

С 345
М-925

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1 - 5971

С.В. Мухин

ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ,
ИСПЫТАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ
И КОМПЛЕКСНАЯ НАЛАДКА
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА
АНТИПРОТОНОВ С ИМПУЛЬСОМ 5 ГЭВ/С

Специальность 040 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна, 1971

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединённого института ядерных исследований.

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук И.Н.Семенюшкин

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук В.П.Саранцев
доктор технических наук А.А.Васильев

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт физики высоких энергий.

Автореферат разослан " " 1971 года

Защита диссертации состоится " " 1971 года
на заседании Учёного совета Лаборатории высоких энергий Объединённого института ядерных исследований.

Адрес: г.Дубна, Московской области, конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Учёный секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

М.Ф.ЛИХАЧЁВ

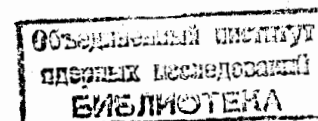
С.В. Мухин

ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ,
ИСПЫТАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ
И КОМПЛЕКСНАЯ НАЛАДКА
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА
АНТИПРОТОНОВ С ИМПУЛЬСОМ 5 ГЭВ/С

Специальность 040 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

707467



Дальнейшее углубление наших знаний в области физики элементарных частиц требует всё более точных и однозначных сведений о процессах, происходящих при взаимодействии частиц высоких энергий. Как следствие этого, при проведении физических экспериментов возникает необходимость установления природы взаимодействующих частиц и, в первую очередь, частицы, вызывающей взаимодействие. Современные методы ядерной электроники позволяют получить сведения о природе частиц, которые можно в последующем использовать для запуска экспериментальной аппаратуры. Однако один из наиболее распространённых приборов в ядерной физике, пузырьковая камера, не пригоден для избирательного запуска. Поскольку процессы рождения вторичных частиц на мишени при высоких энергиях таковы, что одновременно рождается несколько сортов частиц с разной вероятностью, то при желании изучать с помощью пузырьковой камеры процессы, индуцированные определённым сортом частиц, возникает необходимость в создании "чистых" пучков — пучков, обогащённых одним сортом частиц, то-есть возникает необходимость в пространственном разделении частиц по их массам.

Существует несколько способов пространственного разделения частиц по массам m , наибольшее распространение из которых получили электростатический и высокочастотный. И в том и в другом случаях разделение производится за счёт отклонения предварительно сформированных по импульсу частиц в поперечном электрическом поле. Однако, если при электростатической сепарации два сорта частиц с массами m_1 и m_2 и импульсом pc в постоянном электрическом поле сепаратора получают равные отклонения в одну и ту же сторону и разделение происходит за счёт

разницы в отклонениях, то при высокочастотной сепарации те же частицы, предварительно сгруппированные по фазам высокой частоты \neq после пролёта некоторого расстояния L , равного

$$L = \frac{c}{2f} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{m_0 c^2}{pc}\right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{m_1 c^2}{pc}\right)^2} \right), \quad (1)$$

попадают в отклоняющее устройство со сдвигом фаз, равным π , и получают противоположные отклонения под воздействием противофазного поперечного электрического поля, причем разделение равно сумме отклонений. В релятивистском случае угловое разделение частиц можно записать в виде:

а) для электростатической сепарации

$$\Delta \alpha = \frac{e E \ell}{2(p c)^3} \left[(m_2 c^2)^2 - (m_1 c^2)^2 \right], \quad (2)$$

б) для высокочастотной сепарации

$$\Delta \alpha = \frac{e E \ell}{p c}. \quad (3)$$

Здесь E - напряжённость электрического поля, а ℓ - электрическая длина отклоняющего устройства. Как видно из приведённых выше формул, с ростом импульса угловое разделение при электростатической сепарации уменьшается обратно пропорционально кубу импульса сепарируемых частиц, в то время как при высокочастотной сепарации - только первой степени. Это обстоятельство и объясняет большой интерес к различным методам высокочастотной сепарации.

Настоящая диссертация посвящена вопросам, связанным с осуществлением одного из методов высокочастотной сепарации частиц высоких энергий по массам, предложенного в 1957 году^{/2/} академиком В.И.Векслером и профессором В.А.Петуховым.

Диссертация написана на основе работ^{/3-7, II-24/}, выполненных в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в период с 1957 по 1967 годы, опубликованных в препринтах и научных журналах и доложенных на различных международных конференциях и симпозиумах.

Диссертация состоит из трёх глав, введения и заключения.

Во введении показывается, что при высоких энергиях высокочастотные методы сепарации имеют преимущества перед электростатическими, и даётся краткий обзор этих методов.

В первой главе подробно излагается метод сепарации, предложенный В.И.Векслером и В.А.Петуховым, разбираются узловые проблемы, требовавшие исследований и разработок, и обосновывается выбор основных параметров для электродинамического сепаратора антипротонов с импульсом 5 Гэв/с, созданного в Лаборатории высоких энергий в 1966 году^{/3,4/}. Сущность метода состоит в том, что для фазовой группировки сепарируемых частиц, необходимой для проведения пространственного разделения их по массам, предлагается использовать сам ускоритель, переходя для этого на кратковременное ускорение протонов на высокой кратности в конце основного цикла ускорения. Было проведено обоснование параметров пучка и устройств электродинамического сепаратора^{/5,6,7/}.

А. Микроструктура сепарированного пучка

Из общего рассмотрения принципа сепарации в предположении, что временное распределение интенсивности частиц в микроимпульсе подчиняется нормальному закону распределения, следует, что для проведения сепарации частиц с коэффициентом очистки $\eta = 10^3$ высокочастотная микроструктура вторичного пучка должна иметь

скважность $h < \frac{1}{4,8}$ и уровень фона $\delta < 10^{-3}$.

Б. Рабочая частота сепаратора

Поскольку, как видно из формулы (I), пролётная база, необходимая для сепарации частиц данного импульса, зависит от рабочей частоты сепаратора, то с учётом реальных возможностей по размещению отклоняющего устройства сепаратора на имеющихся экспериментальных площадях было показано, что рационально сепарацию 5 Гэв/с \tilde{p} и $\tilde{\pi}^-$ - мезонов проводить на частоте 149,52 Мгц и ускорение первичного пучка на 104-ой кратности.

В. Система кратного ускорения

Для выяснения требований к системе кратного ускорения рассматривалось движение протонов внутри синхрофазотрона в процессе ускорения. Было найдено, что для того, чтобы не было значительных потерь в интенсивности при переходе на кратное ускорение, при уменьшении радиальнофазовых размеров пучка до $\pm 8,2 \text{ мм}^8/$ достаточно обеспечить амплитуду ускоряющего напряжения кратной частоты $V_0^{(q)} \geq 70$ кв, а синхронизм между частотой обращения сгустка первой кратности ω_1 и частотой системы кратного ускорения ω_2 - с точностью ± 50 гц. Полученные результаты требовали первоочередной экспериментальной проверки, так как переход на ускорение столь высокой кратности предлагалось осуществить впервые в мировой практике.

Г. Вывод ускоренного пучка на мишень

Расчёты показывают, что при ускорении на постоянной частоте и выводе ускоренного пучка на мишень с помощью азимутальной

асимметрии ^{/9/} можно обеспечить требуемую для сепарации скважность в микроструктуре только при времени вывода $t \geq 4,0$ мсек. Однако убирая из ускоренного пучка частицы с большими амплитудами свободных колебаний за счёт предварительной "обдирки" пучка примерно на 30% об одну из мишеней ускорителя, это время можно сократить в два раза. Здесь же указывается на возможность обеспечения условий однократного прохождения частиц через рабочую мишень и предлагается для этого рабочую мишень установить на радиусе, большем равновесного, и предусмотреть дополнительную мишень-перехватчик на радиусе, меньшем равновесного, сдвинув её на 180° по азимуту относительно рабочей мишени. Следует заметить, что вывод пучка на мишень с получением высокочастотной микроструктуры вторичного пучка определённых, наперёд заданных параметров, также производился впервые и требовал первоочередной экспериментальной проверки.

Д. Отклоняющее устройство

Сравнение различных способов получения электрических полей данной частоты показало, что наиболее целесообразно и экономично выполнить отклоняющую систему в виде совокупности из шестнадцати независимо фазированных резонаторов квазиторoidalного типа ^{/10/}. При этом было показано, что при фазировке резонаторов между собой с учётом времени пролёта $\tilde{\pi}^-$ - мезонами резонаторов на расстоянии 20 м от центра системы при напряжённости электрического поля в резонаторах $E=30$ кв/см получают одинаковые и противоположные отклонения для $\tilde{\pi}^-$ - мезонов и \tilde{p} , равные $\pm 8,6 \text{ см}^{11/}$. Показано также, что относительно несложно получить поперечное распределение интенсивности пучка в месте разделения частиц

по массам с учётом как поперечных размеров пучка, так и его временной длительности, если предположить, что и то и другое подчиняется нормальному закону распределения. На рис.5 представлены результаты численных расчётов, сделанных на ЭВМ, по формуле:

$$\phi(x) = a \int_0^{2\pi} e^{-\frac{(x-x_{cp})^2}{2\sigma^2}} d\phi, \quad (4)$$

где a - нормировочный коэффициент, σ - среднеквадратичная полуширина пучка, а $x_{cp} = x_m \cos(\rho - \phi_0)$, x_m - максимальное отклонение частиц сепаратором, зависящее от параметров его отклоняющей системы.

Расчёты проводились для случаев, когда напряжённость электрического поля в резонаторах полагалась равной 22,4 кВ/см (кривая 2); 19,9 кВ/см (кривая 3) и $\sigma = 0,52$ см (кривая 1).

Е. Ионнооптическая система

При выборе варианта ионнооптической системы - магнитного канала с помощью специально созданной для этих целей программы /12/ предварительно было проведено сравнение оптических свойств различных типов объективов и вариантов систем, составленных из этих объективов. В результате была выбрана относительно простая схема канала, удовлетворяющая не только требованиям выбранного метода сепарации, но и позволяющая вписаться в имевшиеся экспериментальные площади и предусмотреть возможность размещения детектора частиц - жидководородной пузырьковой камеры в конце канала на сепарируемом пучке. При этом было показано, что в данном случае рационально отступить от установившейся традиции и импульсный анализ вести в той же плоскости, что и разделение частиц по массам. Как видно из рис. 1, магнитный канал

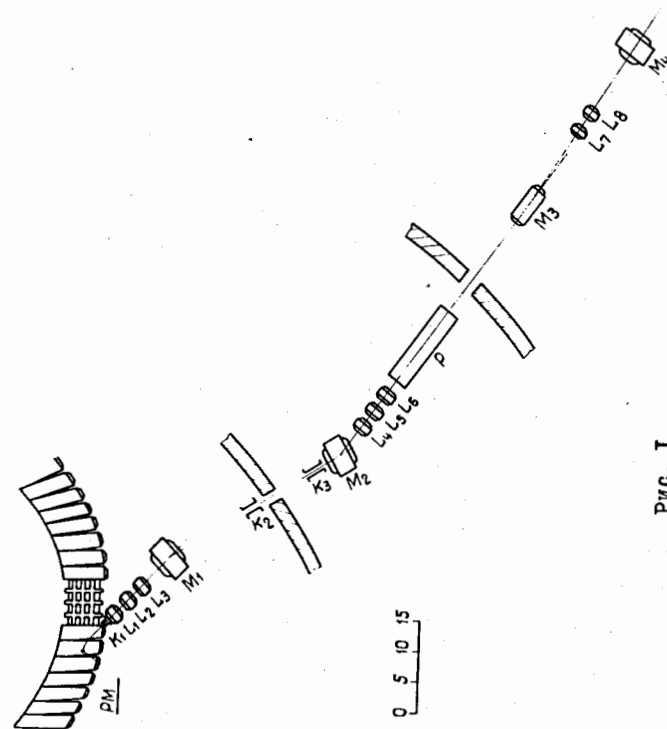


Рис. 1

Схема расположения элементов магнитного канала электродинамического сепаратора антропонов с импульсом 5 ГэВ/с: РМ - мишень; К₁, К₂, К₃ - коллиматоры; L₁ - L₃ - магнитные квадрупольные линзы; M₁ - M₄ - магниты; P - отклоняющее устройство

на участке от мишени до места разделения частиц по массам состоит из двух объективов типа триплет $L_1 - L_3$ и $L_4 - L_6$ и двух отклоняющих магнитов M_1 и M_2 , причём один из них, M_1 , вместе с коллиматором K_3 служит для выделения импульсного интервала в канале, а второй, M_2 , — для компенсации возникающей при этом дисперсии. На этом участке в горизонтальной плоскости для уменьшения коэффициента линейного увеличения и хроматических aberrаций между первым и вторым объективами создавался параллельный пучок, в то время как в вертикальной плоскости фокусировка могла осуществляться как с промежуточным изображением, так и без него. При этом коллиматор K_2 , установленный в месте промежуточного изображения, служит в случае необходимости для подавления прямого фона от ускорителя, K_1 является апертурным коллиматором на входе пучка в канал. Разделённые по массам пучки затем с помощью магнита M_3 (СП-100) разводятся в противоположные стороны, так что \tilde{p} — мезонный пучок гасится в бетонной защите, в то время как \tilde{p} — пучок с помощью дублета линз L_7 и L_8 фокусируется в водородной камере, расположенной в магните M_4 . Кроме того, на основе проведённых измерений топографии магнитного поля в элементах канала с помощью ЭВМ был проведён подробный анализ фокусировки выбранного варианта канала ^{/13,14/}, позволивший не только определить параметры отдельных его элементов, но и получить ожидаемый импульсный спектр и размеры пучка в любом месте канала.

Вторая глава посвящена описанию вопросов, связанных с разработкой экспериментальной аппаратуры, необходимой для проведения наладки и снятия характеристик основных узлов сепаратора.

Было показано, что все работы по наладке и снятию характеристик можно подразделить на пространственные и временные измерения.

Для проведения пространственных измерений была создана система из сцинтилляционных счётчиков, состоящая из двух пар "бегающих" счётчиков, предназначенных для снятия распределения интенсивности в горизонтальной и вертикальной плоскостях, и двух телескопов, один из которых предназначался для мониторинга интенсивности ускоренного пучка, выводимого на рабочую мишень, а второй — для мониторинга пучка в канале и, как правило, окружал "бегающие" счётчики. "Бегающие" счётчики были сделаны парными для уменьшения счёта случайных совпадений и имели сцинтилляторы в первых счётчиках толщиной 3 и 5 мм, развёрнутые торцом к пучку. Эти счётчики имели дистанционное управление с точностью установки в каждом положении $\pm 0,5$ мм.

Для проведения временных измерений сепарируемого пучка необходимо было разработать аппаратуру с разрешающим временем $\tau \leq 0,7$ нсек и временем разделения на уровне $0,1\% \tau_{0,1} \leq 3,3$ нсек

Были разработаны:

- а) четырёхканальная схема совпадений с рекордными для того времени параметрами: разрешающим временем $\tau = 1,5$ нсек, временем разделения $\tau_{0,1} = 3$ нсек и эффективностью выше 95% ^{/15,16/}
- б) новый элемент отбора совпадений внутри самого фотоумножителя. Было показано, что элемент отбора совпадений внутри фотоумножителя целесообразно иметь по возможности ближе к фотокатоду и что наилучшим вариантом была бы разработка фотоумножителя, имеющего одну или две управляющие сетки вблизи фотокатода ^{/17,18/}. Работы по новым управляемым фотоумножителям проводились совместно с Электротехническим институтом Словацкой Академии Наук (Братислава, ЧССР), Исследовательским

институтом по вакуумной электротехнике (Прага, ЧССР), где на базе фотоумножителя Вувет 61PK4I2 был разработан фотоумножитель с одной управляющей сеткой, и Народным предприятием Карл Цейс Иена (ГДР), где на базе фотоумножителя KI4FS 50 был создан фотоумножитель СКР-I с двумя управляющими сетками.

Была также проведена проверка принципа работы управляемого фотоумножителя на стандартном ФЭУ-36. Проверка проводилась при частоте управляющего напряжения 70 Мгц /20/. Позднее были проведены испытания на частоте 150 Мгц для образцов ФЭУ-36, имевших у второго и четвертого динодов выводы на баллон. Результаты испытаний этих фотоумножителей при управлении по четвертому диноду /21/ и фотоумножителей с управляющими сетками типа РМ (61PK4I2) /19/ и СКР-I /22/ при управлении высокочастотным напряжением 150 Мгц, показывают, что наилучшее разрешение $\tau = 0,6$ нсек и время разделения $\tau_{0,1} = 1,5$ нсек получено при работе с двумя фотоумножителями СКР-I /23/. Разрешающая способность каждого из них соответственно равна $\tau = 0,43$ нсек и $\tau_{0,1} = 1,06$ нсек. Таким образом, разработанная аппаратура по своим параметрам полностью удовлетворяет поставленным выше требованиям.

Заметим, что для выбора оптимальных режимов работы фотоумножителей был проделан большой комплекс теоретических расчётов движения электронов в области управления под действием смешанных высокочастотного и постоянного электрических полей.

В третьей главе изложена методика и приведены экспериментальные результаты, полученные при настройке отдельных

узлов и комплексной наладке электродинамического сепаратора.

Первоначально с помощью модели системы кратного ускорения, работающей на частоте 69 Мгц, был впервые осуществлён режим ускорения в синхрофазотроне на 48, 49 и 50 гармониках. При этом была отработана конструкция системы кратного ускорения и экспериментально определены основные характеристики этого режима: зависимость перезахвата ускоренных протонов в режим кратного ускорения ζ от амплитуды ускоряющего напряжения высокой кратности V_q и от величины отклонения основной ускоряющей частоты от кратного соотношения; зависимость скважности h и уровня фона δ в высокочастотной микроструктуре выведенного вторичного пучка от радиального положения мишени - перехватчика /24/.

В результате было найдено, что при относительно невысоком напряжении кратной частоты на щели ускоряющего резонатора $V_q = 50-70$ кВ и соблюдения кратности в частотах с точностью ± 100 гц можно получить $\zeta \approx 0,5$ и при времени вывода пучка на мишень 7 мсек - $h = 1/7$ и $\delta = 0,002$. На рис.2 можно видеть эффект, полученный от использования мишени-перехватчика, кривая "б". Кривая "а" представляет результаты, полученные без мишени-перехватчика.

Результаты наладки оптики магнитного канала при использовании описанной в диссертации новой методики для его настройки /14/, как видно из рис.3, находятся в хорошем согласии с расчётом. В окончательном варианте интенсивность частиц в канале составляла 10^4 н-мезонов на 10^{11} протонов, взаимодействующих с мишенью.

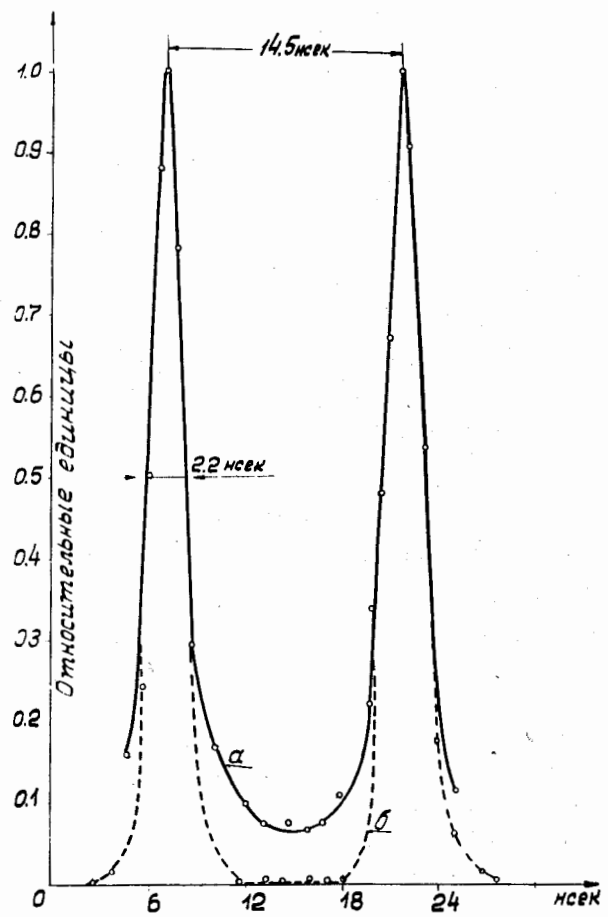


Рис. 2

Временная структура пучка вторичных частиц при ускоряющей частоте 69 мгц: а-без мишени-перехватчика; б-с мишенью-перехватчиком

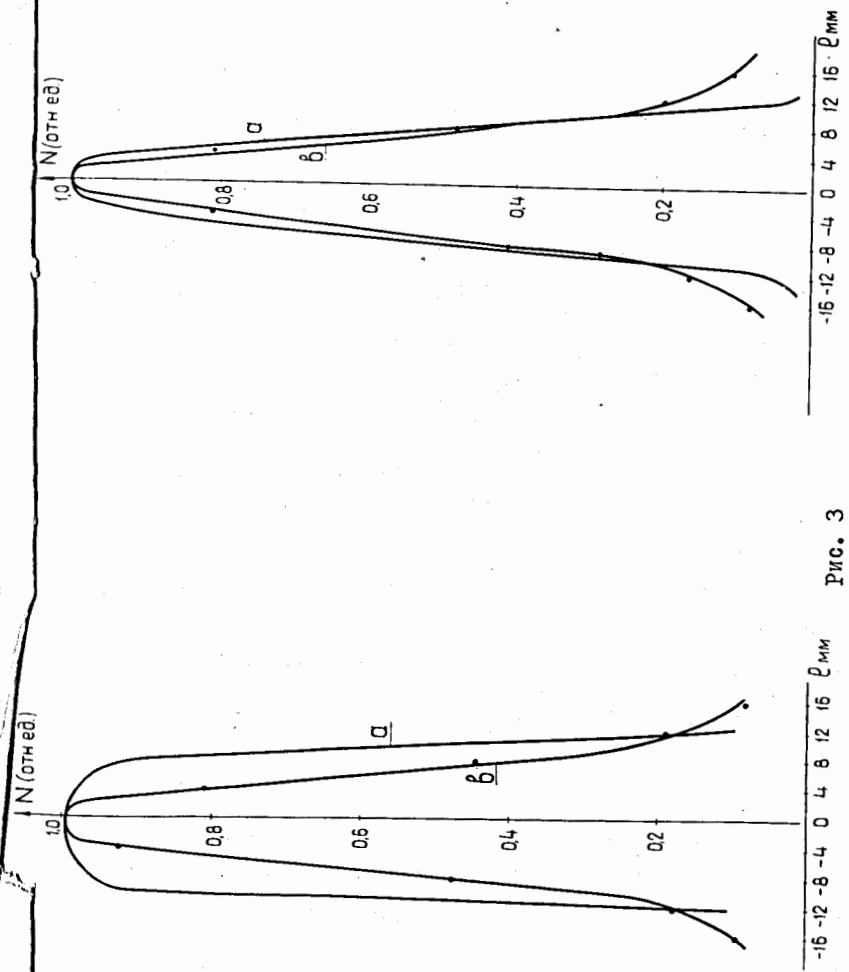


Рис. 3

Горизонтальный (слева) и вертикальный (справа) профили пучка частиц в месте разделения их по массам (перед магнитом СП-100): а - расчётный, б - измеренный спектр

При налаженном магнитном канале была проведена настройка:

а) рабочего варианта системы кратного ускорения, работающей на частоте 149,52 МГц, что соответствует ускорению на 104 кратности, и получены следующие результаты: $h \leq 0,165$ и $\delta \leq 0,001$, при напряжении на щели резонатора системы $V_d = 60$ кв, соблюдении кратности в частотах с точностью ± 50 гц, времени вывода пучка на мишень 2 мсек и работе с двумя мишенями;

б) отклоняющего устройства, работающего на той же частоте, что и система кратного ускорения, и получено, что при расчётном сдвиге фаз между соседними резонаторами $\alpha = 32^\circ \pm 5^\circ$ и вводимой мощности в 16 резонаторов 1,5 Мвт и 1,1 Мвт максимальное отклонение пучка находится в хорошем согласии с расчётом.

На рис.4 представлена высокочастотная микроструктура выведенного вторичного пучка, полученная в месте разделения частиц по массам. Полученные экспериментальные данные при испытании отклоняющего устройства показаны на рис.5.

При комплексной наладке электродинамического сепаратора^{/4/} при работе всех его систем в оптимальном режиме, было установлено, что:

а) если производить отклонение \bar{y} -мезонов влево по пучку, что соответствует проекту, и выбрать размеры щели массового коллиматора, равными 40 мм, установив его на расстоянии 35 мм вправо от оси канала в месте разделения частиц по массам, то коэффициент очистки сепаратора будет 1000;

б) при выбранных размерах и положении массового коллиматора через него будет проходить $\sim 80\%$ всех антипротонов, имеющих в пучке;

в) сепарированный пучок после массового коллиматора содержит один антипротон на две фоновые частицы.

В заключение приводятся основные результаты настоящей работы, которые состоят в следующем:

1. На основе теоретического рассмотрения метода сепарации, предложенного академиком В.И.Векслером и профессором В.А.Петуховым, был обоснован выбор параметров электродинамического сепаратора антипротонов с импульсом 5 Гэв/с. Было показано, что для осуществления предложенного метода необходимо и достаточно:

а) осуществить ускорение на кратной частоте в течение 20 мсек в конце основного цикла ускорения синхрофазотрона;

б) обеспечить вывод ускоренного пучка на мишень за время ~ 2 мсек;

в) вывод пучка на мишень проводить таким образом, чтобы получить вторичный пучок с высокочастотной микроструктурой, имеющей скважность $h \leq 1/5$ и уровень фона $\delta \leq 10^3$;

г) в качестве рабочей частоты выбрать $f \approx 150$ МГц., следовательно, ускорение вести на 104 кратности;

д) при выбранной рабочей частоте амплитуда кратного ускоряющего напряжения должна быть $V_0^{(4)} \geq 70$ кв;

е) для отклоняющего устройства целесообразно выбрать резонаторы тороидального типа в количестве 16 штук, разместив их на расстоянии ~ 56 м от мишени;

ж) для формирования вторичного пучка использовать сравнительно простую схему магнитного канала, состоящую из трёх объективов и трёх магнитов, при этом, отступив от традиции,

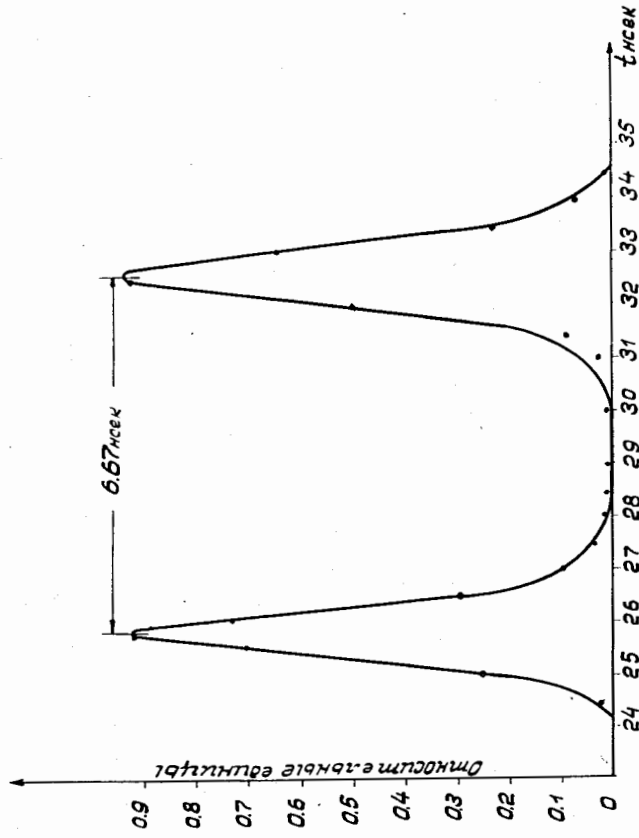


Рис. 4

Временная структура пучка вторичных частиц при ускоряющей частоте 150 МГц

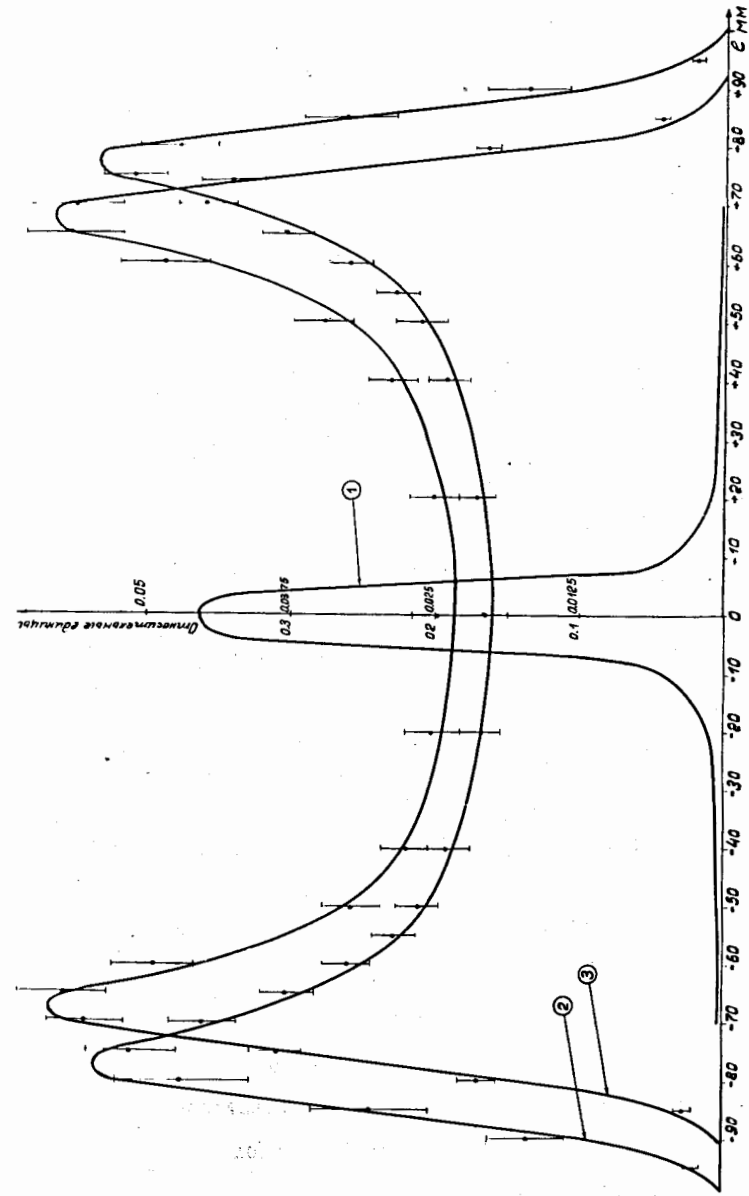


Рис.5 Влияние отклоняющего устройства сепаратора на распределение интенсивности пучка в горизонтальной плоскости

производить импульсный анализ и компенсацию дисперсии в той же плоскости, что и разделение по массам, а отклоняющее устройство сепаратора расположить в сходящемся пучке.

2. При теоретическом рассмотрении:

а) разработан метод расчёта действия отклоняющего устройства из "И" резонаторов на пучок с учётом его временной и пространственной структуры;

б) применена новая методика расчёта оптики магнитного канала, позволяющая не только выбрать режим работы отдельных его элементов, но и определить выделяемый импульсный интервал частиц и размеры пучка в различных местах канала.

Для проведения большинства расчётов создан ряд программ, позволивших с помощью электронно-вычислительной машины за короткий срок проанализировать большое число различных вариантов.

3. Проведён анализ ряда параметров сепаратора, требовавших экспериментальной проверки, и выработаны требования к измерительной аппаратуре.

4. Разработан комплекс аппаратуры, позволивший проводить измерения:

а) пространственных характеристик пучка с точностью $< 3 - 5$ мм;

б) временных характеристик пучка с точностью $< 0,8$ нсек.

5. При разработке аппаратуры были предложены:

а) новый метод исследования временных характеристик пучка с помощью многоканальной схемы совпадений, использующий привязку к фазе ускоряющего напряжения:

б) метод исследования временных процессов с высокой точностью при помощи трёх типов управляемых фотоумножителей.

6. Теоретически и экспериментально исследованы режимы работы управляемых фотоумножителей.

7. Проведено экспериментальное исследование высокочастотной микроструктуры вторичного пучка на макете и рабочем варианте системы кратного ускорения, позволившее определить режим работы, удовлетворяющий теоретическим требованиям.

8. Предложен метод подавления фона в высокочастотной микроструктуре сепарируемого пучка за счёт перехвата рассеявшихся в рабочей мишени частиц мишень-перехватчиком.

9. Предложена и опробована новая методика для наладки оптики магнитного канала, основанная на использовании расчётных зависимостей токов в элементах объективов, при которых фокусирующие свойства объектива меняются только в одной плоскости.

10. Проведено экспериментальное исследование отклоняющего действия системы из 16 резонаторов и определено эффективное значение напряжённости электрического поля в резонаторах по отклоняющему действию системы. Показано, что теоретические расчёты хорошо согласуются с экспериментом.

11. В результате комплексной наладки всех систем были получены следующие основные характеристики сепаратора /I4/ .

Импульс сепарируемых частиц	4,95 Гэв/с
Интервал импульсов, пропускаемый магнитным каналом Δp	$\pm 0,02$ Гэв/с
Интенсивность антипротонов	$I \sim 10^{10} p$
Коэффициент сепарации (очистки)	10^3

Длина канала от мишени до детектора	115 м
Рабочая частота	149,52 Мгц
Кратность ускорения	104
Импульсная высокочастотная мощность:	
а) системы кратного ускорения	0,3 Мвт
б) отклоняющего устройства	1,0 Мвт
Степень очистки	1 \bar{p} /2 фон

Л и т е р а т у р а

1. В.А.Вагин, В.И.Котов, И.Н.Семеновский.
УФН, т.32, вып.4, 708 (1964)
2. В.И.Векслер.
Труды Второй Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева (1958)
3. В.Д.Володин, В.Н.Зубарев, С.В.Мухин, В.А.Попов, С.В.Рихвицкий, А.П.Саенко, И.Н.Семеновский, В.Л.Степанюк.
Препринт ОИЯИ, 2913 (1966)
4. V.D.Volodin, V.N.Zubarev, S.V.Mukhin et al.
Sixth International Conference on High Energy Accelerators, A160 (1967)
5. В.Н.Зубарев, В.С.Кладницкий, А.Б.Кузнецов, С.В.Мухин, Л.С.Охрименко, Н.Б.Рубин, И.Н.Семеновский.
Препринт ОИЯИ, Р-371 (1959)
6. В.А.Вагин, В.И.Векслер, В.Н.Зубарев, А.Б.Кузнецов, С.В.Мухин, В.А.Петухов, В.А.Попов, Н.Б.Рубин, И.Н.Семеновский, В.Л.Степанюк, К.В.Чехлов.
Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, Атомиздат, 788 (1964)

7. В.Н.Зубарев, С.В.Мухин, И.Н.Семеновский
Препринт ОИЯИ, Р-302 (1959)
8. Г.С.Казанский, А.П.Царенков,
Препринт ОИЯИ, 2491 (1965)
9. К.П.Мызников, И.Н.Яловой
Препринт ОИЯИ, 1077 (1962)
10. М.С.Давыдов, Л.Г.Дарфман, В.В.Екимов, В.Б.Залманзон, Г.А.Зейтленок, В.М.Левин, И.Ф.Мальшев, И.Г.Петелин, В.И.Петрунин, В.А.Попов, Н.Х.Трушин, И.Г.Уманский, И.И.Финкельштейн.
Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, Атомиздат, 791 (1964)
11. С.В.Мухин, В.А.Попов, С.В.Рихвицкий, И.Н.Семеновский
Препринт ОИЯИ, Р9-3165 (1967)
12. С.В.Мухин, П.А.Полубоярова, И.Н.Семеновский,
Препринт ОИЯИ, 13-3461 (1967)
13. В.С.Балашова, С.В.Мухин, И.Н.Семеновский
Препринт ОИЯИ, 9-5380 (1970)
14. С.В.Мухин, И.Н.Семеновский
Препринт ОИЯИ, 1-5430 (1970)
15. М.Высочанский, С.В.Мухин, Пин Цунь-цин, С.В.Рихвицкий, И.Н.Семеновский.
Препринт ОИЯИ, 688 (1961); ПТЭ, 3, 67 (1961)
16. М.Высочанский, С.В.Мухин, С.В.Рихвицкий, И.Н.Семеновский,
Пин Цунь-цин. Nuclear Electronics III, 49 (1962)
17. P.Görlich, H.J.Pohl, S.V.Mukhin, I.N.Semenyushkin,
Nuclear Science, NS-13, 3, 112 (1966)
18. P.Görlich, S.V.Mukhin, H.J.Pohl
Proc. Third Czechoslovakian Conference on Vacuum-Electron Physics, Prague (1965)

19. M. Vysocansky, L. Ondris, L. Nagy, E. Lehotay, S.V. Mukhin, S.V. Rikhvizki, I.N. Semenyushkin, I. Raus
Nucl. Instr. and Meth., 41, 157 (1966)
20. М.Высочанский, С.В.Мухин, С.В.Рихвицкий, И.Н.Семеновский, И.Фолтин.
Препринт ОИЯИ, 1556 (1964); ПТЭ, 2, 88 (1965)
21. М.Высочанский, С.В.Мухин, С.В.Рихвицкий, И.Н.Семеновский, И.Фолтин, А.Г.Берковский
Препринт ОИЯИ, 1976 (1965)
22. S.V. Mukhin, H.-J. Pohl, S.V. Rikhvizki, I.N. Semenyushkin, I. Foltin.
Nucl. Instr. and Meth., 33, 339 (1965)
23. S.V. Mukhin, S.V. Rikhvitsky, I.N. Semenyushkin, I. Foltin, M. Vysocansky, E. Lehotay, I. Nagy, L. Ondris, P. Görlich, H.-J. Pohl.
Nuclear Electronics, CN-22/44, 225 (1966)
24. В.А.Вагин, М.Высочанский, С.В.Мухин, С.В.Рихвицкий, И.Н.Семеновский, В.Л.Степанюк, И.Фолтин,
Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, Атомиздат, 795 (1964)

Рукопись поступила в издательский отдел
29 июля 1971 года.