеров площадей и из-за узости амбразуры в защитной стене.

Формирование пучка с дисперсионными свойствами требует исправления aberrаций, которые возникают при движении пионов в магнитном поле фазотрона. Пучок с дисперсионными свойствами, т.е. пучок, в котором импульс каждой частицы однозначно связан с ее положением, позволяет получить хорошее разрешение по энергии с помощью коллиматоров или детекторов частиц, определяющих их координаты. Таким образом из частиц всего интервала импульсов в пучке выделяются частицы с заданным импульсом.

Энергетическая дисперсия $\frac{dE}{d\beta}$ хорошо изучена^{/3/} для магнитного поля синхротрона (α/β - угол между траекториями мезонов, энергия которых отличается на αE). Эта величина изменяется на порядок при изменении энергии от 100 до 400 МэВ и составляет примерно 0,3 МэВ/град для пионов с энергией 200 МэВ, вылетающих из мишени на орбите наибольшего радиуса в медианной плоскости под углом $\varphi=0^\circ$ к направлению циркулирующего пучка протонов. Для магнитного поля фазотрона энергетическая дисперсия примерно соответствует этому же значению.

Угловая дисперсия $\frac{d\beta}{dE}$, обусловленная различием в длине пути, проходимого частицами в магнитном поле ускорителя, приводит к хроматическим aberrациям, т.е. к нарушению соответствия между положением частицы в пучке и ее энергией. К этому же приводит и рассеяние пионов на разделительной фольге выпускного окна камеры ускорителя и на атомах остаточного газа в вакуумной трубе канала. Устранение aberrаций и рассеяния в канале II позволяет получать интенсивные пучки мезонов с хорошим энергетическим разрешением.

Пучок, получаемый на основе этого принципа, используют в настоящее время на синхротроне ЦЕРНа и предполагают использовать и после реконструкции этого синхротрона.

Основная особенность канала II, отличающая его от других каналов, заключается во введении в его структуру не только анализирующих и фокусирующих магнитов, но и элементов, устраняющих сферическую и хроматическую aberrации пучка. В таблице I перечислены типы элементов /1/. Магнит (эл. I) СП-034, предназначенный, как и в канале I, для расширения импульсного интервала частиц, захватываемых каналом, направляет их по его оси. Шестипольный магнит (эл. 2) 20Ш30-200 исправляет aberrации пучка таким образом, что после выхода из него углы наклона траектории частиц в пучке к оси канала становятся линейной функцией импульса частиц. Это позволяет осуществлять дальнейшую проводку пучка, без искажения его дисперсионности, с помощью дублетов квадрупольных линз.

Высокая степень разрежения ($\sim 10^{-5}$ тор) в канале и отсутствие фольги, разделяющей объем камеры ускорителя и вакуумной трубы канала, исключает рассеяние частиц на фольге и остаточном газе в канале и уменьшает тем самым aberrации пучка. Изменение ширины щели с помощью дистанционно-управляемого коллиматора от 0 до 10 см,

который устанавливается за вторым дублетом квадрупольных линз (эл. 5-6), обеспечивает получение необходимого энергетического разрешения в пучке.

Четыре квадрупольных дублета (эл. 3 + 10) используются для транспортировки пучка в зал экспериментальных установок. Отклоняющий магнит (эл. II) СП-56 и дублет линз (эл. I2-I3) МЛ-29 служат для направления и фокусировки пучка на экспериментальные установки.

Точные расчеты ожидаемой энергетической дисперсии, различных aberrаций будут выполнены для реального магнитного поля фазотрона. Однако предварительные оценки с использованием поля синхротрона показывают, что разрешение около 0,5 МэВ для пионов с энергией 200 МэВ можно получить с импульсной щелью 0,5 см. Для этого необходимо исправить aberrации, которые могут дать вклад около 1,6 МэВ и исключить разделительную фольгу между камерой фазотрона и вакуумной трубой канала (органическая пленка толщиной 1 мм дает вклад в спектр пионов примерно 1,5 МэВ).

Указанное разрешение может быть получено также, если детектирующее устройство может регистрировать положение частиц в пучке при полностью открытом коллиматоре.

В табл. 2 приведены интенсивности пучков отрицательных пионов из канала II (ток протонов 50 мкА). В фокусе выходного дублета площадь пучка составляет приблизительно 5 см^2 . Интенсивности даны для импульсного интервала в пучке $\pm 2\%$. Интенсивность пучков канала II примерно втрое меньше интенсивности потоков пионов из канала I. Примеси мезонов и электронов в пучках канала II составляют несколько процентов. Интенсивность пучков положительных пионов с импульсом 200 МэВ/с примерно в 4 раза меньше.

Таблица 1. Элементы канала П

№	Тип элемента	колич.	мощность (кВт)
I	СП-034	I	350
2	20Ш30-200	I	95
3-6	20К25Б-1000 (П)	4	266
7-10	20К25Б-1000 (I)	4	266
II	СП-56Г	I	69,5
I2, I3	МЛ-29	2	208
Максимальная мощность электропитания канала			I254,5 кВт

Таблица 2. Интенсивность пучков π^- -мезонов из канала П

P_{π} МэВ/с	200	270	350	400
E_{π} МэВ	I04	I65	237	288
$N_{\pi} \cdot 10^{-6}$ I/сек	I6	I7	I8	I9

$\frac{\Delta P}{P} = \pm 2\%$; $S = 5 \text{ см}^2$. Интенсивность пучков положительных пионов с импульсом 200 МэВ/с в 4 раза меньше.

Таблица 3. Допустимая толщина мишеней в канале УП

Мишень	Be	C	H ₂ O	Al	Cu	Pb
l г/см ²	15,1	10	8,6	5,7	2,8	1,5
ΔE_p МэВ	35	22	17	11	5	2
η_p	0,76	0,85	0,87	0,93	0,96	0,99

ΔE_p - энергия теряемая протонами в мишени; η_p - доля протонов, прошедших мишень без взаимодействия.

Таблица 4. Элементы канала Ш

№ элем.	Т и п	кол-во	мощность (кВт)
$M_3(M_4)$	Мишень	I	
4,5	20К25Б-1000(П)	2	I33
6	СП-027	I	I70
7,8,7',8'	20К25Б-1000 (I)	4	266
9	СП-57А	I	90
10, II	МЛ-29	2	208
Максимальная мощность электропитания канала			867 кВт

3. Канал Ш формирования пучков пионов

от внешней мишени

Основное назначение канала - формирование пучков пионов обоих знаков в диапазоне энергий 0-350 МэВ от мишеней, расположенных на выведенном из фазотрона пучке протонов. Особенность канала является вывод в экспериментальный зал пионов как очень малых энергий, недоступных другим каналам, так и пионов больших энергий. Пучки положительных пионов самых больших энергий формируются только этим каналом. Длина канала Ш меньше длины каналов I и П, что очень существенно для формирования мезонных пучков малых энергий.

Интенсивность и качество мезонных пучков из канала III определяется не только условием их формирования в канале, но также размерами и материалом мишени при фиксированных интенсивностях и эмитансе пучка протонов, падающих на эту мишень. Выбор мишени определяется рядом факторов: 1) сечением образования пионов для выбранной энергии и угла их вылета по отношению к пучку протонов; 2) поглощением протонов и мезонов в мишени, 3) необходимыми размерами мишени; 4) изменением энергии протонов и мезонов при их прохождении в мишени; 5) фоновыми условиями, возникающими после размещения мишени на пучке; 6) рассеянием протонов в мишени и возможностью транспортировки пучка протонов после мишени.

Последнее обстоятельство является весьма важным для выведенного пучка протонов (канал УП), поскольку мезонообразующие мишени M_3 или M_4 (рис.1) из-за ряда причин (направление протонных и нейтронных пучков, значительный уровень фона вблизи ловушки протонного пучка и т.п.) располагаются перед отклоняющим магнитом СП-027 и пучок протонов должен транспортироваться до ловушки без потерь на элементах канала УП.

В табл.3 приведены допустимые толщины мишеней и потери энергии протонами. Как видно из таблицы, эти потери не превосходят 35 МэВ для самой толстой мишени. Размеры пучка протонов в точках M_3 и M_4 составляют соответственно $3,4 \times 3,4 \text{ см}^2$ и $3,4 \times 0,4 \text{ см}^2$ /5/ в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Наличие только одного защищенного помещения для вывода протонов из ускорителя вынуждает совмещать начальное направление канала IV поляризованных протонов с направлением мезонного канала III. Связанное с этим удаление от мишеней M_3 первого дублета линз (эл.4, 5) не является оптимальным для получения пучков медленных пионов. На последующих этапах работы фазотрона предусмотрена возможность создания дополнительного канала только медленных пионов от мишени M_3 , образованных под большими углами ($\sim 70^\circ$) к протонному пучку.

Требование универсальности канала к пучкам мезонов разных энергий, помимо отмеченного выше обстоятельства, приводит к выбору угла между осью канала и направлением протонного пучка в канале УП- не более 12° , поскольку сечение рождения мезонов больших энергий (больше 200 МэВ) резко уменьшается с ростом угла их образования. Хотя отсутствует набор необходимых данных по сечениям рождения мезонов разных энергий протонами с энергией 680 МэВ, для оценки ожидаемых интенсивностей можно использовать данные для энергии протонов 730 МэВ /6/. Действительно, как следует из рис.2 и 3, для сечений под углом около 20° и энергий протонов 600 МэВ /7/, 660 МэВ /8,9/ и 730 МэВ /6/ видно слабое различие сечений образования положительных и отрицательных мезонов.

Канал состоит из четырех дублетов линз и двух отклоняющих магнитов. Элементы канала приведены в таблице 4, а их параметры

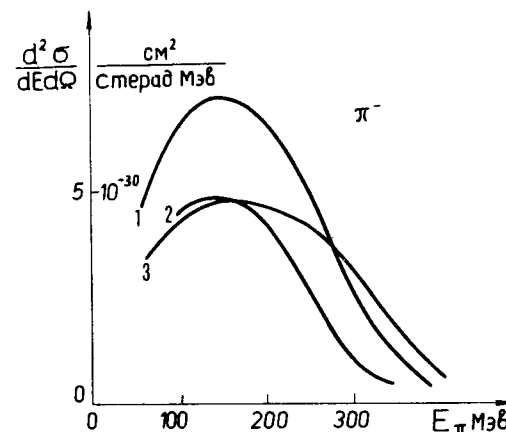


Рис.3. Спектр отрицательных пионов из графита, образованных под углом 24° протонами с энергией 660 МэВ /9/ (кривая 1), под углом $21,5^\circ$ протонами с энергией 600 МэВ /7/ (кривая 2), под углом 20° протонами с энергией 730 МэВ /6/ (кривая 3).

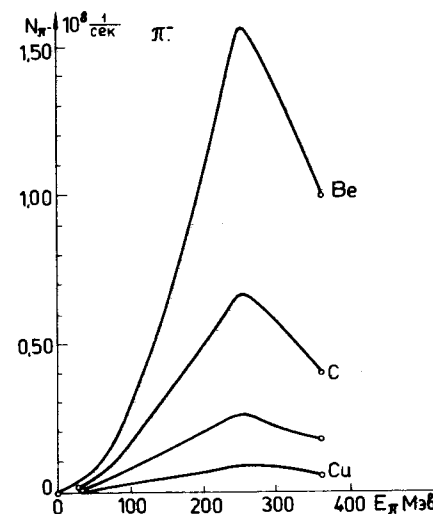


Рис.4. Интенсивность отрицательных пионов в зависимости от энергии на выходе канала III для мишеней разных толщин и материалов, которые даны в табл.3.

даны в работе/1/. Двойное отклонение пучка уменьшает фон сопутствующих излучений на выходе из канала. Оптическая схема канала соответствует фокусировке от точки к точке, причем последний дублет позволяет в широких пределах изменять условия формирования пучка в местах расположения детектора частиц или мишени. Импульсный интервал частиц, захватываемых каналом, составляет $\pm 7\%$, а телесный угол - 6 мср для мишени, располагаемой в точке M_4 .

На рис.4 и 5 приведен выход мезонов в зависимости от их энергии для разных толщин и материалов мишеней (из табл.3) без учета поглощения протонов и мезонов в них ($i_p = 25 \text{ мкА}$). При расчетах использовались сечения образования мезонов, полученные в работе/6/.

Учет поглощения протонов и пионов (при использовании известных сечений/6,10/) в мишенях, которые указаны в табл.3, приводит к тому, что для бериллия в области малых (около 50 МэВ) и больших (около 300 МэВ) энергий выход пионов нужно уменьшить примерно на 12%, а в области максимума кривой (150-250 МэВ) - примерно на 25%. Для графита эти поправки составляют соответственно 8% и 18%, а для меди и свинца - лишь несколько процентов.

Сравнительно небольшие размеры пучка протонов на мишени (полуширина в горизонтальной плоскости меньше 2 см) позволяют уменьшить поглощение пионов в мишенях из легких элементов при их выводе под большими углами (70°). Однако уменьшение сечения рождения пионов даже не очень высоких энергий (100 МэВ) для этих углов приводит к более значительному ослаблению потока мезонов.

Формирование пучков для малых углов образования мезонов ведет к заметным потерям энергии пионов при выбранных толщинах мишеней. В табл. 5 приведены значения энергии пионов, образованных в центре мишени ($E_{\text{с.п}}$) и на выходе из нее (E). Потери энергии мезо-

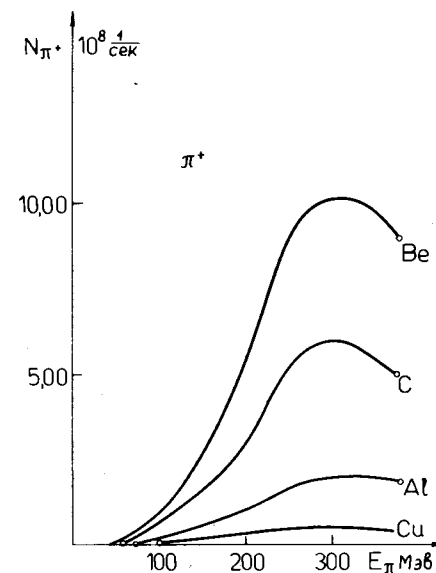


Рис.5. Интенсивность положительных пионов в зависимости от энергии на выходе канала Ш для мишеней разных толщин и материалов, которые даны в табл. 3.

нов в мишени приводит к тому, что для мезонов, выходящих из канала, разброс пробегов (страгглинг) будет определяться большим значением энергии ($E_{\pi} > E$). Кроме того, при оценке интенсивности пионов необходимо использовать значение сечения $\sigma(E_{\pi})$, а не $\sigma(E)$.

Эти обстоятельства важны для пионов малых энергий в экспериментах с остановившимися пионами. Например, для пионов с энергией 23 МэВ страгглинг составляет $\pm 0,1$ г/см² в графите. Если эти пионы образованы в центре мишени, то они имеют энергию 50 МэВ и страгглинг около $\pm 0,35$ г-см², что лишь ненамного меньше разброса пробегов $\pm 0,72$ г/см², обусловленного импульсным интервалом ($\pm 7\%$) пионов, захваченных в канал. Этот факт приводит к снижению плотности остановок

$$n_{\pi} = \frac{N_{\pi}}{2 \Delta P_{\pi}} \cdot \frac{dP_{\pi}}{dR_{\pi}}$$

(где $2 \Delta P_{\pi}$ - интервал импульсов пионов в пучке, а значение $\frac{dP_{\pi}}{dR_{\pi}}$ берется в конце пробега мезонов R_{π} в веществе), поскольку величина $\frac{dP_{\pi}}{dR_{\pi}}$ заметно уменьшается в области малых импульсов при возрастании импульса. Например, значение $\frac{dP_{\pi}}{dR_{\pi}}$ для энергии 50 МэВ в 2,5 раза меньше, чем для энергии 23 МэВ.

В таблице 5 приведены интенсивности пучков пионов обоих знаков из канала Ш в интервале энергий 20-340 МэВ. Интенсивность пионов из канала Ш (табл.5) более чем на два порядка превышает интенсивность пучков /II/, получаемых в настоящее время на синхротроне ОИЯИ, за исключением пучков мезонного канала, по отношению к которым она будет выше примерно в 50 раз.

В табл. 6 даны интенсивности пучков пионов из канала Ш, которые могут быть использованы для получения остановок пионов в веществе. Значения плотности остановок на 1 г/см² мишени в максимуме

остановок указаны без учета страгглинга и многократного рассеяния в тормозящем слое. Приведенные в табл.6 значения страгглинга получены для энергии пионов в центре мишени из табл.5. Относительная величина страгглинга составляет около 3% и слабо зависит от энергии пионов.

Наличие в канале Ш четырех дублетов линз позволяет осуществить ряд вариантов фокусировки в зависимости от потребностей проводимых экспериментов. На вторичной мишени можно, например, получить пучок площадью всего в несколько см². На рис.6 приведен акцептанс канала Ш на мишени М₄ в двух плоскостях для одного из вариантов фокусировки, а на рис.7 - эмитанс пучка в центре второго (эл.9) отклоняющего магнита. Величина эмитанса пучка составляет $5 \cdot 10^6$ см-рад в горизонтальной и $5,6$ см-рад в вертикальной плоскостях. Расчет проведен на ЭВМ СДС-6200 по программе оптимизации, разработанной в ОНУ ЛЯП^{/5/}.

Существенным обстоятельством при формировании пучков пионов от внешних мишеней является наличие примесей протонов и позитронов для положительных мезонов и электронов - для отрицательных. Примеси мюонов обычно не превосходят 10%. Подробные данные по сравнению сечений образования π^{\pm}, e^{\pm}, ρ протонами с энергией 680 МэВ на разных ядрах отсутствуют.

Некоторые данные недавно появились^{/6/} для протонов с энергией 730 МэВ при взаимодействии с ядрами медной мишени. Они показывают, что в канал Ш, настроенный на импульс 280 МэВ/с или 440 МэВ/с, протонов попадает на порядок больше, чем положительных пионов. Однако эти протоны полностью поглотятся фильтрами толщиной 1,5 и 6 г/см² соответственно (с небольшими энергетическими потерями для пионов).

Примесь электронов в пучках отрицательных пионов примерно в два раза больше, чем позитронов в пучках положительных пионов.

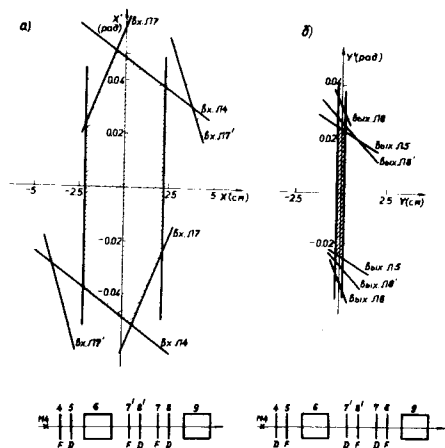


Рис. 6. Акцептанс канала III в месте расположения мишени M_4 в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

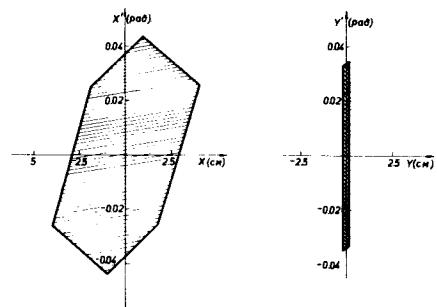


Рис. 7. Акцептанс пучка пионов в канале III в центре второго отклоняющего магнита в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Таблица 5. Интенсивности пучков пионов N_{π} разных энергий на выходе из канала III для мишени M_4 из бериллия ($E_{4, \pi}$ - энергия пионов в центре мишени, $i_p = 25$ мкА)

$E \pm \Delta E$ (МэВ)	23 ± 3	50 ± 6	80 ± 9	135 ± 14	190 ± 18	240 ± 23	290 ± 27	340 ± 31
$N_{\pi^-} \cdot 10^{-6} \text{сек}^{-1}$	5	13	27	49	74	114	109	86
$N_{\pi^+} \cdot 10^{-6} \text{сек}^{-1}$	13	42	92	218	386	680	830	760
$E_{4, \pi}$ МэВ	50	75	100	150	200	250	300	350

Таблица 6. Интенсивность N_{π} и число остановок n_{π} в I г/см² графита для пучков пионов из канала III фазотрона

E (МэВ)	23	54	80	108	135
R г/см ²	2,9	11,4	21,6	33	47
$\pm \Delta R$ г/см ²	0,27	0,49	0,68	0,95	1,22
$\pm \Delta R_s$ г/см ²	0,6	2,2	3,4	6,2	6,8
$\frac{N_{\pi^-}}{n_{\pi^-}}$	2,7	6,2	9,5	12,4	14,8
$N_{\pi^-} \cdot 10^{-6} \text{сек}^{-1}$	5,0	13	27	40	49
$n_{\pi^-} \cdot 10^{-6} \text{сек}^{-1}$	1,9	2,1	2,8	3,2	3,3
$N_{\pi^+} \cdot 10^{-6} \text{сек}^{-1}$	13	42	92	165	218
$n_{\pi^+} \cdot 10^{-6} \text{сек}^{-1}$	4,8	6,7	9,7	13,3	14,6

R - пробег пионов в графите, $\pm \Delta R_s$ - страгглинг, $\pm \Delta R$ - разброс пробегов, обусловленный интервалом импульсов $\pm 7\%$.

Таблица 7. Интенсивности пучков отрицательных пионов из каналов I и II ($i_p = 50$ мкА).

$E \pm \Delta E$ (МэВ)	Канал I					Канал II		
	90 ± 7	90 ± 21	105 ± 8	165 ± 12	240 ± 19	105 ± 3	165 ± 5	290 ± 8
$N_{\pi^-} \cdot 10^{-6} \text{сек}^{-1}$	33	250	44	55	66	16	17	19

Интенсивность из канала X втрое меньше, чем из канала I.

Пучок сильно сходящихся пионов на канале IX ($i_p = 10$ мкА)

$$(E \pm \Delta E) = (50 \pm 7) \text{ МэВ}, N_{\pi^-} = 5 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}, N_{\pi^+} = 2 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}.$$

Эта примесь^{/6/} для медной мишени сильно уменьшается с ростом энергии и угла вылета. Например, отношение $\frac{e^+}{e^-}$ для импульса 100 МэВ/с, равное 0,8 при 15° , становится равным 0,08 при 150° и 0,004 для 400 МэВ/с и 150° . Отношения $\frac{e^-}{e^+}$ при тех же углах и импульсах соответственно равны 0,8; 0,14 и 0,014. Приведенные цифры могут служить лишь грубой оценкой для пучков частиц в условиях формирования их через канал Ш.

Моделирование условий получения пионов с импульсом 160 МэВ/с от внешней полиэтиленовой мишени толщиной 10 г/см² под углами около 50° для π^+ и около 30° для π^- -мезонов дало отношение $\frac{e^-}{e^+}$ соответственно 0,04 и 0,6^{/12/}. Для отрицательных мезонов эта величина на порядок превосходит соответствующую примесь в пучках, образованных от внутренней мишени.

4. Широкоугольные пионные пучки

Эти пучки формируются от мишени, расположенной на протонном пучке канала IX. Основное назначение широкоугольной соленоидальной линзы - формирование отрицательных пионных пучков с энергией около 50 МэВ для радиотерапии и для использования в некоторых физических исследованиях. Помимо высокой биологической эффективности оставшихся пионов^{/13/}, в несколько раз превосходящей эффективность других излучений, отрицательные пионы также выгодно отличает низкое значение кислородного эффекта^{/14/}, который вызывает ослабление терапевтического воздействия излучений из-за кислородного обеднения облучаемых тканей.

Проект использования сильно сходящихся пучков для пионной терапии описан в работе^{/15/}. Обычно сфокусированные пионные пучки имеют небольшую угловую сходимости в несколько градусов, так как специфика большинства физических экспериментов требует для своего

проведения узких и достаточно близких к параллельным пучков частиц. Применение сильно сходящегося пучка (несколько десятков градусов) приводит к существенному увеличению отношения поражения в опухоли к поражению окружающей здоровой ткани и соответствует целям лучевой терапии.

Для создания широкоугольных сходящихся пучков используется пионная линза соленоидального типа^{/15/}. В такой линзе пионы, вылетающие из мишени под некоторым углом к оси, движутся по винтовым траекториям и возвращаются на эту ось на некотором расстоянии от точки вылета. В соленоидальной линзе отрицательные пионы отделяются от положительных системой винтовых диафрагм, соответствующих противоположным направлениям вращения частиц разного знака. Форма винтовых диафрагм рассчитывается из уравнений движения^{/15/}, а потери в пропускании соответствуют геометрическому поперечному сечению диафрагм.

Существенным вопросом при использовании такой широкозахватной линзы являются фоновые примеси μ , e , n в месте расположения облучаемого объекта. Использование подряд трех линз при размещении в фокусе первой подтормаживающих фильтров дает возможность последующего отделения в пространстве пионов от электронов и мюонов. Наличие латунных вкладышей вдоль оси каждой линзы приводит к тому, что фон нейтронов вблизи точки фокуса всей системы становится ниже предельно допустимого.

На рис.1 показано размещение широкозахватной системы на пучке канала. Ограничивающая апертура на входе имеет диаметр 46 см, в средней части - 70 см и внешний диаметр - 180 см. Высота широкозахватной системы 375 см. Напряженность поля на оси 10 кЭ; потребляемая мощность - 1000 кВт.

При потоке протонного пучка в 10 мкА в канале IX, допустимом по условиям радиационной защиты, интенсивность отрицательных пионов от вольфрамовой мишени $5 \times 5 \times 5 \text{ см}^3$ с энергией $50 \pm 7 \text{ МэВ}$, сфокусированных в объеме примерно тех же размеров, составит около $5 \cdot 10^8$ в сек/16/ (для положительных пионов $-2 \cdot 10^9$ в сек). Таким образом, для депонирования дозы в 100 рад длительность облучения составит несколько минут.

5. Формирование мезонных пучков одновременно с другими пучками

Совершенно очевидно, что эффективность использования ускорителя существенно увеличится, если проводить исследования одновременно на нескольких пучках. Получение мезонных пучков через канал I или X возможно одновременно с получением нейтронного пучка через канал Y с внутренней мишени M_1 . В каналах I (X) при этом могут формироваться пучки мезонов достаточно высокой энергии. Параметры пучков в таком режиме практически не будут отличаться от значений, соответствующих работе только канала I (X). Одновременно возможно также и получение пионов через канал II, но интенсивность их потока будет достаточна лишь для наладки физической аппаратуры.

От внутренней мишени M_1 допустимо одновременное формирование пучков через каналы I(X) и II. Без потери интенсивности это практически осуществимо только для нескольких режимов работы канала II и I(X). Значительно больше возможностей совместной работы каналов I(X) и II при полной интенсивности в одном из каналов и при пониженной интенсивности в другом.

При делении интенсивности между внутренним и выведенным пучками протонов возможна одновременная работа каналов I(X) и II с

каналами III, IV, UP или с каналами III, IV, IX. Это весьма существенно при использовании каналов IV, V, IX, так как по условиям радиационной защиты в этих каналах интенсивность выведенных протонов снижается. Допустима также одновременная работа от внутренней мишени M_1 через каналы I и II, когда мишень M_1 располагается не на циркулирующем, а выводимом из ускорителя пучке (положение мишени M_2).

При делении интенсивности между внутренним и внешним пучком протонов можно одновременно использовать несколько мишеней ($M_1, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7$) для генерации вторичных пучков или радиохимических облучений.

Для пучков мезонов от внешних мишеней возможны одновременные исследования на каналах IX и III. Мезонные пучки через канал III могут получаться также при работе канала VI с замедлителем (эл.4). Даже в отсутствие M_3 и M_4 край замедлителя в канале VI может служить источником мезонов для соответствующего режима работы отклоняющего магнита канала III. Поток мезонов в этом режиме может существенно превосходить потоки от M_4 , так как значительная часть протонного пучка теряется в замедлителе. Однако уровень фоновых излучений при этом возрастает, и потребуется последующее уточнение условий работы в этом режиме.

Пучки мезонов можно получить через канал IV, когда он не используется для формирования пучка протонов. В этом случае мезоны от M_4 или M_3 образуются одновременно через каналы III и IV, но импульс мезонов через канал IV будет примерно вдвое больше, чем через канал III, а интенсивность в несколько раз меньше из-за наличия ограничивающей апертуры диаметром 5 см в соленоиде канала IV. Перечень возможностей одновременной работы мезонных каналов друг с другом и с другими каналами, не исчерпывающийся вышеприве-

денными вариантами, потребует дальнейшего уточнения в связи с техническим обеспечением (наличием генераторов тока, суммарной мощностью питания и охлаждения элементов трактов), а также допустимыми уровнями радиационного загрязнения. Однако в настоящее время ясно, что запланированное техническое обеспечение позволяет в значительной мере реализовать перечисленные выше возможности одновременной работы каналов пучков.

6. Заключение

Планируемые каналы мезонных пучков фазотрона позволяют проводить множество разнообразных экспериментов в различных областях науки и техники. Параметры этих пучков приведены в табл. 5, 6, 7^{2/}.

Экспериментаторам будут доступны пучки пионов с энергиями до 400 МэВ. Интенсивности пучков отрицательных пионов достигнут $5 \cdot 10^8$ в сек, а положительных - $2 \cdot 10^9$ в сек. Плотности остановок в 1 г/см^2 составят соответственно $2 \cdot 10^8 \text{ I/сек. г/см}^2$ и $8 \cdot 10^8 \text{ I/сек. г/см}^2$.

Потоки отрицательных мюонов возрастут до $4 \cdot 10^7$ в сек, а положительных - до 10^7 в сек, а их плотности остановок-соответственно до $4 \cdot 10^6 \text{ I/сек. г/см}^2$ и $10^6 \text{ I/сек. г/см}^2$. Таким образом, после реконструкции интенсивности мезонных пучков увеличатся почти на два порядка по сравнению с существующими на синхротроне.

Система каналов мезонных и нуклонных пучков фазотрона построена с учетом известных экономических и технических ограничений проводимой реконструкции синхротрона в установку "Ф". Вместе с тем эта система оставляет практические возможности для последующей организации новых каналов пучков, например, канала пионных остановок от внешней мишени или пучков поперечно поляризованных мюонов от внутренней мишени.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить многих сотрудников Лаборатории ядерных проблем за полезные обсуждения и помощь в работе, особенно В.П.Дмитриевского, Д.Н.Денисова, Н.Л.Заплатина, Д.М.Назарина, М.И.Комочкова, Л.И.Липидуса, А.И.Мухина, О.В.Савченко, В.И.Сатарова, Е.И.Розанова, С.И.Чеснову.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В.Демьянов, В.П.Джелепов, Б.И.Замолотчиков, А.А.Кропин, В.С.Роганов. ОИЯИ, Р9-8222, Дубна (1974).
2. А.В.Демьянов, В.П.Джелепов, Б.И.Замолотчиков, А.А.Кропин, В.С.Роганов. ОИЯИ, 9-8270, Дубна (1974).
3. В.Г.Кириллов-Угрюмов, А.А.Кропин, В.С.Роганов, А.В.Самойлов. АЭ, II, № 3, 245 (1961).
4. C.R.Cox, J.J.Domingo, P.Skarek. CERN PHIII-72/2 (1972).
5. В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин, В.С.Роганов, С.И.Чеснова. ОИЯИ, Р9-7505, Дубна (1973).
6. D.R.F.Cochran, P.M.Decen, P.A.M.Gram, E.A.Knapp, E.R.Martin, D.E.Nagle, R.B.Perkins, W.J.Shlaer, H.A.Thiessen, D.Theriot. Phys. Rev. D. 6, N11, 3085 (1972).
7. E.Heer, W.Hirt, M.Martin, E.G.Michaelis, G.Serre, P.Skarek, B.T.Wight. CERN 66/436 (1966).
8. А.Т.Мешковский, Я.Я.Шалимов, В.А.Шебанов. ЖЭТФ, 34 (6), 1426 (1958).
9. М.Г.Мещеряков, И.К.Взоров, В.П.Зрелов, Б.С.Неганов, А.Ф.Шабудин. ЖЭТФ, 31 (1), 55 (1956).

10. В.С.Барашенков. Сечения взаимодействия элементарных частиц. "Наука", 1966.
11. В.С.Роганов. ОИЯИ, БИ-9-4707, Дубна (1969).
12. А.В.Демьянов, В.С.Роганов. ОИЯИ, БИ-9-8234, Дубна, (1974).
13. P.H.Fowler Proc. Phys. Soc., 85, 1059 (1965).
14. H.S.Karlan LASS LA-4397-MS (1969).
15. О.В.Савченко. ОИЯИ, БИ-13-6255, Дубна (1972) .
16. В.М.Абазов, В.П.Джелепов, Е.С.Кузьмин, А.Т.Молоканов, О.В.Савченко, Т.П.Решетников, Е.П.Череватенко. ОИЯИ Р13-8079, Дубна (1974).

Рукопись поступила в издательский отдел
10 апреля 1975 г.