

ПУЧКИ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ОТ ШЕСТИМЕТРОВОГО СИНХРОЦИКЛОТРОНА И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ*)

(Обзор работ)

**В. И. Железов, В. И. Дмитриевский, В. С. Катыхин, М. С. Козодаев,
М. Г. Мецераков, К. И. Тараканов, А. В. Честной**

Рассматривается проблема повышения эффективности использования шестиметрового синхроциклотрона Института ядерных проблем АН СССР. Описывается методика получения и коллимации большого числа пучков частиц, на которых могут одновременно работать несколько экспериментальных установок. Даются краткие характеристики этих пучков.

Введение

Ускорители частиц до энергий в несколько сотен миллионов электронвольт и выше открывают широкие возможности для проведения исследований по наиболее актуальным проблемам современной ядерной физики, таким, как изучение структуры и свойств элементарных частиц, выяснение характера их взаимодействия, определение схем взаимных превращений и т. п.

Мощные ускорители представляют собой грандиозные промышленные сооружения, требующие затраты больших средств на их создание и эксплуатацию. В связи с этим особую важность приобретает рассмотрение путей возможно более полного и эффективно их использования.

В настоящем сообщении дается краткое описание того, как решена эта проблема на

шестиметровом синхроциклотроне Института ядерных проблем АН СССР [1], ускоряющем протоны до энергии 680 Мэв.

Основные пути повышения эффективности использования ускорителя

Основной целью научных исследований на шестиметровом синхроциклотроне являлось изучение процессов упругого и неупругого взаимодействия нуклонов с энергиями 300—660 Мэв с нуклонами и рассеяния π -мезонов нуклонами и дейтронами. Так как сечения большинства из этих процессов составляют от нескольких единиц до нескольких десятков миллибарн, то получение точных количественных данных связано со значительными затратами времени работы ускорителя.

В этих условиях эффективность и широта использования синхроциклотрона для ядерных исследований с частицами высоких энергий в значительной степени зависит от рационального решения двух задач: вывода из

*) Доложено на Симпозиуме CERN по ускорителям на большие энергии и мезонной физике (Женева, июнь 1956 г.).

вакуумной камеры ускорителя интенсивных пучков различного рода частиц высоких энергий и резкого понижения фона, обусловленного сопутствующими излучениями.

В связи с этим на шестиметровом синхротронном циклотроне было осуществлено следующее:

а) вывод из камеры ускорителя за защиту пучков протонов, нейтронов и π -мезонов высоких энергий по тринадцати направлениям;

б) сооружение измерительного павильона и специальной лаборатории, защищенных от фоновых излучений, для работы с пучками π -мезонов;

в) одновременное выполнение экспериментов на нескольких пучках одинаковых или различных частиц; экранирование аппаратуры;

г) использование автоматического и дистанционного управления экспериментальной аппаратурой;

д) применение многоканальных электронных систем для регистрации ядерных процессов.

Пучки частиц высоких энергий

Синхротрон в принципе позволяет получать пучки частиц высоких энергий из любой точки орбиты ускоренных протонов. Однако успешная реализация этой возможности существенным образом зависит от конструкции ускорителя.

Важно, чтобы большая часть внутреннего объема вакуумной камеры ускорителя, а также значительная часть ее боковых поверхностей были свободны от каких-либо

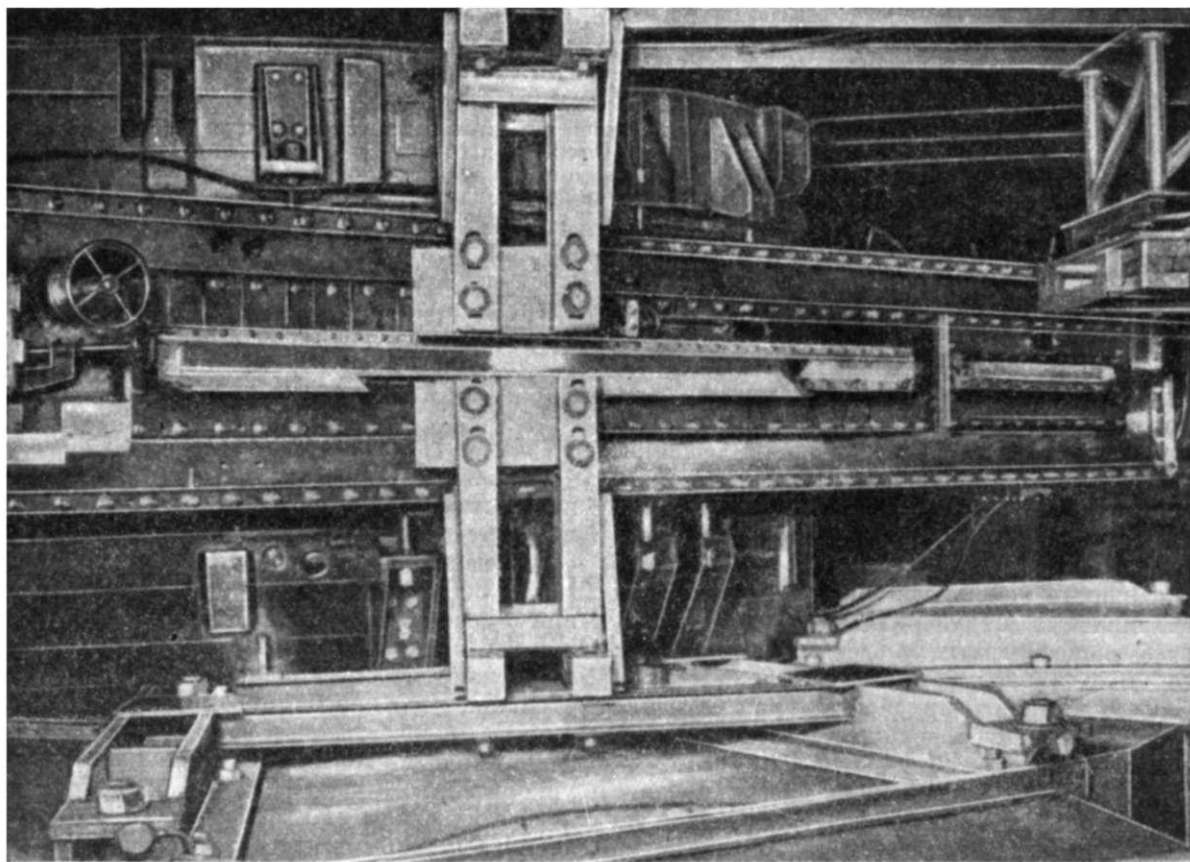


Рис. 1. Вакуумная камера синхротронного циклотрона со стороны вывода пучков протонов, нейтронов и π -мезонов.

устройств, препятствующих выводу пучков частиц. Насколько эти условия выполнены на шестиметровом синхроциклотроне, показано на рис. 1 и 2.

На первом из них изображена передняя стенка камеры. Практически вдоль всей

бразуре четырехметровой защитной бетонной стены установлены коллиматоры. Последние представляют собой стальные блоки квадратного сечения длиной 3,6 м с отверстием в центре, диаметр которого можно менять в пределах от 10 до 150 мм. Пространство

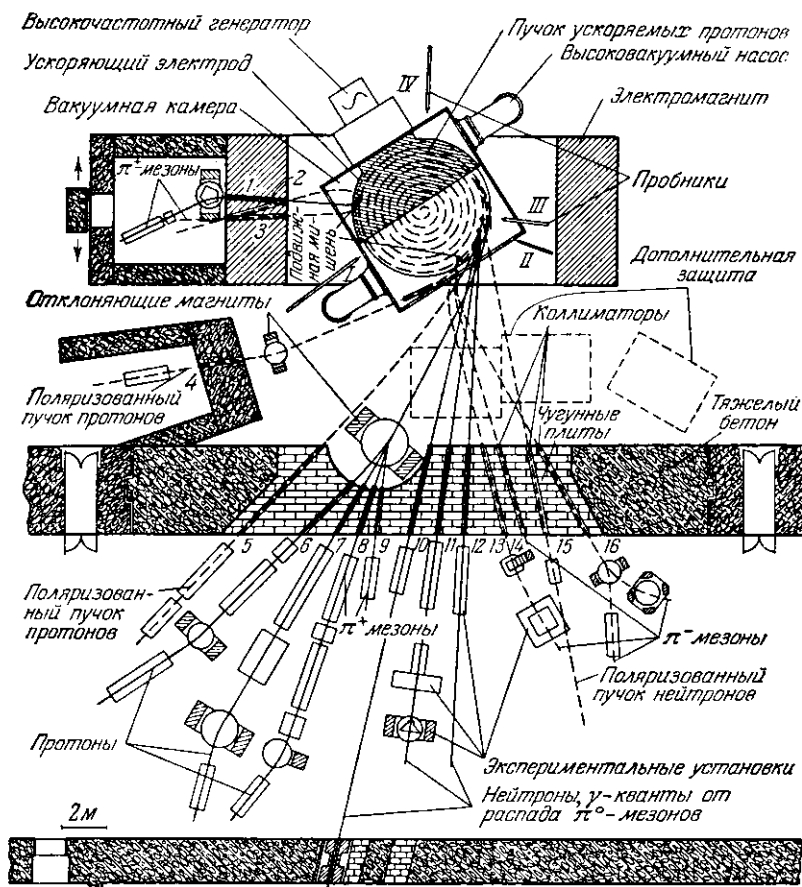


Рис. 2. Пучки частиц высокой энергии от шестиметрового синхроциклотрона.

этой стенки на уровне орбиты ускоряемых протонов сделаны окна для выпуска пучков частиц, закрытые дюралиевыми диафрагмами толщиной около 1 мм.

На рис. 2 дана общая схема камеры синхроциклотрона, показана разводка пучков частиц, а также размещение защитных сооружений и измерительной аппаратуры.

Большая часть выведенных в атмосферу пучков частиц высоких энергий направляется в измерительный павильон, где расположены экспериментальные установки. В ам-

между коллиматорами заложено чугуныи плиты, что, с одной стороны, обеспечивает высококачественную защиту амбразур, а с другой — облегчает возможность изменений положения коллиматоров. На рис. 3 показан продольный разрез здания, в котором размещен синхроциклотрон и дополнительная местная защита из бетонных плит, установленных перед четырехметровой стеной измерительного павильона (на рис. 2 положение этой защиты показано пунктиром). На этих же рисунках показан коллиматор

в виде кольца, установленный в одном из пучков нейтронов и предназначенный для работ с рассеивателями кольцевой формы.

лено особое внимание. В связи с этим использованный ранее способ вывода протонов в атмосферу, основанный на рассеянии

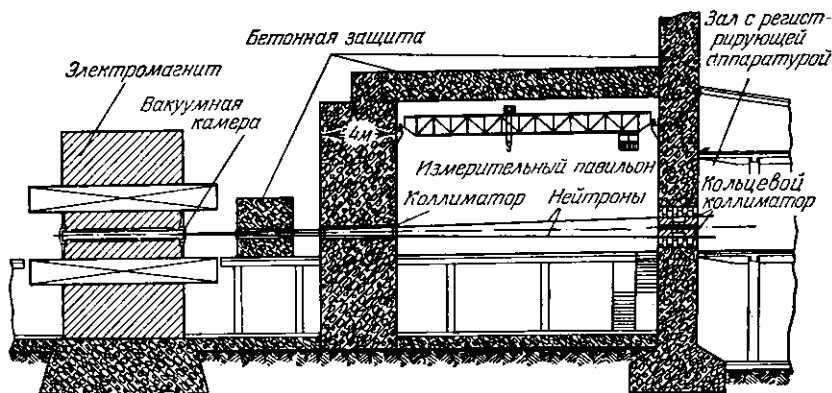


Рис. 3. Защита от излучений шестиметрового синхротрона.

Качество защиты рабочих помещений синхротрона от излучений ускорителя

Качество защиты измерительного павильона и зала с регистрирующей аппаратурой от излучений синхротрона характеризуется следующими данными. Уровень общего излучения в измерительном павильоне при токе протонов с энергией 680 Мэв на внутреннюю мишень 0,2—0,3 мка изменяется от 0,1—0,2 мкр/сек (в правой стороне павильона) до 1,5—3 мкр/сек (в левой стороне павильона, где имеется люк в потолке для работы подъемного крана); интенсивность быстрых нейтронов (энергия 0,5 Мэв и выше) изменяется при этом от 1—2 нейтр/см²сек до 60 нейтр/см²сек соответственно. Число нейтронов с энергией более 50 Мэв не превышает 5 нейтр/см²сек [2].

В зале регистрирующей аппаратуры уровень сопутствующих излучений ничтожно мал. Об этом свидетельствует тот факт, что при работе ускорителя на самой высокой интенсивности нагрузка гейгеровского счетчика в любом участке зала не превышает удвоенного фона от космического излучения [2].

Характеристики пучков частиц высоких энергий, выведенных из камеры ускорителя

Неполяризованный пучок протонов. По-вышению интенсивности выведенного пучка протонов по понятным причинам было уде-

их в урановой мишени, был заменен новым методом [3], экспериментально разработанным в Институте ядерных проблем АН СССР [4], а также в Лаборатории ядерной физики Ливерпульского университета [5] и основанным на возбуждении радиальных колебаний частиц при помощи локальных неоднородностей магнитного поля.

Локальные неоднородности напряженности магнитного поля создавались при помощи железных масс, расположенных в зоне последних орбит ускорителя. Для возбуждения радиальных колебаний используется возбудитель. В области возбудителя напряженность магнитного поля уменьшается вдоль радиуса. Компенсация прецессии центров кривизны орбит частиц достигается при помощи второй области возмущения (регенератор), в которой напряженность магнитного поля по радиусу резко увеличивается.

Конфигурация магнитного поля в зоне возмущения, а также радиальная протяженность этой зоны удовлетворяют требованиям, которые обеспечивают достаточно большой радиальный шаг на последнем обороте (около 40 мм [6]) и в то же время не нарушают устойчивости движения частиц в вертикальной плоскости.

Для вывода частиц из камеры ускорителя используется магнитный канал, состоящий из двух железных пластин переменного сечения.

Для того чтобы скомпенсировать угловую расходимость выведенного пучка протонов,

после магнитного канала установлено фокусирующее устройство, уменьшающее расходимость пучка в горизонтальной плоскости [7]. На расстоянии 7 м от выхода из магнитного канала пучок имеет диаметр около 8 см. Угловая расходимость выведенного пучка не превышает $\pm 0,5^\circ$.

Полная интенсивность выведенного пучка, а также плотность на различных расстояниях от камеры вдоль траектории пучка определялись по наведенной β -активности от реакции $C^{12}(p, pn)C^{11}$. В результате этих измерений было найдено, что общий поток протонов на выходе из магнитного канала равен $7 \cdot 10^{10}$ протонов/сек, что составляет 5—6% по отношению к среднему току частиц в зоне последних орбит.

Выведенный пучок при помощи отклоняющего электромагнита может направляться в один из трех коллиматоров (6, 7 или 8), установленных в защитной бетонной стене (рис. 2). Таким путем, с одной стороны, удается значительно расширить зону, в которой могут располагаться экспериментальные установки, предназначенные для исследований с протонами, а с другой—создать наиболее благоприятные условия для работы большей части приборов.

Плотность потока протонов в измерительном павильоне на расстоянии 15 м от выпускного окна камеры составляет $(1-2) \cdot 10^8$ протонов/см² сек. Энергетическое распределение протонов в пучке отличается высокой однородностью. Отклонение энергий частиц от $E_{\text{средн}} = 657$ Мэв по измерениям пробегов протонов в меди не превышает ± 5 Мэв [8].

Высокая интенсивность выведенного пучка протонов позволила получить вне камеры ускорителя пучки π -мезонов с энергиями до 400 Мэв при плотности до 60 мезонов/см² сек (при энергии около 240—270 Мэв). В этих опытах мишень из жидкого водорода или полиэтилена располагалась в протонном пучке перед отклоняющим электромагнитом (рис. 2); π -мезоны анализировались по импульсам и направлялись в измерительный павильон через коллиматоры 8 и 9. Энергети-

ческий разброс π -мезонов в этих пучках составляет ± 5 Мэв при энергии 300 Мэв [9]. На рис. 4 приведен типичный энергетический спектр π^+ -мезонов, образованных в соударениях протонов с протонами при энергии 657 Мэв [9]. (Угол испускания π -мезонов 24° в лабораторной системе координат.)

Пучки нейтронов, γ -квантов и поляризованные пучки нуклонов. Нейтроны на шести-

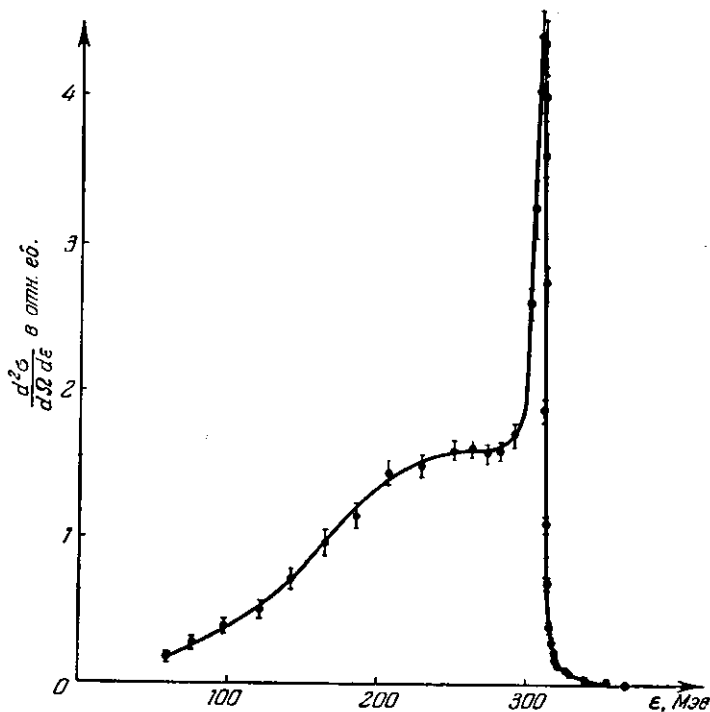


Рис. 4. Энергетический спектр π^+ -мезонов от (p-p)-соударений

метровом синхrocиклотроне получают так же, как и на всех других ускорителях частиц высоких энергий путем бомбардировки протонами внутренней мишени (обычно из бериллия), устанавливаемой на пробнике (рис. 2, пробник III) в зоне крайних орбит. Из широкого пучка вылетающих из мишени нейтронов при помощи коллиматоров 10, 11, 12 и 15 вырезаются четыре узких луча. Первые три пучка нейтронов являются неполяризованными. При энергии первичных протонов 680 Мэв плотность потока нейтронов с энергией более 400 Мэв в месте расположения экспериментальных установок составляет около $2 \cdot 10^4$ нейтр/см² сек. Четвертый пучок нейтронов (коллиматор 15, угол

испускания 18°) частично поляризован. Как показали опыты, поляризация в нем составляет около 15% [10]. Энергетический спектр нейтронов, выходящих из коллиматора 11

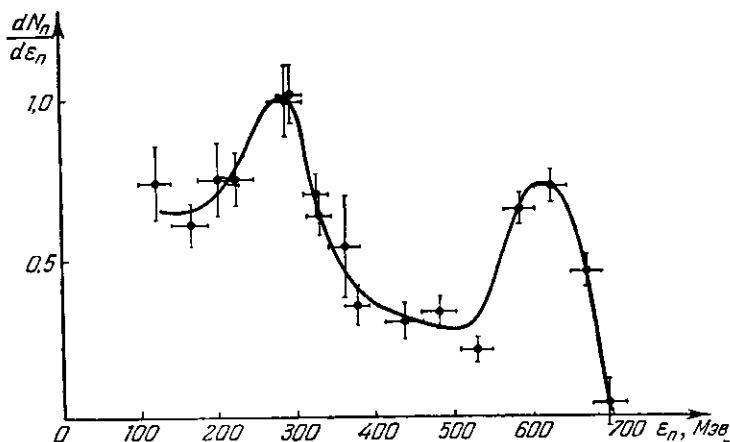


Рис. 5. Энергетическое распределение нейтронов.

(угол испускания 0°), приводится на рис. 5 [11]. Спектры нейтронов, выходящих из других коллиматоров, подобны, но максимумы их несколько смещены в сторону меньших энергий.

Для пучка, выходящего из коллиматора 15, смещение основного максимума наибольшее и составляет около 80 Мэв [11].

Наряду с четырьмя пучками нейтронов из той же мишени выходят четыре пучка γ -квантов высоких энергий, получающихся от распада образующихся в ней нейтральных π -мезонов. Интенсивность пучка γ -квантов с энергией больше 10 Мэв в измерительном павильоне составляет около $2 \cdot 10^3$ квантов/см² сек (коллиматор 11). Энергетическое распределение их показано на рис. 6 [12]. Исследование этого γ -излучения является основным источником для получения сведений о свойствах и характере взаимодействия π^0 -мезонов с веществом.

В связи с тем, что опыты с поляризованными пучками нуклонов представляют боль-

шой интерес, на шестиметровом синхроциклотроне осуществлен также вывод двух поляризованных пучков протонов. Один из них, проходящий через коллиматор 4, состоит из протонов, дифракционно рассеявшихся на ядрах бериллия внутри вакуумной камеры. Степень поляризации пучка достигает около 60% [13]; энергия протонов 635 ± 15 Мэв. Другой пучок, проходящий через коллиматор 5, состоит из протонов, квазиупруго рассеявшихся на нуклонах в ядрах бериллия. Поляризация в этом пучке составляет около 30% [13]. Интенсивности обоих пучков примерно равны и составляют около $4 \cdot 10^4$ протонов/см² сек.

Пучки π -мезонов. С целью создания наиболее благоприятных условий для работ с отрицательными π -мезонами непосредственно за одной из вертикальных стоек ярма электромагнита была сооружена «мезонная» лаборатория. Железное ядро магнита имеет тол-

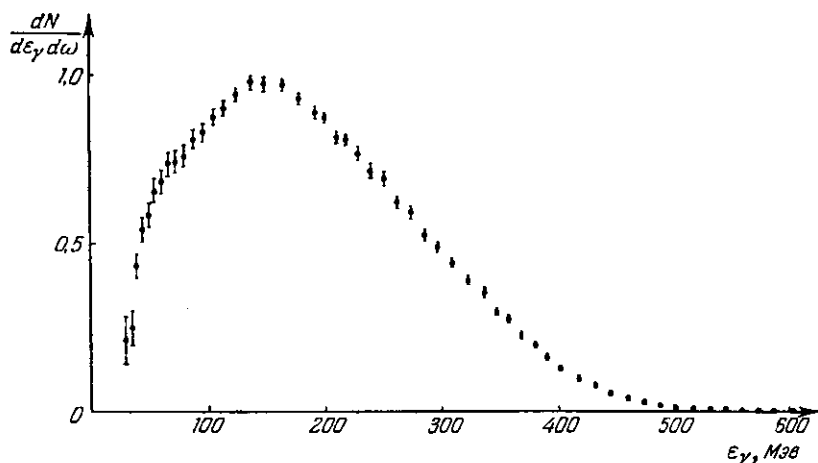


Рис. 6. Энергетическое распределение γ -квантов от распада π^0 -мезонов, образованных при соударениях протонов с энергией 670 Мэв с ядрами углерода.

щину около 3 м и представляет надежную защиту от прямого излучения, идущего от камеры ускорителя. Бетонные стены и потолок лаборатории толщиной в 1 м служат для защиты от рассеянных нейтронов и γ -излучения.

Для вывода мезонов в эту лабораторию в ярме магнита установлено три коллиматора (1, 2, 3); магнитное поле в которых при помощи многослойных экранов снижено от 1600 до 1—2 э.

В эти коллиматоры направляются π -мезоны, образующиеся в бериллиевой мишени (толщина 10 мм), расположенной внутри ускоряющего электрода (дуанта). Мишень снабжена дистанционным управлением. При изменении ее азимутального и радиального положений в условиях прямого или обратного (по направлению) магнитного поля в зазоре электромагнита в «мезонную» лабораторию выходят π -мезоны различных энергий того и другого знака. Таким путем формируются пучки π^- -мезонов с энергиями от 140 до 410 Мэв и π^+ -мезонов с энергиями от 140 до 245 Мэв. Интенсивность пучков π^- -мезонов «в мезонной» лаборатории изменяется в зависимости от энергии в пределах от 200 до 2—3 мезонов/см² сек [14]. Фон сопутствующих излучений в этой лаборатории все-таки относительно высок: общее излучение 1—2 мкр/сек, тепловые нейтроны 500 нейтр/см² сек, нейтроны с $E_n > 50$ Мэв—3 нейтр/см² сек [14]. Для снижения указанного фона толщину бетонных защитных стен следует увеличить до 1,5—2 м.

При проведении опытов с камерами Вильсона и диффузионными камерами интенсивность пучков π -мезонов не должна превышать 20—30 частиц/см² сек, а уровень фона посторонних излучений должен быть крайне низким. В таких опытах используются отрицательные π -мезоны с энергиями от 150 до 400 Мэв, поступающие в измерительный павильон через коллиматоры 13, 14 и 16. Интенсивности этих пучков π -мезонов колеблются от 40 на см² сек ($E_{\pi^-} = 230$ Мэв) до 1—2 на см² сек ($E_{\pi^-} = 400$ Мэв). Энергетический разброс составляет при этом ± 6 Мэв при $E_{\pi^-} = 230$ Мэв [15]. Источником мезонов является вторая подвижная мишень, приводной механизм которой размещен на передней стенке вакуумной камеры ускорителя.

В заключение описания пучков частиц следует отметить, что трудоемкость работ по трассировке пучков заряженных π -мезонов была существенно снижена благодаря широкому применению метода натянутой нити с током для определения траекторий частиц [16].

Облучение образцов внутри камеры синхроциклотрона

Наряду с находящимися в камере подвижными мишенями ускоритель снабжен четырьмя пробниками, при помощи которых можно экспрессно вводить внутрь вакуумной камеры (и выводить из нее) образцы из различных веществ для облучения их пучком протонов, ускоренных до желаемой энергии. Подобный метод облучения образцов широко используется при радиохимических исследованиях.

Одновременная работа на нескольких пучках частиц

В экспериментах с частицами высоких энергий применялась различная методика: электронные методы регистрации частиц (сцинтилляционные счетчики и счетчики излучения Черенкова в сочетании с фотоэлектронными умножителями), толстослойные фотозумьсии, магнитные спектрометры, камеры Вильсона, диффузионные камеры, пузырьковые камеры и др.

В распоряжении экспериментаторов находится десять электромагнитов с диаметром полюсов от 30 до 100 см, обеспеченных системами питания, допускающими одновременную работу до пяти магнитов. Имеется также несколько тысяч плит из бетона весом по 50 кг для сооружения местных защит.

Размещение экспериментальных установок в измерительном павильоне показано на рис. 7. Все оконечные регистрирующие устройства (пересчетные схемы, самописцы, электромеханические счетчики и пр.), а также пульты дистанционного управления экспериментальными установками и регуляторы тока электромагнитов, находящихся в зоне повышенной биологической опасности (в измерительном павильоне и «мезонной» лаборатории), расположены в особом зале регистрирующей аппаратуры, который отделен двухметровой бетонной стеной от измерительного павильона (см. рис. 3). Аппаратура, размещенная в этих двух залах, соединяется между собой при помощи системы высокочастотных, высоковольтных и контрольных кабелей. Система кабельных шкафов позволяет использовать регистрирующую аппаратуру совместно с любой из эксперименталь-

ных установок, расположенных в любом участке измерительного павильона.

При работе синхроциклотрона вход людям в измерительный павильон запрещен; входные двери снабжены автоблокировкой. Научный персонал, занятый проведением ядерных исследований на ускорителе, находится в это

на 10—12 установках с четырьмя пучками нейтронов и двумя пучками поляризованных протонов. Удастся также одновременно проводить эксперименты на двух камерах (Вильсона и диффузионной) с пучками отрицательных π -мезонов, выходящих в измерительный павильон.



Рис. 7. Измерительный павильон с расположенными в нем экспериментальными установками.

время в зале регистрирующей аппаратуры. Как указывалось ранее, уровень фона сопутствующих излучений в этом зале крайне низок, что позволяет людям находиться здесь неограниченное время.

Имеющаяся система коллиматоров и защита построены так, что позволяют широко использовать принцип параллельной (одновременной) работы групп экспериментальных установок с несколькими пучками одинаковых или разных частиц. Так, в течение длительного времени проводятся эксперименты

В связи с последним укажем, что на шестиметровом синхроциклотроне осуществлена «манипуляция» ускоряющего напряжения [1], позволяющая прерывать генерацию высокочастотных колебаний в нужный момент времени и, таким образом, выпускать частицы из ускорителя лишь в ограниченные промежутки времени, когда камеры подготовлены для регистрации частиц.

Наконец, для того чтобы при работе с камерами Вильсона или диффузионными камерами повысить интенсивность π -мезонов в импульсе,

а это важно, когда проводятся опыты с π -мезонами максимальных энергий, число которых мало, на ускорителе применяется так называемый «накопительный режим» [17]. Последний состоит в том, что в течение нескольких циклов ускорения (трех-четырех) протоны ускоряются только до радиуса 160—180 см (энергия частиц составляет около 240—300 Мэв), а затем в четвертом или пятом цикле ускоряющее напряжение подается на дуант во всем диапазоне частот 25—14 мГц, в результате чего протоны ускоряются до предельного радиуса 278 см, на котором располагается мишень. Таким путем удается повысить интенсивность пучка π -мезонов в импульсе примерно в три раза и тем самым увеличить эффективность работы измерительных камер.

Заключение

Вывод из камеры синхроциклотрона большого числа пучков частиц высоких энергий создал возможности для проведения исследовательских работ широким фронтом.

Одновременное проведение экспериментов на нескольких установках, применение многоканальных систем и дистанционного управления приборами, находящимися в зоне повышенной биологической опасности, позволили существенно повысить коэффициент использования ускорителя и сократить непроизводительные затраты его рабочего времени. Последние составляют не более 7—8% и определяются в основном временем, необходимым для осмотра оборудования экспериментальных установок и синхроциклотрона.

Поступила в редакцию 17 V 1956 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. В. Ефремов, М. Г. Мещеряков, А. Л. Минц, В. П. Джелепов, П. П. Иванов, В. С. Катышев, Е. Г. Комар, И. Ф. Малышев, Н. А. Моносзон, И. Х. Невяжский, Б. И. Поляков, А. В. Честной. Шестиметровый синхроциклотрон Института ядерных проблем АН СССР (Доклад на Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий, Москва, 1956).
2. В. Н. Мехедов, М. М. Комочков, К. О. Оганесян, А. М. Розанова, Отчет ИЯП АН СССР, 1954 г.
3. J. L. Tuck, L. C. Teng, Phys. Rev. 81, 305 A (1951).
4. В. П. Дмитриевский, В. И. Данилов, Ю. Н. Денисов, Н. Л. Заплатин, В. С. Катышев, А. А. Кропич, А. В. Честной, Отчет ИЯП АН СССР, январь 1955 г.
5. A. V. Grewe, J. W. G. Gregory, Proc. Roy. Soc. Ser. A, 232, 242 (1955).
6. В. П. Дмитриевский, Диссертация, ИЯП АН СССР, 1953 г.
7. В. И. Данилов, В. П. Дмитриевский, А. В. Честной, Отчет ИЯП АН СССР, 1954 г.
8. В. П. Зрелов, Отчет ИЯП АН СССР, 1955 г.
9. М. Г. Мещеряков, Б. С. Неганов, В. П. Зрелов, И. К. Взорев, А. Ф. Шабудин, ЖЭТФ (в печати).
10. В. П. Джелепов, Ю. М. Казаринов, Ю. Н. Симонов, Отчет ИЯП АН СССР, 1955 г.
11. В. Б. Флягин, В. С. Киселев, Отчет ИЯП АН СССР, 1955 г.
12. Ю. Д. Баюков, М. С. Козодаев, А. А. Тяпкин, Отчет ИЯП АН СССР, 1955 г.
13. М. Г. Мещеряков, Г. Д. Столетов, С. Б. Нурушев, Отчет ИЯП АН СССР, 1955 г.
14. А. Е. Игнатенко, В. В. Кривичкий, А. И. Мухин, Б. Понтекоров, А. А. Реут, Отчет ИЯП АН СССР, 1954 г.
15. В. П. Джелепов, В. Г. Иванов, М. С. Козодаев, В. Т. Осипенков, Н. И. Петров, В. А. Русаков, Отчет ИЯП АН СССР, 1955 г.
16. J. J. Thomson, Phil. Mag. 6, 13, 561 (1907).
17. Т. Н. Томилина, М. Ф. Шульга, Отчет ИЯП АН СССР, 1956 г.