

С 3450

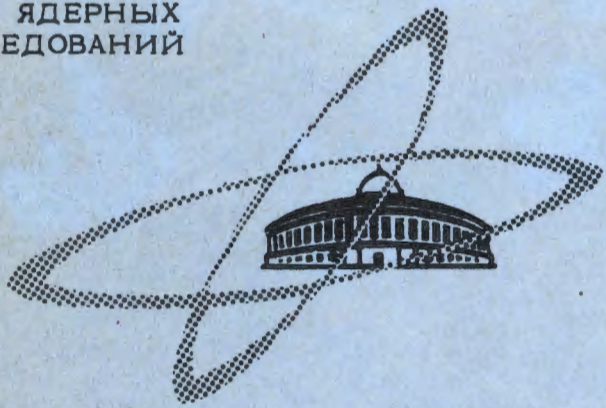
М-925

23/III - 67

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Р9 - 3165



ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

С.В. Мухин, В.А. Попов, С.В. Рихвицкий,
И.Н. Семенюшкин

ИСПЫТАНИЕ ОТКЛОНЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА ЧАСТИЦ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1967.

P9 - 3165

4849/1, чр.

С.В. Мухин, В.А. Попов, С.В. Рихвицкий,
И.Н. Семенюшкин

ИСПЫТАНИЕ ОТКЛОНЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА ЧАСТИЦ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Направлено в ПТЭ

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
БИБЛИОТЕКА

В процессе наладки систем электродинамического сепаратора частиц ^{/1,2,3/} высоких энергий были исследованы и определены их основные параметры, а также надежность и стабильность работы этих устройств. Ниже сообщаются результаты испытаний отклоняющего устройства ^{/4/} на пучке π -мезонов с импульсом 4,85 Гэв/с.

1. Конструкция отклоняющего устройства

Отклоняющее устройство электродинамического сепаратора выполнено в виде системы из шестнадцати независимо фазуемых резонаторов, работающих на частоте 150 Мгц. Отклонение частиц достигается за счет воздействия на них поперечного высокочастотного (в/ч) электрического поля при прохождении резонаторов.

На рис. 1 представлена блок-схема отклоняющего устройства. Источником питания системы служит пятикаскадный генератор на 150 Мгц, работающий от задающего умножителя, стабилизированного кварцевым резонатором. Выдаваемая двумя последними параллельными каскадами мощность суммируется на мосте сложения и затем фидерной системой, построенной по принципу "дерево", вводится в каждый резонатор. Источником импульсного анодного напряжения служит модулятор, выполненный в виде искусственной линии с разрядными тиратронами и зарядным выпрямительным устройством. В/ч генератор при длительности импульса 4-5 мсек и частоте повторения 0,1 гц развивает мощность до 1,5 Мвт. Мощность, выдаваемая генератором, может регулироваться в пределах 0,7-1,5 Мвт.

Конструкция одного из используемых в отклоняющем устройстве резонаторов приведена на рис. 2. Как видно из рис. 2, выбранная конструкция квазиторoidalного резонатора обеспечивает прохождение сепарируемого пучка преимуще-

ственно в области, где сосредоточено поперечное в/ч электрическое поле. Тип колебаний в резонаторе E_{010} . Добротность резонатора $Q = 18000$, шунтовое сопротивление $R_{ш} \approx 0,8$ Мом.

На рис. 3 схематически показано расположение резонаторов. Все резонаторы размещаются в трехсекционном баке, внутри которого поддерживается вакуум порядка $2 \cdot 10^{-6}$ тор. Высоковакуумный объем, в котором размещаются резонаторы, отделен от ионопровода канала майларовой пленкой толщиной 20 мк.

Настройка каждого резонатора на заданную частоту осуществлялась с помощью двух систем: грубой и точной настройки. Диапазон перекрытия частот с помощью грубой настройки составляет 1,5 Мгц, а диапазон точной подстройки частоты - 150 кгц.

Каждый резонатор настраивался на заданную частоту с точностью не хуже $\pm 0,5$ кгц.

Для обеспечения устойчивой длительной работы отклоняющего устройства использовалась система термостабилизации частоты резонаторов, поскольку измеренный температурный уход частоты резонаторов равен $2,5$ кгц/ $^{\circ}\text{C}$. Эта система состоит из терморегуляторов, с помощью которых температура воды, циркулирующей по внешним стенкам резонаторов, поддерживалась с точностью $0,02^{\circ}\text{C}$.

Заданная разность фаз между резонаторами устанавливалась изменением длины фидера. При этом один из резонаторов являлся опорным, по отношению к нему выставлялись фазы всех остальных резонаторов. Точность установки фазы каждого резонатора была не хуже $5-7^{\circ}$.

2. Расчет отклонения частиц

Действие отклоняющей системы из n резонаторов на пучок заряженных частиц можно рассмотреть следующим образом. Пусть длина электрической дорожки каждого резонатора равна l и расстояние между центрами соседних резонаторов (рис. 3) равно L . Тогда, если фаза электрического поля в каждом последующем резонаторе будет сдвинута относительно предыдущего на величину, равную

$$-\Delta\phi = \pi \left(1 + \frac{2L}{\lambda\beta} \right), \quad (1)$$

где λ - длина волны, на которую настроены резонаторы; β - скорость движения частиц в единицах скорости света, то тем самым будут обеспечены одинаковые условия движения заряженных частиц в каждом резонаторе.

Уравнение движения частицы в резонаторе в предположении, что электрическое поле ограничено областью протяженностью l и однородно по нему, а действием магнитного поля можно пренебречь, можно записать следующим образом:

$$m\ddot{x} = eE \sin(\omega t + \phi), \quad (2)$$

где E - напряженность электрического поля, ϕ - фаза электрического поля, соответствующая моменту влета в него частицы, ω - круговая частота, m - масса частицы.

Соответственно величины \dot{x} и x на выходе резонатора будут равны

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{eE}{m\omega} \left\{ \cos\left(\frac{\omega l}{\beta c} + \phi\right) - \cos\phi \right\} \\ x &= \frac{eE}{m\omega^2} \left\{ \sin\left(\frac{\omega l}{\beta c} + \phi\right) - \sin\phi - \frac{\omega l}{\beta c} \cos\phi \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

при начальных условиях $\dot{x} = x = 0$

Отклонение пучка заряженных частиц на некотором расстоянии от отклоняющего устройства можно представить как сумму отклонений, обусловленную действием каждого резонатора в отдельности, т.е.

$$X = \sum_{k=1}^{k=n} \dot{x}_k + \sum_{k=1}^{k=n} \left[\frac{L(n-k)+S}{\beta c} \right] x_k, \quad (4)$$

где S - расстояние от конца электрической дорожки резонатора до точки, где наблюдается отклонение.

После соответствующих преобразований выражение (4) можно привести к виду

$$X_{\phi} = M \cos\phi + N \sin\phi, \quad (5)$$

где

$$M = \frac{eE\lambda n}{2\pi\beta c} \left[l - \frac{\beta\lambda}{2\pi} \sin \frac{2\pi l}{\beta\lambda} + \left(\frac{n-1}{2} L + S \right) \left(1 - \cos \frac{2\pi l}{\beta\lambda} \right) \right]$$

$$N = \frac{eE\lambda n}{2\pi pc} \left[\frac{\beta\lambda}{2\pi} (1 - \cos \frac{2\pi\ell}{\beta\lambda}) + (\frac{n-1}{2}L + S) \sin \frac{2\pi\ell}{\beta\lambda} \right] \quad (6)$$

pc - импульс разделяемых частиц.

Максимальное отклонение, как это видно из выражения (5), равно

$$X_{\max} = (M^2 + N^2)^{1/2}, \quad (7)$$

и соответствующая этому отклонению начальная фаза ϕ должна быть равна

$$\phi = \arctg \frac{N}{M}. \quad (8)$$

Выражение (7) дает связь между максимальным отклонением пучка и параметрами отклоняющего устройства для случая, когда размерами пучка в плоскости разделения на расстоянии S от этого устройства можно пренебречь.

Относительно несложно учесть конечные размеры пучка, если предположить, что оно подчиняется распределению Гаусса вида:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\theta} e^{-\left(\frac{x}{\theta}\right)^2}, \quad (9)$$

где θ - среднеквадратичная полуширина изображения.

Тогда при работе отклоняющего устройства функцию распределения плотности пучка в плоскости разделения можно представить как

$$\Phi'(x) = \frac{(2\pi)^{-3/2}}{\theta} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\phi}{\theta}\right)^2} d\phi, \quad (10)$$

где $X_\phi = M \cos \phi + N \sin \phi$.

Численно интегрируя выражение (10) при заданных величинах M и N , можно получить ожидаемое распределение пучка.

3. Экспериментальные результаты

Измерения действия отклоняющего устройства проводились с помощью пучка π -мезонов, имеющих импульс 4,95 Гэв/с. Регистрирующая аппаратура

состояла из двух телескопов сцинтилляционных счетчиков, один из телескопов можно было дистанционно перемещать в плоскости разделения с заданным шагом. Размер сцинтиллятора этого телескопа в плоскости разделения 5 мм. Второй телескоп, имевший размеры сцинтилляторов $250 \times 150 \times 10$ мм³, служил для мониторингования интенсивности пучка. Оба телескопа были связаны схемой совпадения ($\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ сек). Измерения проводились следующим образом:

1) измерялось исходное распределение интенсивности пучка в плоскости разделения (горизонтальная плоскость) в месте, где должно было проверяться разделение пучка (на расстоянии 27 м от центра отклоняющего устройства). Результаты этих измерений приведены на рис. 4 (кривая 1). Полученное распределение близко к гауссовскому с $\theta = 0,52$ см.

2) с помощью блока задержки совмещалась по времени подача в/ч напряжения в отклоняющее устройство и прохождение через него частиц. При этом длительность пучка частиц, проходивших через отклоняющее устройство, по времени составляла 1,5 мсек, а время работы отклоняющего устройства 4 мсек. Далее проводилось измерение распределения интенсивности пучка в плоскости разделения. Эти измерения были проведены при двух уровнях мощности, вводимой в 16 резонаторов, $P_1 = 1,5$ мвт и $P_2 = 1,1$ мвт.

Сдвиг фаз $\Delta\phi$ между соседними резонаторами был установлен в соответствии с выражением (1) равным $\Delta\phi = 32^\circ \pm 5^\circ$ и поддерживался во времени с точностью несколько градусов. Постоянство вводимой в резонаторы мощности поддерживалось с точностью 2%.

Полученные экспериментальные результаты пронормированы и нанесены на теоретические кривые (2,3 рис. 4), полученные путем численного интегрирования выражения (10) на электронно-вычислительной машине для случаев, когда напряженность электрического поля в каждом резонаторе равна

$$E_1 = 22,4 \text{ кв/см,}$$

$$E_2 = 19,9 \text{ кв/см}$$

$n = 16$, $\lambda = 200$ см, $\ell = 50$ см, $L = 82$ см, $S = 1920$ см, $pc = 4,95$ Гэв и $\theta = 0,52$ см. Как видно из кривых, экспериментальные результаты и расчет находятся в хорошем согласии.

4. Заключение

Таким образом, при максимальной вводимой мощности в 16 резонаторов $P = 1,5$ Мвт напряженность электрического поля в каждом из них не ниже 22 кв/см, что обеспечивает максимальное отклонение сепарируемых частиц на $\pm 7,5$ см ($\pm 2,8$ мрад). Реальная напряженность электрического поля, по-видимому, несколько превышает полученную величину напряженности, так как при расчетах отклонения частиц не учитывалось компенсирующее действие магнитного поля и пространственное распределение электрического поля в резонаторе.

Экспериментами было также установлено, что при работе отклоняющего устройства, как и следовало ожидать, не происходит изменения пучка в вертикальной плоскости.

Авторы будут всегда помнить то внимание, которое оказывал этой работе покойный академик В.И. Векслер.

Авторы выражают глубокую благодарность главному инженеру ЛВЭ Н.И. Павлову, оказавшему большое содействие в создании отклоняющего устройства.

Авторы благодарны сотрудникам отделов главного энергетика, экспериментальных мастерских, отдела синхрофазотрона, принявшим участие в монтаже отклоняющего устройства, В.Н. Зубареву и П.И. Филиппову, внесшим значительный вклад в наладку отклоняющего устройства, а также сотрудникам, обслуживающим синхрофазотрон, и В.С. Балашовой, В.М. Вишняковой, Ю.Н. Карягину, В. Крюнову, А.Н. Манятовскому, В. Полякову, А.Н. Хренову, М.Н. Шкобиной, участвовавшим в проведении экспериментов.

Авторам приятно отметить высокое качество аппаратуры, которая была разработана и изготовлена под руководством В.Б. Залмансона, В.В. Екимова и И.Г. Уманского. /4/

Л и т е р а т у р а

1. В.И. Векслер. О запуске синхрофазотрона на 10 Гэв и первых результатах физических исследований. Труды Второй Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958). Доклады советских ученых. Ядерная физика, Атомиздат, Москва, 1958, стр. 253.
2. 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. Семенюшкин, В.Л. Степанюк, К.В. Чехлов. Труды Международной конференции по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1963.

3. В.Д. Володин, В.Н. Зубарев, С.В. Мухин, В.А. Попов, С.В. Рихвицкий, А.П. Саенко, И.Н. Семенюшкин, В.Л. Степанюк. Препринт ОИЯИ, 2913, Дубна, 1966.
4. М.С. Давыдов, Л.Г. Дорфман, В.Б. Залманзон, Г.А. Зейтленок, В.В. Екимов, В.М. Левин, И.Ф. Малышев, И.Г. Петелин, В.И. Петрунин, В.А. Попов, Н.Ф. Трушин, И.Г. Уманский, И.И. Финкельштейн. Труды Международной конференции по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 февраля 1967 г.

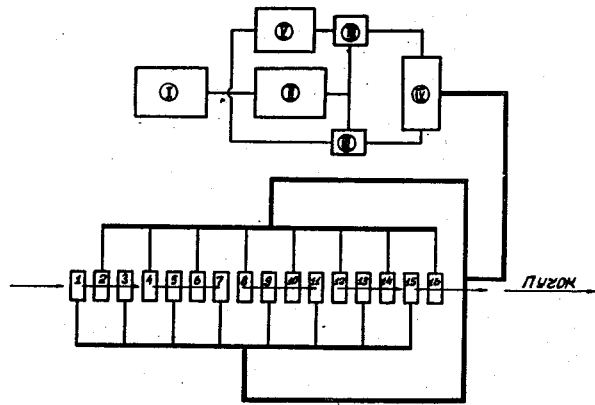


Рис. 1. Блок-схема отклоняющего устройства.
1, 2, ... 16 - резонаторы, I - задающий генератор,
II - усилитель, III - усилитель мощности, IV - мост
сложения мощности, V - модулятор.

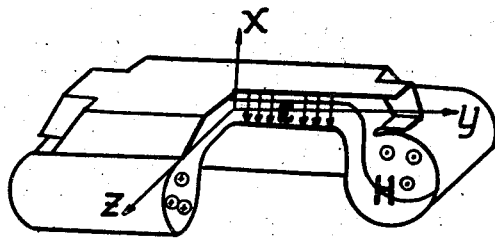


Рис. 2. Резонатор отклоняющего устройства.

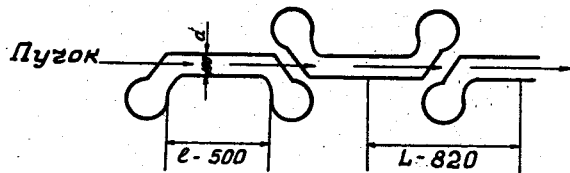


Рис. 3. Схема расположения резонаторов отклоняющего устройства.

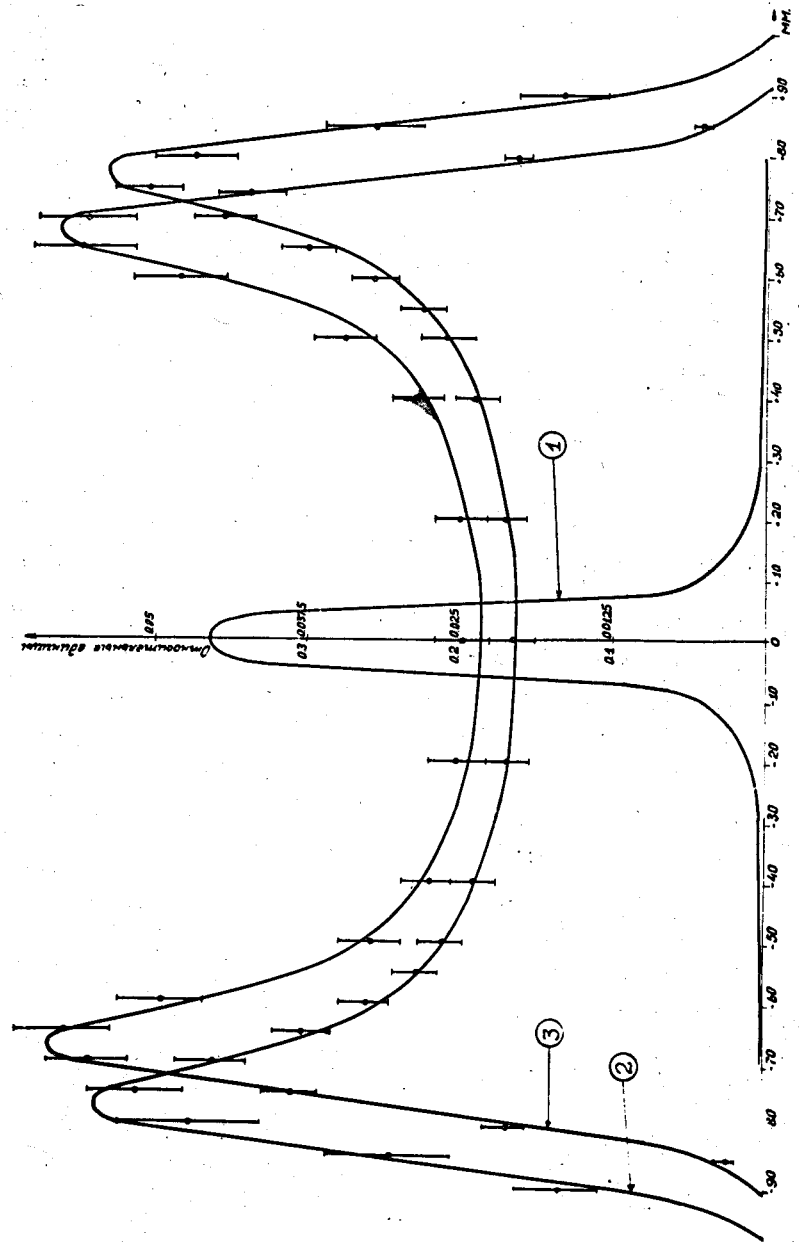


Рис. 4. Распределение π -мезонного пучка в горизонтальной плоскости на расстоянии 27 м от центра отклоняющего устройства. 1 - при выключенном отклоняющем устройстве; 2, 3 - при включенном отклоняющем устройстве и вводимой в него в/ч мощности 1,5 и 1,1 Мвт соответственно.