

18 849
К-14



Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, К.П. Мызников,
А.П. Царенков

P-849

МЕТОДЫ ИЗМЕНЕНИЯ
ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПУЧКА С МИШЕНЬЮ
В СИНХРОФАЗОТРОНЕ НА 10 БЭВ

ЖТЭ, 1962, N5, с19-24.

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

P-849

Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, К.П. Мызников,
А.П. Царенков

1298/4 48.

МЕТОДЫ ИЗМЕНЕНИЯ
ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПУЧКА С МИШЕНЬЮ
В СИНХРОФАЗОТРОНЕ НА 10 БЭВ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

А н н о т а ц и я

Описаны методы изменения времени взаимодействия пучка с мишенью, применяемые на синхрофазотроне Объединенного института ядерных исследований. Дано описание режимов, позволяющих работать в одном цикле ускорения нескольким экспериментаторам.

Abstract

The methods of changing the time of the beam interaction with the target are given. These methods are used at the Joint Institute for Nuclear Research synchrotron. The regimes which allow several experimental physicists to work in the same acceleration cycle are described.

Широкий фронт физических экспериментов, проводимых на синхрофазотроне Объединенного института ядерных исследований, потребовал осуществления сложных режимов вывода пучков вторичных частиц из ускорителя. В частности, потребовалось создание различных по длительности импульсов вторичных частиц. Импульсы вторичных частиц образуются при бомбардировке ускоренными протонами мишеней, расположенных внутри камеры ускорителя. Время соударения пучка с мишенью определяет длительность импульса вторичных частиц. Наиболее простым способом вывода протонов на мишень является "естественное" сворачивание пучка после прекращения ускорения в изменяющемся магнитном поле. Длительность импульса вторичных частиц, образующихся при "естественном" выводе, составляет 4,5 мсек. Однако для проведения многих физических экспериментов такая длительность является неудовлетворительной. Так, для получения качественных фотографий на пузырьковых камерах требуется иметь импульсы вторичных частиц длительностью ~ 1 мсек и менее; при работе со счетчиками, из-за наличия у аппаратуры мертвого времени, при больших интенсивностях выведенных пучков длительность импульса требуется увеличить до 300 мсек. Авторами исследованы и практически осуществлены методы медленного и быстрого вывода ускоренного пучка на мишень, а также комбинированные режимы, позволяющие работать в одном цикле ускорения нескольким экспериментаторам, применяющим различную методику исследования. Ниже дается описание некоторых из этих методов, нашедших применение на синхрофазотроне Объединенного института ядерных исследований.

1. Методы увеличения времени взаимодействия ускоренного пучка с мишенью.

Резонансная раскачка фазовых колебаний.

Известно, что амплитудная или частотная модуляция ускоряющего напряжения с частотой, близкой к частоте фазовых колебаний, приводит к резонансной раскачке этих колебаний. Указанное обстоятельство было использовано для увеличения времени соударения ускоренного пучка с мишенью.

Резонанс возбуждался искусственно путем введения в частоту ускоряющего напряжения периодического возмущения с частотой фазовых колебаний. Поскольку в синхрофазотроне частота фазовых колебаний изменяется в течение цикла ускорения от 2000 гц до 800 гц, частота возмущения выбиралась в зависимости от того, в какой момент цикла ускорения требовалось произвести вывод ускоренного пучка на мишень. Величина возмущения выбиралась такой, чтобы увеличение амплитуды фазовых колебаний привело к выходу частиц из области фазовой устойчивости. Выпавшие из ускорения частицы сворачивались в изменяющемся магнитном поле на мишень. Длительность соударения ускоренного пучка с мишенью определялась амплитудой возмущения. Этим методом удалось увеличить длительность пучков вторичных частиц до 250 мсек. Недостаток метода состоит в том, что ввиду слабого изменения частоты фазовых колебаний в конце ускорения неустойчивость частоты возмущения приводит к большим колебаниям момента начала выпадения частиц из синхронизма.

..... Медленное уменьшение амплитуды ускоряющего напряжения

Этот метод также основан на принудительном выводе ускоряемых частиц из синхронизма за счет уменьшения области фазовой устойчивости. Сокращение размеров сепаратриссы производилось путем медленного уменьшения амплитуды ускоряющего напряжения V_0 . Поскольку к концу ускорения частицы занимают только часть области устойчивости, выход из синхронизма начинался при уменьшении V_0 до определенного значения. В зависимости от начальной амплитуды радиально-фазовых колебаний каждой частице соответствовал свой момент выхода из ускорения. Выпавшие частицы не получали в среднем энергии от электрического поля и сворачивались на мишень. Длительность попадания частиц на мишень определялась скоростью изменения V_0 . Практически она ограничивалась только приемлемым для проводимого эксперимента разбросом протонов по импульсам.

В работе^{/1/} вычислен закон изменения V_0 , обеспечивающий равномерное попадание пучка на мишень для случая распределения частиц по амплитудам радиально-фазовых колебаний по некоторому приближенному зако-

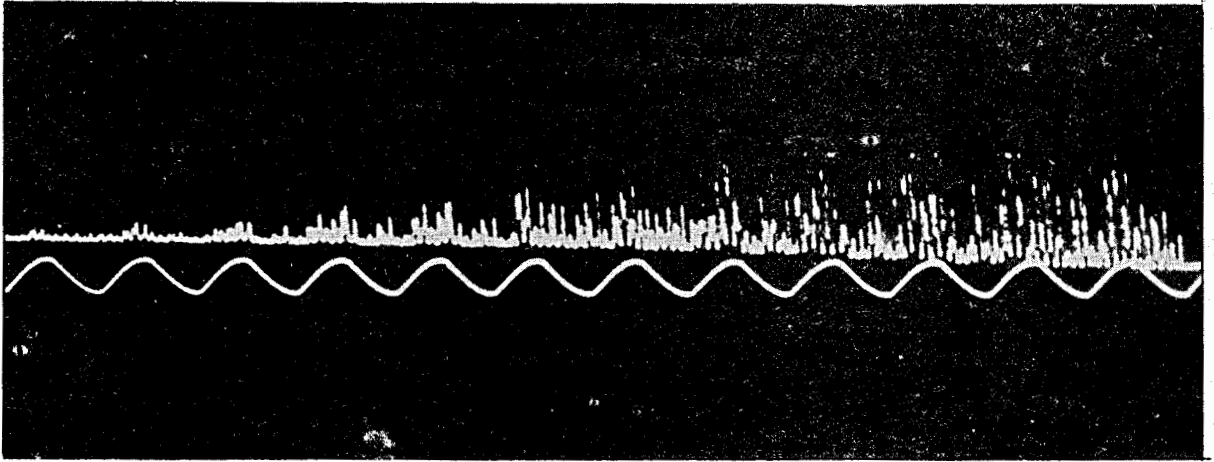
ну. Фактически функция распределения по радиально-фазовым колебаниям является более сложной и может изменяться в зависимости от условий захвата в процесс ускорения, распределения по амплитудам свободных колебаний в бетатронном режиме и т.п. Поэтому закон изменения V_0 подбирался экспериментально, с учетом требования равномерного попадания частиц на мишень.

.....
 Медленное изменение частоты ускоряющего напряжения

Ускоренный пучок в синхрофазотроне удерживается на постоянном радиусе R_0 за счет точного выполнения закона, связывающего изменение частоты ускоряющего напряжения f_0 с изменением магнитного поля. При изменении частоты на величину Δf_0 радиус равновесной орбиты изменяется на величину ΔR_0 . Связь между ними выражается уравнением ^{/2/}:

$$\frac{\Delta R_0}{R_0} = - \frac{\Delta f_0}{f_0} \frac{1}{n + \beta^2(1-n)} \frac{-L}{2\pi R_0 + L}, \quad /1/$$

где n - показатель спада магнитного поля, β - отношение скорости протона к скорости света, L - суммарная длина прямолинейных промежутков. Адиабатическое изменение частоты приводит к медленному смещению ускоренного пучка на мишень без потери устойчивости. Как следует из формулы /1/, скорость смещения пучка на мишень пропорциональна скорости изменения f_0 . Этот метод нашел широкое применение для получения длительных пучков вторичных частиц. Изменение f_0 осуществлялось путем введения в функциональный преобразователь системы связи частоты ускоряющего напряжения с магнитным полем ^{/3/} импульса напряжения. Требуемый закон изменения f_0 задавался формой импульса напряжения. На рис. 1 показана осциллограмма импульса вторичных частиц, полученная при линейном изменении f_0 со скоростью ~ 20 кгц/сек. Видно, что попадание частиц на мишень происходит неравномерно во времени. Неравномерность легко объяснить, если учесть, что распределение по амплитудам свободных радиальных колебаний представляет собой функцию, близкую к релеевской ^{/4/}. Начало импульса соответствует попаданию на мишень частиц с большими



Р и с. 1.

Оциллограмма импульса вторичных частиц, полученного при линейном изменении частоты ускоряющего напряжения. На нижнем луче - калибровочный сигнал с частотой 50 гц.

амплитудами радиальных колебаний, число которых минимально. Чтобы сделать попадание частиц на мишень более равномерным, изменение f_0 производилось по экспоненциальному закону. Полученное при этом улучшение равномерности иллюстрируется рис. 2. Длительность импульсов частиц, получаемых этим методом, ограничивается только допустимым разбросом по энергии. Недостаток метода состоит в том, что при медленном подводе пучка к мишени нестабильность закона связи f_0 с магнитным полем приводит к колебаниям момента начала попадания пучка на мишень. Это колебания могут быть значительно уменьшены при быстром подводе пучка к мишени с последующим медленным смещением на мишень, что достигается соответствующим подбором закона изменения f_0 .

Более совершенным способом, позволяющим исключить влияние указанной нестабильности, является корректировка закона связи с магнитным полем при изменении радиального положения пучка с помощью обратной связи. Датчиком радиального положения служат две вертикальные пластины индукционных электродов^{/5/}. Сигнал от каждой пластины поступает на вход дифференциального каскада, на выходе которого при смещении пучка

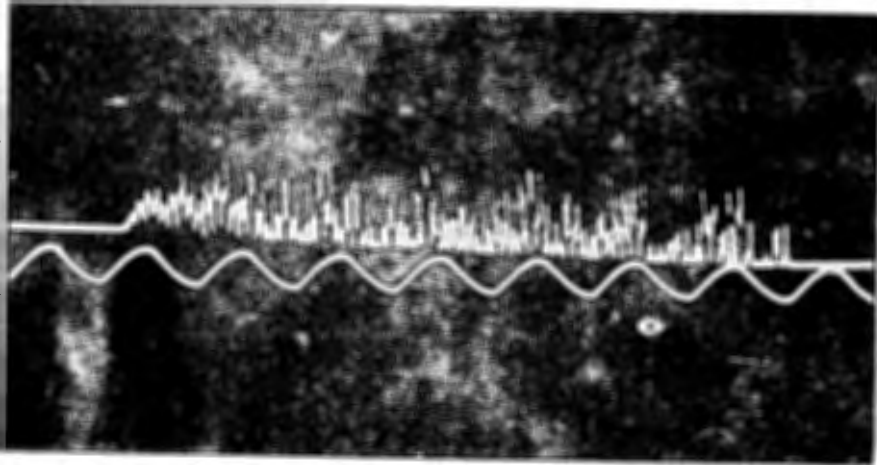


Рис. 2.

Осциллограмма импульса вторичных частиц, полученного при экспоненциальном изменении частоты ускоряющего напряжения. На нижнем луче-калибровочный сигнал с частотой 50 гц.

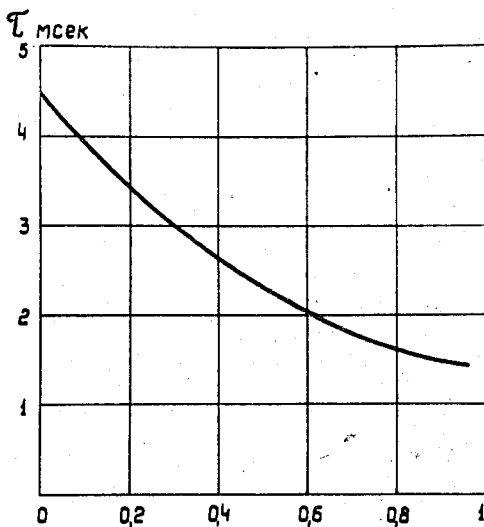
по радиусу на величину ΔR возникает напряжение $\Delta U = a \Delta R$. Коэффициент пропорциональности a определяется чувствительностью датчика радиального положения. Разностный сигнал после усиления подается в функциональный преобразователь и управляет изменением частоты f_0 . Коэффициенты усиления плеч дифференциального каскада подобраны таким образом, чтобы при положении пучка в центре вакуумной камеры разностный сигнал равнялся нулю. Смещение пучка на мишень производилось путем изменения коэффициента усиления одного из плеч по определенному закону, который определял закон изменения f_0 . Практически этот закон выбирался таким, чтобы попадание частиц на мишень происходило равномерно во времени.

2. Методы уменьшения времени взаимодействия ускоренного пучка с мишенью

..... Уменьшение радиальных размеров пучка во время ускорения

Длительность импульса частиц при "естественном" сворачивании пучка на мишень определяется радиальными размерами пучка и скоростью сворачивания мгновенных равновесных орбит. Наиболее простым методом сокращения длительности является искусственное уменьшение радиальных размеров /"обдирка"/ сгустка в процессе ускорения. "Обдирка" осуществлялась наведением пучка на одну из расположенных в камере мишеней методом медленного изменения частоты ускоряющего напряжения, который был описан выше. По мере смещения пучка на мишень из ускорения выбывали частицы с большими радиальными колебаниями. Когда интенсивность оставшихся в ускорении частиц достигала заданного уровня, манипуляция f_0 выключалась, "обдранный" пучок возвращался к центру камеры и ускорялся до конечной энергии. После выключения ускоряющего напряжения "обдранный" пучок, так же, как при "естественном" выводе, сворачивался в изменяющемся магнитном поле на мишень. На рис 3 показано как изменяется длительность импульса в зависимости от доли частиц, потерянных при "обдирке". Видно, что при "обдирке" частиц с большими радиальными

колебаниями длительность импульса резко сокращается. Когда радиальный размер пучка становится мал, большая потеря интенсивности приводит лишь к небольшому уменьшению длительности импульса. Этот результат согласуется с характером функции распределения по амплитудам свободных колебаний, полученной в работе ^{14/}. Из рис. 3 следует, что для уменьшения



Р и с. 3.

Зависимость длительности импульса вторичных частиц от доли интенсивности ускоренного пучка, потерянной при "обдирке".

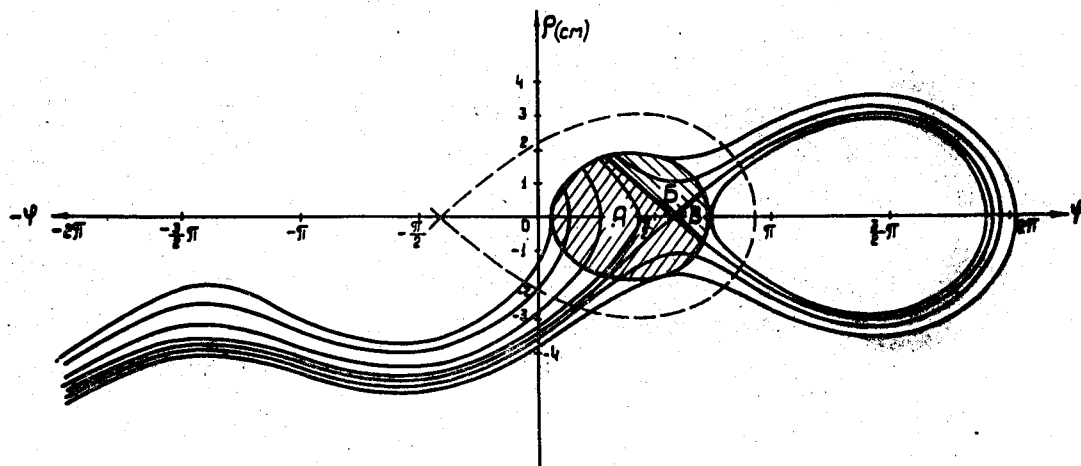
длительности импульса до 1,5 мсек интенсивность ускоренного пучка должна быть уменьшена в 15 - 20 раз. Поэтому описанный метод пригоден только в тех случаях, когда требуется получить короткий импульс вторичных частиц с малой интенсивностью. Чтобы при этом более эффективно использовался ускоренный пучок, длительный импульс вторичных частиц, образованный при "обдирке" сгустка о мишень, использовался для экспериментов со счетчиками.

Мгновенное изменение фазы ускоряющего напряжения

Этим методом сокращение времени соударения пучка с мишенью достигается за счет увеличения скорости сворачивания мгновенных равновесных орбит. Известно, что смещение мгновенной орбиты по радиусу за один оборот частицы определяется соотношением:

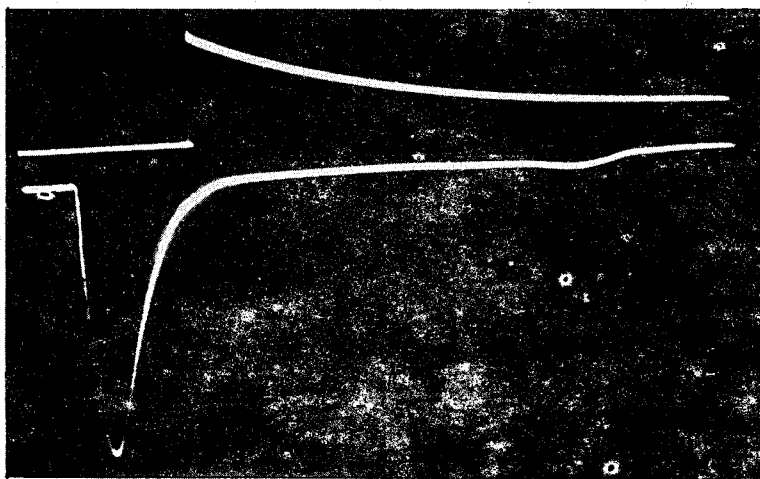
$$\Delta R = \frac{R}{1-n} \left(\frac{\Delta P}{P} - \frac{\Delta H}{H} \right), \quad /2/$$

где R - радиус мгновенной равновесной орбиты, P - импульс частицы, H - напряженность магнитного поля, ΔP и ΔH , соответственно, приращения импульса частицы и напряженности магнитного поля за время одного оборота частицы, n - показатель магнитного поля. Как видно из формулы /2/, при торможении частицы в растущем магнитном поле / или при ускорении в спадающем поле / скорость сворачивания ее мгновенной орбиты возрастает по сравнению с "естественным" выводом. Это обстоятельство использовалось для уменьшения времени соударения пучка с мишенью. Практически торможение частиц производилось путем мгновенного изменения фазы ускоряющего напряжения в момент времени, предшествующий выводу пучка на мишень. Переходный процесс изменения фазы составлял около 100 мксек, что составляло незначительную часть периода фазовых колебаний. Рис. 4 иллюстрирует картину радиально-фазового движения частиц при мгновенном изменении фазы на 180° . Здесь пунктирной кривой очерчена область фазовой устойчивости до изменения фазы; заштрихованная часть ее соответствует области, занятой пучком. После изменения фазы на 180° частицы, в зависимости от начальных условий по отношению к новой области устойчивости, будут двигаться по различным фазовым траекториям. Частицы, расположенные в области А, будут интенсивно тормозиться и за время, меньшее половины периода фазовых колебаний, свернутся внутрь на 3 - 4 см. Частицы группы Б достигнут этого радиуса лишь спустя время порядка периода фазовых колебаний, что приводит к затяжке времени соударения пучка с мишенью. Поскольку равновесная фаза ϕ_0 равна к концу ускорения $\sim 75^\circ$, а



Р и с. 4.

Радиально-фазовые траектории частиц при мгновенном изменении фазы ускоряющего напряжения на 180° для значений величин $\cos \phi_0 = 0,27$; $V_0 = 8$ кв. $n = 0,67$.



Р и с. 5.

Осциллограмма импульса вторичных частиц, полученного методом мгновенного изменения фазы ускоряющего напряжения на 180° . На верхнем луче отмечен момент прекращения ускорения. Маленький импульс частиц, после прекращения ускорения, соответствует частицам, оставшимся в области фазовой устойчивости после изменения фазы. Скорость развертки 0,5 мсек/см.

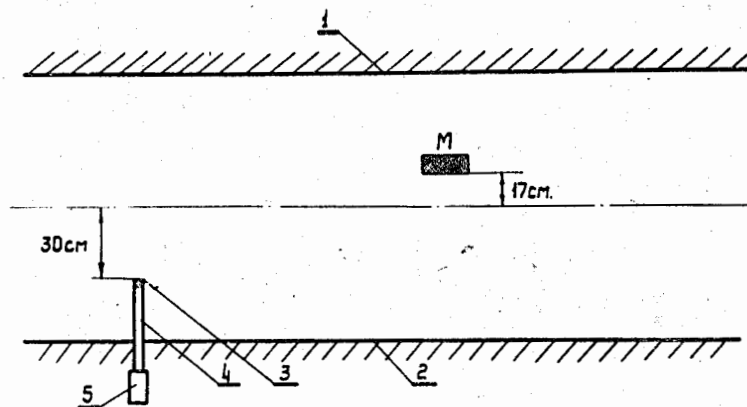
азимутальный размер пучка занимает около 120° , часть пучка /группа В/ при изменении фазы на 180° остается в области устойчивости. На рис. 5 показана осциллограмма импульса, полученного при изменении фазы на 180° . Чтобы уменьшить число частиц группы В до минимума и одновременно обеспечить условия наибольшего торможения для основной части пучка, изменение фазы ускоряющего напряжения варьировалось в пределах $200^\circ-220^\circ$. Оптимальное значение сдвига фазы подбиралось экспериментально по эффекту наибольшего сокращения длительности импульса вторичных частиц.

Из рис. 4 следует, что с точки зрения максимального сокращения времени соударения с мишенью, наиболее выгодное расстояние от мишени до центра пучка в момент изменения фазы составляет 4 - 5 см. Однако максимальная амплитуда свободных колебаний в конце ускорения равна $7 \text{ см}^{1/4}$, поэтому приблизить пучок к мишени можно только в том случае, если предварительно "ободрать" частицы с большими амплитудами радиальных колебаний методом, описанным выше. Такой прием применим не всегда, т.к. он связан с уменьшением интенсивности в укороченном импульсе. Более благоприятный результат получается, если одновременно с мгновенным изменением фазы произвести быстрое смещение пучка на мишень путем изменения f_0 . В этом случае 75% частиц, содержащихся в ускоренном пучке, было выведено на мишень за время 800 мсек.

Описанный метод нашел широкое применение при проведении экспериментов, в которых существенно иметь короткий импульс частиц большой интенсивности. В качестве недостатка метода следует отметить то обстоятельство, что при выводе пучка на наружную мишень мгновенное изменение фазы ускоряющего напряжения приходится производить при уменьшающемся во времени магнитном поле. Однако в момент инвертирования азимутальный размер пучка значительно увеличивается, и эффективного сокращения длительности импульса в этом случае получить не удалось.

Быстрое изменение частоты ускоряющего напряжения

Метод изменения f_0 был описан выше в связи с применением его для получения длительных пучков вторичных частиц. Этот же метод был использован для уменьшения времени соударения пучка с мишенью за счет увеличения скорости изменения f_0 . Сокращение времени соударения лимитируется критической скоростью изменения f_0 , при достижении которой смещение пучка на мишень сопровождается выпадением частиц из синхронизма. Величина критической скорости была определена экспериментально. Схема опыта показана на рис. 6. У наружного края рабочей области

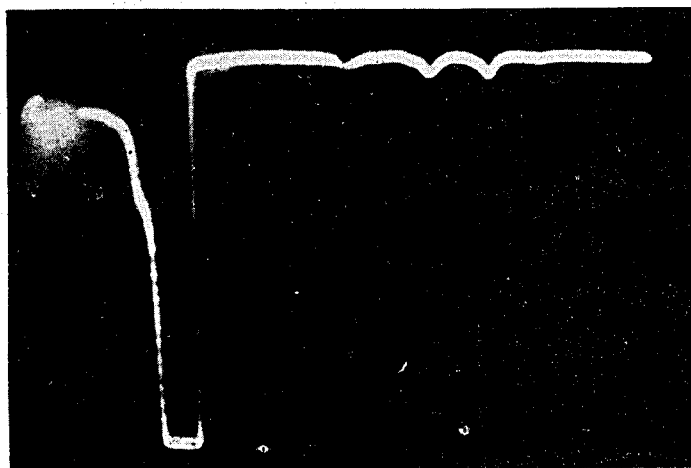


Р и с. 6.

Схема расположения устройств при определении критической скорости изменения частоты ускоряющего напряжения. 1- наружная стенка вакуумной камеры, 2-внутренняя стенка вакуумной камеры, 3- пластический сцинтиллятор, 4-световод, 5- фотоумножитель, М-мишень.

была расположена мишень М. Ускоренный пучок смещался с центральной орбиты на мишень М путем уменьшения частоты f_0 . У внутреннего края рабочей области был помещен "зонд", представляющий собой пластический сцинтиллятор, укрепленный на конце световода, противоположный конец которого находился в оптическом контакте с фотоумножителем. С помощью сцинтилляционного "зонда" регистрировалось попадание пучка на

мишень M . Скорость смещения пучка постепенно увеличивалась за счет увеличения скорости изменения f_0 . Значение критической скорости определялось по появлению сигнала, свидетельствующего о попадании на сцинтилляционный "зонд" частиц, выпавших из синхронизма и свернувших-ся к внутреннему краю рабочей области. На рис. 7 приведена осциллограмма сигнала от "зонда", соответствующая критической скорости изменения f_0 . Первый импульс соответствует попаданию частиц на мишень M ,



Р и с. 7.

Осциллограмма сигнала от сцинтилляционного "зонда", полученная при критической скорости изменения частоты ускоряющего напряжения. В начале развертки виден импульс, соответствующий попаданию пучка на мишень M , второй импульс обусловлен частицами, выпавшими из ускорения.

второй обусловлен частицами, выпавшими из ускорения. Определенная таким образом величина критической скорости изменения f_0 оказалась равной $f_0 = 1$ мгц/сек.

При критической скорости смещения пучка время соударения частиц с мишенью составляет около 3,5 мсек. Превышение критической скорости связано с уменьшением интенсивности протонов, попадающих на мишень. Однако, если при смещении пучка со скоростью, большей критической, на

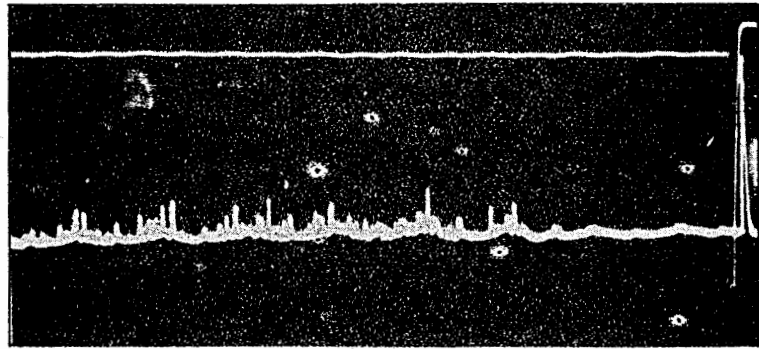
наружную мишень потеря интенсивности является неизбежной, при смещении на внутреннюю мишень существенной потери интенсивности не происходит, так как частицы, выпавшие из ускорения, попадают на ту же мишень. Опыт показал, что при скорости 4 мгц/сек 90% ускоренного пучка может быть смещено на внутреннюю мишень за 700 мксек. Время соударения с наружной мишенью было также уменьшено до 2 мсек за счет увеличения скорости изменения f_0 до 1,8 мгц/сек. В этом случае на мишень попадает 70%, что во многих случаях является вполне приемлемым.

Преимущество рассмотренного метода по сравнению с описанными выше заключается в том, что он позволяет уменьшить время попадания пучка как на внутреннюю мишень, так и на наружную без значительной потери интенсивности ускоренных частиц.

3. Комбинированные методы

С увеличением интенсивности ускоренных частиц и вводом в действие быстродействующих роторных мишеней^{16/} возникла возможность распределения пучка между различными экспериментаторами в течение одного цикла ускорения. В зависимости от условий экспериментов, расположения мишеней в камере ускорителя и т.п., эта задача решалась по-разному. Здесь мы остановимся на нескольких типовых случаях. Исследования на синхрофазотроне ведутся, в основном, с использованием пузырьковых камер, камер Вильсона и счетчиков. Как правило, для работы с камерами не требуется большой интенсивности вторичных частиц. Поэтому чаще всего приходится совмещать либо работу нескольких камер в одном цикле ускорения, либо работу одной камеры и счетчиков. Первая задача решалась путем наведения пучка на рабочие мишени методом быстрого изменения f_0 . В нужный момент цикла ускорения роторная мишень, которая работала на ту или иную камеру, ставилась в рабочее положение и включалась манипуляция f_0 . Ускоренный пучок без потери фазовой устойчивости смещался на мишень. После того, как часть пучка была "ободрана", он отводился от мишени и продолжал ускоряться. Эту операцию в течение

цикла ускорения можно было повторять многократно. Если требовалось в конце ускорения получить импульс частиц, длительностью меньше 1 мсек, одновременно с уменьшением f_0 производилось мгновенное изменение фазы. При необходимости совместить работу счетчиков и камеры ускоренный пучок медленно "обдирался" о мишень, работающую на счетчики. Оставшийся ступок ускорялся до нужной энергии и сбрасывался на мишень, которая работала на камеру. На рис. 8 представлена осциллограмма



Р и с. 8.

Осциллограмма длительного импульса вторичных частиц, поступающих в канал сцинтилляционных счетчиков, и короткого импульса частиц, поступающих в пузырьковую камеру /нижний луч/. На верхнем луче отмечен момент выключения ускоряющего напряжения.

ма, иллюстрирующая получение длительного и короткого импульсов этим способом.

Приведенными примерами не исчерпывается разнообразие возможных вариантов распределения ускоренного пучка между экспериментаторами. Часто бывает необходимо изменять порядок распределения пучка в различных циклах ускорения. Это производится с помощью программирующих устройств, задающих закон изменения частоты, амплитуды и фазы в.ч. напряжения на ускоряющих электродах и управляющих последовательностью введения мишеней в рабочую область ускорителя.

Л и т е р а т у р а

1. В.И. Котов, Л.Л. Сабсович. ПТЭ, 1957, № 6,19.
2. М.С. Рабинович. Труды ФИАН СССР, 1958, X, 23.
3. А.Л. Минц и др. "Радиотехника и электроника" 1956, 1,910.
4. А.Б. Кузнецов, К.П. Мызников. Препринт ОИЯИ Р-787, 1961 г. Дубна.
5. Ф.А. Водопьянов, А.А. Кузьмин, С.М. Рубчинский, В.А. Уваров
Proceedings of the Intern. Conf. of High Energy Acceler. and Instr. CERN, Geneva, 1959, p. 470-477
6. И.Б. Иссинский, К.П. Мызников. Препринт ОИЯИ Р-484, 1960, Дубна.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 декабря 1961 года.