

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

СЗ45

К-736

ИФВЭ 70 / 40

На правах рукописи

В.И. Котов

ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ И СЕПАРАЦИИ ПУЧКОВ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

040 — экспериментальная физика

Автореферат диссертации,  
представленной на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Дубна 1970

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий.

Официальные оппоненты:

1. Доктор физико-математических наук, профессор В.П. Дмитриевский (ОИЯИ, ЛЯП).
2. Доктор технических наук А.А. Васильев (РТИ АН СССР).
3. Доктор физико-математических наук С.Я. Явор (ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР).

Ведущее предприятие - Институт теоретической и экспериментальной физики.

Автореферат разослан "25" июня 1970 г.

Защита диссертации состоится "15" августа 1970 г. на заседании Ученого совета Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, в конференц-зале ЛВЭ ОИЯИ (г. Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института.

Секретарь Ученого совета

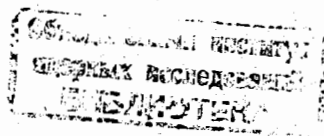
С.В. Мухин.

В. И. Котов

ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ И СЕПАРАЦИИ ПУЧКОВ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

040 — экспериментальная физика

Автореферат диссертации,  
представленной на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук



2035 бр.

Бурное развитие физики элементарных частиц и ускорительной техники за последнее десятилетие привело к становлению новой области корпускулярной оптики, включающей в себя вопросы формирования и сепарации пучков частиц высоких энергий. Для нее характерны применение большого количества магнитных квадрупольных линз и отклоняющих магнитов, значительная протяженность систем, обладающих разнообразными оптическими свойствами, своя терминология, система обозначений и т.д. Широкий диапазон требований к параметрам формируемых пучков, определяемых задачами физического эксперимента, стремление к наиболее эффективному использованию ускорителя и имеющихся экспериментальных площадей, стимулируют поиски новых оптических решений, совершенствование оборудования и систем каналов, разработку оригинальных фокусирующих устройств.

С ростом энергии ускоренных частиц на ускорителях вопрос формирования вторичных пучков превращается в весьма сложную проблему: растут размеры отклоняющих магнитов и квадрупольных линз, протяженность каналов, их насыщенность оптическими элементами и потребляемая мощность, а также повышаются требования к

характеристикам оптических элементов и точности их установки в каналах. При расчетах и проектировании каналов начинают играть существенную роль экономические соображения, поскольку стоимость каналов вместе с экспериментальным оборудованием становится сравнимой со стоимостью самого ускорителя. В соответствии с этим на современном этапе развития ускоритель, система каналов пучков вторичных частиц и экспериментальное оборудование рассматриваются как единый комплекс, проектируемый и создаваемый одновременно. Такой подход позволяет свести к минимуму разрыв во времени между пуском ускорителя и началом физических экспериментов на нем, а также наиболее эффективно использовать все его возможности.

В связи с разработкой протонного синхротрона на энергию 70 Гэв в Институте физики высоких энергий с 1964 г. проводятся работы по созданию системы каналов пучков вторичных частиц и сепараторов. Решение этой проблемы охватывает разнообразный круг вопросов от сугубо технических, связанных с проектированием оборудования каналов, адекватного новому еще нигде ранее неосвоенному диапазону импульсов вторичных частиц, и кончая поисками и применением наиболее эффективных методов исследования параметров формируемых пучков и режимов работы каналов.

В настоящее время на ускорителе ИФВЭ введен в действие комплекс каналов несепарированных пучков, обеспечивающий проведение широкой программы физических исследований, а также завершается разработка высокочастотных сепараторов и каналов сепарированных частиц, предназначенных для формирования на пузырьковые камеры чистых пучков  $K^-$ -мезонов, антипротонов и  $\pi^-$ -мезонов в широком диапазоне импульсов. Действующие каналы обеспечили проведение важных и интересных экспериментов по изучению выходов вторичных отрицательных частиц в области импульсов  $(10 + 65)$  Гэв/с, исследованию полных сечений взаимодействия антипротонов,  $K^-$ ,  $\pi^-$ -ме-

зонов, антинейтронов с протонами и ядрами; поиск кварков, открытие антигеллия-3 и др.

В диссертации, состоящей из 5 глав и 3 приложений, систематизированы и обобщены результаты исследований, связанные с разработкой каналов вторичных частиц и высокочастотных сепараторов.

В первой главе вводится матричный аппарат описания траекторий частиц в квадрупольных линзах и отклоняющих магнитах, который позволяет сравнительно просто исследовать общие свойства сложных оптических систем, удобен для составления различных вычислительных программ, а также при проведении оценок в приближении "тонких" линз. Используя данный подход, в первых параграфах главы 1 устанавливаются основные соотношения как для отдельных линз и магнитов, так и для широко применяемых на практике линзовых систем - дублетов и триплетов. Если в дублете квадрупольных линз при фокусировке из точки в точку и заданной геометрии силы линз  $k\ell$  ( $\ell$  - эффективная длина линзы,  $k = \sqrt{\frac{eG}{pc}}$ ,  $e$  - заряд частицы,  $p$  - ее импульс,  $c$  - скорость света,  $G$  - градиент поля) определяются однозначным образом, то в системе из триплета линз возможна их вариация. При этом существуют, как показано в работе (на примере триплета из одинаковых линз), три области изменения  $k\ell$ , в одной из которых решения отсутствуют (фокусировка точечного источника в точечное изображение невозможна). В области, где силы линз

$k\ell \geq 1$ , коэффициенты линейного увеличения в обеих поперечных плоскостях становятся существенно меньше единицы. Благодаря этой особенности триплет, как фокусирующая система, нашел применение в электронно-лучевых трубках с высокой разрешающей способностью.

На примере триплета линз проводится также сравнение расчетов его свойств по строгим формулам на электронно-вычислительной машине и в приближении тонких линз. При этом показывается, что приближение "тонких" линз качественно правильно отражает ход зависимостей

и может быть использовано для анализа сложных оптических систем.

Наряду с обычными квадрупольными линзами и системами из них, в этой главе анализируются фокусирующие свойства спиральной квадрупольной линзы. Такую линзу можно представить набранной из большого количества достаточно тонких квадрупольных линз, каждая из которых повернута по отношению к предыдущей на малый угол. Обладая двумя независимыми параметрами (градиентом поля  $G$  и углом поворота полюсов на единицу длины  $\gamma$ ), спиральная линза в отличие от обычной квадрупольной при условии

$$k^2 / \gamma^2 < 1$$

осуществляет фокусировку заряженных частиц в обеих поперечных плоскостях. Хотя общая теория движения частиц в полях такого типа и рассматривалась в ряде работ, тем не менее систематический анализ фокусирующих свойств спиральной линзы отсутствовал. Используя матричный формализм, удается сравнительно легко проанализировать основные случаи фокусировки (параллельный пучок в параллельный, точечный источник в точечное изображение, асимметричная фокусировка параллельного пучка и т.п.) и выявить их характерные особенности. Спиральная линза может найти применение при создании высокоинтенсивных пучков заряженных частиц. В частности, предлагаемая в работе система, состоящая из четырех закручивающихся по спирали проводников с током, оказывается достаточно эффективной для формирования мюонных пучков высоких энергий.

В соответствии с требованиями физического эксперимента к параметрам пучков вторичных частиц на ускорителях разрабатываются и используются разнообразные и достаточно сложные оптические системы. Особенно широкое применение на практике получили симметричные оптические системы. Они позволяют, например, передавать изображение с коэффициентами линейного и углового увеличений,

равными  $\pm 1$ , устранять влияние энергетического разброса частиц в пучке на качество изображения, осуществлять параллельный перенос пучка. Исследование систем, обладающих различного рода симметрией, значительно облегчается вследствие того, что полная матрица преобразования в такой системе выражается через матрицу ее первой половины. Рассмотрение симметричных оптических систем проводится во второй главе диссертации в рамках четырехмерного матричного формализма, введенного Е. Блиямптисом:

$$\begin{pmatrix} x' \\ x'' \\ \frac{\Delta p}{p} \\ \Delta s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & 0 \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \\ \frac{\Delta p}{p} \\ \Delta s_0 \end{pmatrix},$$

где  $\frac{\Delta p}{p}$  - относительный разброс частиц по импульсам в пучке,  $\Delta s$  - разница в длинах траекторий частиц относительно осевой траектории,  $x, x'$  - отклонение и угол наклона траектории частицы.

Используя связь между матричными элементами

$$M_{41} = M_{11} M_{23} - M_{21} M_{13},$$

$$M_{42} = M_{12} M_{23} - M_{22} M_{13},$$

можно сформулировать, как показывается в работе, не только условия осуществления ахроматических, но также и изохронных симметричных оптических систем. Общие свойства симметричных систем и принципы их построения разбираются на конкретных многочисленных примерах. При этом, как правило, анализ различных конкретных систем доведен до простых и удобных выражений.

Особенности изохронных систем рассматриваются на примере двух оптических схем. Одна из них обладает зеркальной симметрией, другая - зеркальной симметрией с инверсией. Несмотря на их относительную громоздкость, удается получить замкнутые и достаточно простые соотношения между параметрами каждой системы.



Столь детальное рассмотрение особенностей симметричных оптических систем обусловлено тем, что они как составные части входят в оптические схемы большинства каналов. И хотя на практике, например, по территориальным соображениям, часто не представляется возможным реализовать ту или иную симметричную систему в чистом виде, тем не менее, отталкиваясь от соответствующей симметричной системы, сравнительно легко видоизменить ее применительно к конкретным условиям.

При создании каналов заряженных частиц необходимо учитывать влияние разнообразных возмущающих факторов на характеристики формируемых пучков. Источниками возмущений служат неточности в установке квадрупольных линз и отклоняющих магнитов относительно трассы канала (ошибки юстировки), несоответствие характеристик полей оптических элементов идеальным, недостаточно точная воспроизводимость и стабильность значений полей и градиентов в этих элементах. Также необходимо учитывать влияние аберраций, обусловленных нелинейными членами в уравнениях траекторий частиц. Анализ указанных факторов на параметры пучков в каналах частиц высоких энергий производится в третьей главе.

Точность установки оптических элементов в каналах существенно возрастает с увеличением энергии частиц и, следовательно, с ростом протяженности каналов и числа оптических элементов. В связи с этим в § 2 главы III детально исследуются эффекты, связанные с ошибками юстировки оптических элементов. При этом в рамках матричного представления анализируется влияние различного рода отклонений квадрупольных линз и поворотных магнитов от расчетных положений. На примере дублета квадрупольных линз выделяются основные типы отклонений (смещение оси линз относительно оси канала, повороты линз вокруг продольной и поперечных осей) и рассматриваются эффекты, вызываемые этими отклонениями. Разработанная тео-

рия учета ошибок юстировки позволяет рассчитать и сформулировать требования к точности расстановки квадрупольных линз и поворотных магнитов в каналах.

Из наименее изученных эффектов анализируются aberrации второго порядка в отклоняющих магнитах и квадрупольных линзах. Соответствующие решения получаются методом последовательных приближений. В отличие от отклоняющих магнитов, в уравнениях траекторий для квадрупольных линз не равны нулю лишь члены второго порядка, связанные с разбросом частиц по импульсам (хроматические aberrации). Сопоставление квадратичных членов в решениях для магнитов и квадрупольных линз показывает, что в области частиц высоких энергий при жестких требованиях к разбросу частиц по импульсам ( $\frac{\Delta p}{p} \geq 1\%$ ) основную роль играют хроматические aberrации, вызываемые квадрупольными линзами и приводящие к значительным увеличениям размеров формируемых изображений пучков частиц. Для учета хроматических aberrаций в каналах полученные решения вместе с квадратичными членами записываются в квадрупольных линзах в форме четырехмерных матриц.

В ряде случаев при создании сепарированных пучков частиц становится очень важным уменьшить эффекты, связанные с хроматическими aberrациями. Для этого, например, можно использовать секступольную линзу, с помощью которой достигается компенсация хроматических aberrаций в одной из поперечных плоскостей. Расчет параметров соответствующей секступольной линзы, как показывает работа, несложно провести с использованием четырехмерных матриц, введенных для описания хроматических aberrаций.

Искажение полей в квадрупольных линзах обусловлено, в основном, шестой и десятой гармониками поля. Появление этих гармоник, в частности, связано с отклонением профиля полюсов от идеальной равносторонней гиперболы. В качестве примера в диссер-

тации рассматриваются эффекты, вызываемые шестой гармоникой поля в системе, состоящей из дублета квадрупольных линз. Полученные в приближении "тонких" линз решения позволяют оценить допуск на величину этой гармоники.

Аналогичным образом можно провести оценки влияния на параметры пучков частиц других гармоник поля в квадрупольных линзах.

На основе развитых в этой главе представлений были сформулированы требования к характеристикам оптических элементов и точности их установки при создании каналов на протонном синхротроне ИФВЭ.

Комплекс действующих в ИФВЭ каналов обеспечивает проведение широкой программы физических исследований с использованием разнообразной методики. В оптических схемах каналов заложены принципы, подробно рассмотренные во второй главе. Оптические системы основных каналов, как правило, являются ахроматическими. Однако в соответствии с требованиями к параметрам пучков и стремлением к наиболее оптимальному использованию экспериментальных помещений они не являются копией зеркально-симметричных систем, а обладают рядом специфических особенностей, необходимость которых обусловлена конкретными условиями. План размещения каналов в экспериментальном зале размерами  $(156 \times 90) \text{ см}^2$  приведен на рис.1. В основном, созданные каналы предназначены для работы с высокоэнергетичными пучками вторичных частиц, генерируемых на внутренних мишенях. Перемещая мишени по радиусу в области  $\pm 4$  см относительно равновесной орбиты и используя специальные методы наведения ускоренного протонного пучка на мишень, можно варьировать импульс вторичных частиц в сравнительно широких пределах при постоянной энергии ускоренного протонного пучка  $E_p$ . Так в канале отрицательных частиц с импульсом до 60 Гэв/с (канал № 2 на рис.1) при  $E_p = 70$  Гэв рабочий диапазон импульсов вторичных частиц со-

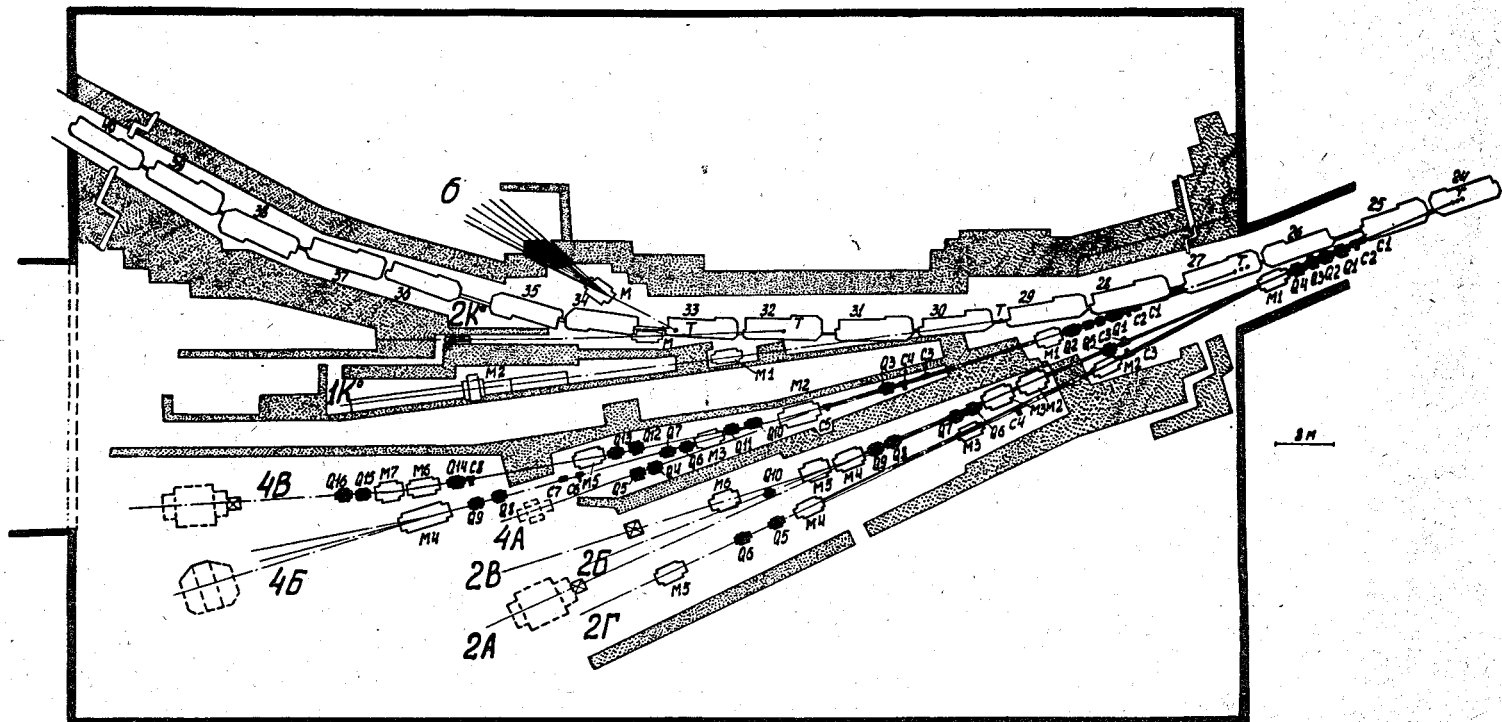


Рис. 1. План размещения пучков в экспериментальном зале ускорителя ИФВЭ;  
 М - отклоняющие магниты; Q - квадрупольные линзы, С - коллиматоры.

ставляет (40-60) Гэв/с, а в канале отрицательных частиц с импульсом до 40 Гэв/с (канал № 4 на рис. 1) - соответственно (25 - 40) Гэв/с. При этом для уменьшения пределов изменения углов образования вторичных частиц до (0 + 8) мрад в каналах № 2 и № 4 используются мишенные станции, состоящие из трех мишеней, расположенных друг от друга на расстоянии  $\sim 70$  см.

Каналы спроектированы таким образом, что формируемые пучки могут отклоняться на несколько экспериментальных установок. Например, на канале № 2 размещены магнитный спектрометр с искровыми камерами (направление 2а), установки для изучения полных сечений (направление 2б) и процессов упругого рассеяния (направление 2в). Направление 2г (см. рис. 1) фактически представляет самостоятельный канал, предназначенный для поиска частиц с дробным зарядом  $1/3$  (кварков).

На канале № 4 располагается установка по исследованию процессов перезарядки (направление 4а), пузырьковая камера и установка по изучению процессов рассеяния назад (направление 4б), магнитный спектрометр с искровыми камерами и установка для поиска тяжелых частиц (направление 4в). Такой подход к проектированию каналов обеспечивает необходимую мобильность в подготовке и проведении экспериментов со сложной и громоздкой физической аппаратурой.

Телесные углы захвата частиц в каналах № 2 и 4 в зависимости от направления находятся в пределах (20+35)мкрстер. Интенсивности вторичных пучков на канале № 2 с импульсным разбросом 1 Гэв/с изменяются от  $10^4$  до  $7 \cdot 10^5$  при переходе от импульса вторичных частиц 60 Гэв/с к 40 Гэв/с соответственно. При этом интенсивность ускоренного до энергии 70 Гэв протонного пучка равна  $10^{12}$  протонов за цикл. На канале № 4 интенсивность сформированных пучков  $\geq 10^6$  при тех же условиях.

Кроме перечисленных выше каналов на ускорителе функционируют два канала нейтральных частиц  $1K^0$  и  $2K^0$  и простой канал положительных частиц № 6, предназначенный для наладки физической аппаратуры. Интенсивность нейтронов на канале №  $1K^0$  при угле образования частиц на мишени  $1^\circ$  составляет  $\sim 10^8$  частиц за цикл для  $E_p = 70$  Гэв и интенсивности ускоренного пучка  $10^{12}$  протонов за цикл.

Эффективное освоение новой области энергий заряженных частиц невозможно без наличия адекватных экспериментальных средств и, в частности, более совершенного оборудования каналов. При разработке этого оборудования, выполненной в НИИЭФА им. Д.В.Ефремова, во многом был учтен богатый опыт, накопленный на таких крупных ускорителях, как протонные синхротроны ЦЕРНа и Брукхейвена.

Каналы на ускорителе ИФВЭ имеют протяженность от 100 до 160 м (от внутренних мишеней до оконечных изображений). На всем протяжении трасс каналов, за исключением мест установки физической аппаратуры, создается вакуум  $\sim 10^{-2}$  мм. рт. ст. Отклоняющие магниты и квадрупольные линзы могут быть отъюстированы с точностью  $\pm 0,1$  мм относительно оси канала. Уровень стабилизации токов возбуждения в магнитных элементах составляет  $(2 + 3) \cdot 10^{-4}$ . Перед монтажом на всех линзах и магнитах были проведены магнитные измерения характеристик полей. В магнитах осуществлялось шиммирование полей, так чтобы в широком диапазоне индукций  $(5 + 18)$  кгс неоднородность поля в рабочей области по горизонтали была не хуже 0,3%. Результаты гармонического анализа полей в квадрупольных линзах показали, что амплитуды основных высших гармоник поля в несколько раз меньше, чем, например, в линзах Брукхейвенской лаборатории. По результатам магнитных измерений корректировались расчеты режимов работы элементов каналов.

Для ограничения размеров пучков в зависимости от апертуры физических установок, формирования пучков с заданным импульсным составом, удобства при проведении наладочных работ на каналах установлены дистанционно управляемые горизонтальные и вертикальные коллиматоры. "Щеки" коллиматоров длиной 75 или 50 см, шириной 16 см и высотой 18 см, выполненные из меди, могут перемещаться в вакуумном корпусе в пределах  $\pm 8$  см с точностью фиксации их положения относительно оси 0,1 мм.

При проведении наладочных работ и контроля за параметрами пучков на каналах используется стандартная регистрирующая электроника, разработанная в ИФВЭ. Настройка режимов работы каналов при проведении экспериментов, не требующих предельно высоких разрешений частиц по импульсам, как правило, осуществлялась на максимум счета частиц в канале. Изучение характеристик каналов базировалось на точных расчетах ожидаемых параметров пучков в различных характерных местах канала и расчетном материале по процедурам настройки. Благодаря такому подходу, существенно сокращается время настройки каналов (до 60 часов работы ускорителя). На рис. 2 в качестве примера приведены характерные профили пучка в конечном изображении на канале № 26. Описание разработанных на ускорителе ИФВЭ каналов, особенности их оптических схем, методы исследования режимов их работы и параметры сформированных пучков даются в четвертой главе диссертации.

В пятой главе и трех приложениях рассматриваются проблемы, связанные с разработкой высокочастотных сепараторов, которые пока являются единственными приборами, позволяющими эффективно проводить разделение частиц по массам в области энергий свыше 10 Гэв.

В ИФВЭ завершается создание каналов и высокочастотных сепараторов для французской водородной камеры "Мирабель" (сепаратор

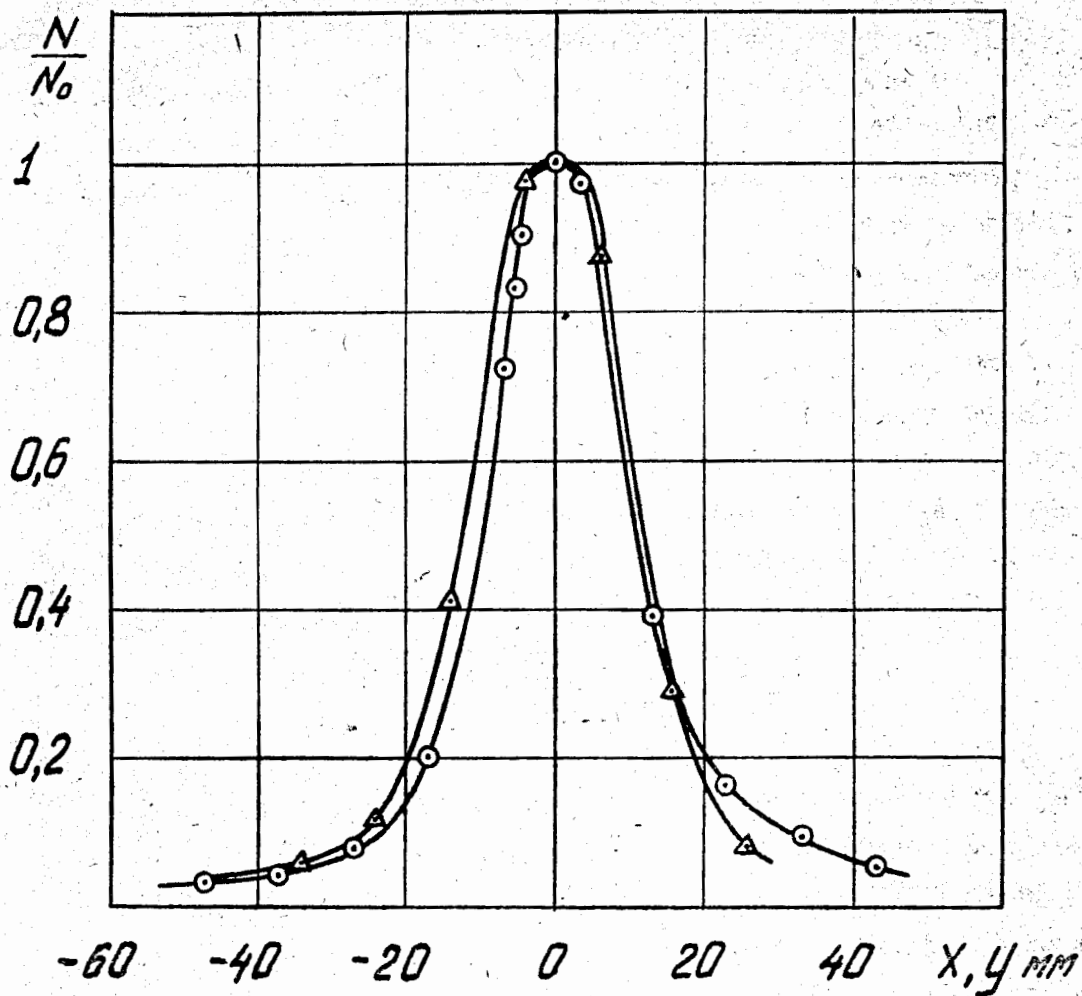


Рис. 2. Профили пучка вторичных частиц с импульсом 50 Гэв/с в оконечном изображении на канале № 26 в вертикальной (—▲—) и горизонтальной (—○—) плоскостях.



разрабатывается в ЦЕРНе совместно с сотрудниками ИФВЭ) и двух-метровой камеры ОИЯИ. На канале для камеры "Мирабель", протяженность которого 512 м, с использованием трехдефлекторного варианта сепаратора можно будет получать чистые пучки  $K^+$ -мезонов до импульсов 40 ГэВ/с,  $K^-$ -мезоны и антипротоны из-за ограничения по интенсивности - до 35 ГэВ/с,  $\pi$ -мезоны до 60 ГэВ/с. Нижний предел по импульсам определяется возрастанием мюонного фона от распада и составляет приблизительно 17 ГэВ/с.

В качестве дефлекторов в сепараторе используются секции диафрагмированного волновода длиной  $L = 6$  м, в которых возбуждается гибридная волна  $EH_{11}$ . Длительность высокочастотного импульса составляет 8 мксек на уровне мощности  $P_0 = 20$  Мвт. Поперечный импульс  $P_{\perp}$ , приобретаемый частицей при пролете дефлектора, определяется соотношением

$$P_{\perp} c = e \sqrt{\frac{\omega}{v_{gr}} (R/Q) P} \left( \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \right),$$

где  $\omega$  - круговая частота,  $v_{gr}$  - групповая скорость волны,  $R/Q$  - отношение шунтового импеданса к добротности,  $\alpha$  - коэффициент затухания. Для получения максимальных отклонений частиц параметры, входящие в это выражение, и, соответственно, структура волновода должны быть выбраны оптимальным образом. Величины  $v_{gr}$ ,  $R/Q$ ,  $\alpha$  могут быть измерены экспериментально на моделях волноводов в широком диапазоне изменения их параметров или рассчитаны по специально разработанным программам. Сравнение результатов измерений с расчетами показывает на их согласие в пределах нескольких процентов. Максимально допустимый уровень вводимой в дефлектор мощности и, следовательно, максимальные величины напряженностей полей определяются электрической прочностью структуры и находятся

только экспериментальным путем. Впервые на важность измерений максимальных напряженностей полей было указано в работах автора, что стимулировало разработку методик измерений и детальные исследования структур волноводов как в ИФВЭ, так и в ЦЕРНе. Длина deflectора  $L$  определяется из условия оптимального использования аксептанса сепаратора. Схема оптимизации детально исследуется в одноволновом приближении, которое позволяет качественно выявить основные особенности распространения гибридных волн и получить простые соотношения, удобные для различных оценок при расчетах, в широкой области измерения параметров волноводов.

В приложении I дается общий подход к получению дисперсионного уравнения гибридных волн и выводится дисперсионное соотношение в одноволновом приближении для диафрагмированного волновода. В приложении II проводится детальный анализ этого соотношения, находится выражение для групповой скорости в случае фазовой скорости, равной скорости света; получаются формулы, определяющие допуски на основные параметры deflectоров. На основе полученных результатов дается последовательный анализ схемы выбора оптимальных параметров волновода, как deflectора высокочастотного сепаратора.

В приложении III исследуются свойства гибридных волн, распространяющихся в круглом волноводе, частично заполненном изотропным диэлектриком. Показывается, что в отличие от диафрагмированного волновода, в котором могут распространяться как прямые, так и обратные гибридные волны, в данном случае существуют только прямые волны. Исследования по распространению гибридных волн в волноводе с диэлектриком представляют интерес в связи с обсуждающимися в литературе вариантами deflectоров сепараторов для строящегося в Батавии (США) ускорителя на энергии ускоренных протонов (200 + 500) Гэв.

В основу диссертации положены результаты, опубликованные автором в монографии /1/ (главы 3, 5, 7) и работах /2-14/. Часть из них докладывалась на У (Фраскати - 1965 г.) и УИ (Ереван - 1969г.) Международных конференциях по ускорителям высоких энергий.

### Л и т е р а т у р а

1. В.И.Котов, В.В.Миллер. Фокусировка и разделение по массам частицы высоких энергий, М., Атомиздат, 1969.
2. В.П.Карташев, В.И.Котов, Б.А.Уточкин. Радиотехника и электроника, 13, 1854 (1968).
3. В.П.Карташев, В.И.Котов, Р.А.Рзаев. Препринт ИФВЭ 69-11, Серпухов, 1969.
4. V.P.Cartashev, V.I.Kotov. V Inter. Conf. on High Energy Accelerators, p. 514, Frascati, 1965.
5. В.И.Котов, Р.А.Рзаев. Препринт ИФВЭ 69-68, Серпухов, 1969.
6. В.П.Карташев, В.И.Котов. ЖТФ, 36, 1569 (1966).
7. В.П.Карташев, В.И.Котов. ЖТФ, 36 1727 (1966).
8. В.П.Карташев, В.И.Котов, Р.А.Рзаев. Препринт ИФВЭ 67-22-К, Серпухов, 1967.
9. К.И.Губриенко, Е.В.Еременко, В.И.Котов, А.В.Самойлов, Р.М.Суляев, Ю.С.Ходырев. Доклад на УИ Международной конференции по ускорителям высоких энергий. Ереван, август 1969; Препринт ИФВЭ 69-77, Серпухов, 1969.
10. В.А.Вагин, В.И.Котов, А.В.Самойлов, А.М.Фролов. Препринт ОИЯИ 2261, Дубна 1965.
11. В.А.Вагин, В.И.Котов, И.Н.Семенович. УФН, 82 707, 1964.
12. N.Galjaev, V.Kotov, A.Samoilov, V.Vaghin, P.Bernard, D.Lasard, P. Laseyras, H.Lengeler. Доклад на УИ Международной конференции по ускорителям высоких энергий. Ереван, август 1969; Препринт CERN/D Ph. II/Sep. 69-4, 1969.
13. В.А.Вагин, В.И.Котов. ЖТФ, 35, 1273 (1965).
14. И.А.Александров, В.А.Вагин, В.И.Котов. ЖТФ, 36, 2002 (1966).

Рукопись поступила в издательскую группу  
29 мая 1970 года.