



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

Д.П. Василевская, А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов, В.П. Джелепов,
В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолдчиков, Н.Л. Заплатин,
В.В. Кольга, А.А. Кропин, М. Кузмяк, Л.Н. Онищенко,
В.С. Рыбалко, Л.А. Саркисян, Е. Швабе

P-930

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ
КОЛЬЦЕВОГО ФАЗОТРОНА
СО СПИРАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Иссл. Физмат., 1963, в 21, № 1, с 85-88 .

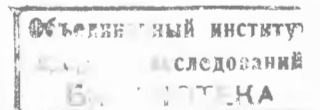
1408/3 чр.

Д.П. Василевская, А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов, В.П. Джелепов,
В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолотчиков, Н.Л. Заплатин,
В.В. Кольга, А.А. Кропнн, М. Кузмяк, Л.Н. Онищенко,
В.С. Рыбалко, Л.А. Саркисян, Е.Швабе

P-930

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ
КОЛЬЦЕВОГО ФАЗОТРОНА
СО СПИРАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Направлено в *Nuclear Instruments*.



Прогресс исследований в физике элементарных частиц определяется в большой степени возможностями ускорительных установок, служащих для получения первичного пучка заряженных частиц. В настоящее время исключительную важность приобретают исследования свойств новых частиц: гиперонов и тяжелых мезонов. Однако интенсивности пучков указанных частиц, получаемые на современных синхрофазотронах, зачастую оказываются недостаточными для детального изучения их свойств и взаимодействия с другими частицами и атомными ядрами. Это связано с относительно очень малой величиной тока ускоренных частиц в синхрофазотронах.

В связи с этим представляет большой интерес использование в ускорителях на энергии частиц до 10-20 Бэв постоянных магнитных полей и фазотронного метода ускорения. При этом за счет резкого увеличения скважности средний ток частиц может быть увеличен примерно на три порядка по сравнению с интенсивностью лучших действующих синхрофазотронов.

Ускоритель такого типа должен иметь магнит кольцевой формы, и при этом частицы всех импульсов размещаются в сравнительно узкой дорожке за счет резко растущего по радиусу постоянного во времени магнитного поля. Вертикальная фокусировка обеспечивается созданием периодической структуры магнитного поля, в зависимости от вида которой кольцевые фазотроны разделяются на несколько типов.

Впервые один из типов кольцевого фазотрона был предложен в работах^{/1,2/}, где для создания вертикальной устойчивости использовалось изменение направления магнитного поля в смежных секторах.

Однако, из-за большого увеличения радиуса кольцевого магнита (5-7 раз) по сравнению с радиусом кривизны в отдельном секторе, этот тип кольцевого фазотрона целесообразно использовать главным образом для ускорения электронов.

Для протонных кольцевых фазотронов с энергией ускоренных частиц до 10-20 Бэв выгоднее использовать метод создания вертикальной устойчивости, предложенный в работе^{/3/}. Величина ведущего магнитного поля периодически изменяется вдоль азимута и радиуса, причем фаза максимума периодических неоднородностей поля зависит от радиуса по определенному закону, образуя спиральные линии. Этот тип кольцевого фазотрона со спиральным полем имеет коэффициент увеличения радиуса кольцевого магнита 1,2-2 в зависимости от глубины вариации магнитного поля.

В настоящей работе рассматриваются теоретические и экспериментальные вопросы, связанные с созданием в Лаборатории ядерных проблем модели протонного кольцевого фазотрона такого типа для исследования процесса инжекции частиц в кольцевую систему со спиральной структурой магнитного поля, а также для нахождения оптимальных условий захвата частиц в синхронный режим ускорения.

Магнитное поле в медианной плоскости кольцевого фазотрона спирального типа имеет вид:

$$H_z = H_0(r/r_0)^{\bar{n}} \left\{ 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \epsilon_m \sin m \left[\frac{N}{tg \alpha} \ln(r/r_0) - N\phi \right] \right\}, \quad (1)$$

где r_0 - начальный радиус кольцевого магнита; H_0 - магнитное поле на начальном радиусе; \bar{n} - средний показатель магнитного поля; N - число спиралей; α - угол между спиралью и окружностью радиуса r ; ϵ - глубина вариации соответствующей гармоники магнитного поля.

В кольцевом фазотроне в принципе можно удовлетворить условию динамического подобия замкнутых орбит. При этом частоты свободных колебаний Q_r и Q_z постоянны в процессе ускорения и могут быть выбраны достаточно далеко от опасных резонансных значений. Для выполнения условия динамического подобия необходимо постоянство параметров \bar{n} и $\text{tg} \alpha$. Последнее условие определяет зависимость фазы максимума поля от радиуса в виде логарифмической спирали $r = r_0 e^{\text{tg} \alpha \phi}$.

Для приближенного вычисления частот свободных колебаний может быть использована гладкая аппроксимация

$$Q_r^2 = 1 + \bar{n}, \quad (2)$$

$$Q_z^2 = -\bar{n} + \frac{(\epsilon_1^2)}{\text{tg}^2 \alpha} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\epsilon_m}{\epsilon_1} \right)^2. \quad (3)$$

Спиральная структура магнитного поля характеризуется большим вкладом нелинейных добавок к квазиупругой силе, обеспечивающей устойчивость движения частиц. Эти нелинейности магнитного поля вызывают, кроме эффективных внутренних резонансов типа $Q \approx N/q$ (q - порядок нелинейного резонанса), нерезонансную зависимость частоты свободных колебаний от амплитуды. Расчеты показывают, что при углах спирали $\alpha < 10^\circ$ амплитуда колебаний порядка 3 см может вызвать изменение частоты, равное расстоянию между линейными резонансами. Для получения при относительно узкой дорожке необходимого значения Q_z приходится использовать секторную структуру кольцевого магнита, которая обеспечивает большую величину вариации вплоть до значений $\epsilon_1 > 1$.

Модель кольцевого фазотрона рассчитана на ускорение протонов от 1 Мэв до 10 Мэв. Такой диапазон энергий обеспечивает широкие возможности для исследования влияния кулоновского взаимодействия частиц в пучке на процессы инжекции и захвата в синхронный режим ускорения.

Общие параметры модели приведены в таблице 1.

Энергия инжекции	$W_i = 1$ Мэв
Конечная энергия	$W_k = 10$ Мэв
Радиус инжекции	$r_i = 240$ см
Ширина дорожки	$\Delta r = 12$ см
Магнитное поле на $r = r_i$	$H_i = 1200$ э
Магнитное поле на $r = r_k$	$H_k = 3680$ э
Показатель поля	$\bar{n} = 23$
Число спиралей	$N = 18$
Угол спирали	$\alpha = 13^\circ$

Глубина вариации N -ой гармоники

$$\epsilon_1 = 1,15$$

Частоты свободных колебаний

$$\begin{cases} \zeta_r = 4,9 \\ \zeta_z = 1,8 \end{cases}$$

Частоты ускоряющего напряжения при работе на 9-ой кратности

$$\begin{cases} f_i = 8,2 \text{ МГц} \\ f_k = 24,7 \text{ МГц} \end{cases}$$

Максимальный прирост энергии за оборот

$$eV_0 = 2,1 \text{ КэВ}$$

Частота циклов ускорения

$$F = 110 \text{ гц}$$

Длительность инжекции

$$\Delta t_i = 10 \text{ мксек}$$

Максимальное число частиц в импульсе

$$S_0 = 2 \cdot 10^{11}$$

При проектировании модели кольцевого фазотрона возникает ряд задач, связанных с созданием кольцевого электромагнита, состоящего из 18 отдельных секций сложной конфигурации.

Необходимый закон магнитного поля вдоль радиуса в каждой секции создается как профилированием зазора, так и использованием витков с током, распределенных по поверхности полюса. В то же время секции должны обеспечивать требуемый закон изменения фазы максимума поля и величину вариации. Точный расчет секции такой сложной формы затруднителен. В связи с этим на основе предварительного расчета магнитной цепи, с использованием закона полного тока были спроектированы и изготовлены две секции кольцевого магнита в натуральном масштабе. На рис. 1 показан общий вид секций вместе с приспособлением для измерения магнитного поля. Секции укреплены на общей раме и могут перемещаться друг относительно друга в трех направлениях. Магнитное поле в зазоре измерялось прибором, основанным на эффекте Холла, с точностью 0,5%. На этих секциях предполагается провести полное экспериментальное моделирование кольцевого электромагнита и внести необходимые коррективы в предварительный расчет.

Следующей проблемой, возникающей при создании кольцевого фазотрона, является получение пучка протонов с энергией в 1 МэВ, током в импульсе около 10 ма и относительно малым энергетическим разбросом. Для этой цели создается ускоритель-инжектор, представляющий собой одиночный тороидальный резонатор, вдоль оси которого движутся частицы, ускоряемые высокочастотным полем резонатора. Рабочая частота - 60 МГц. Мощность высокочастотного поля, необходимая для получения в зазоре 4 см напряжения в 1 МВ, составляет 1,5 Мвт в импульсе длиной около 30 мксек. Выбор одиночного резонатора в качестве инжектора был вызван необходимостью иметь возможно больший ток инжектируемого пучка для получения максимально возможного числа частиц на орбите фазотрона, а также для исследования влияния превышения инжектируемого заряда над предельным, захваченным на устойчивую орбиту. Для уменьшения энергетического разброса частиц до требуемой величины применяется предварительная фазовая группировка частиц с помощью группирователя, возбуждаемого синхронно с основным резонатором. Протоны инжектируются в резонатор из источника с полостным катодом, использующего разряд в продольном магнитном поле^{/4/}. На рис. 2 приведен общий вид резонатора-инжектора.

После захвата в синхронный режим ускорения частицы совершают синхротронные колебания, описываемые фазовым уравнением кольцевого фазотрона. При этом частота ускоряюще-

го поля в нерелятивистском случае при условии постоянства $\cos \phi_0$ должна увеличиваться приблизительно пропорционально скорости частицы. Для исследования областей фазовой устойчивости в модели кольцевого фазотрона предусмотрена возможность изменения синхронной фазы в процессе ускорения с различной скоростью и в любом направлении. Для этой цели создается генератор ускоряющего напряжения, амплитуда которого может изменяться в процессе ускорения по заранее заданному закону, соответствующему необходимому изменению синхронной фазы^{/5/}.

В заключение необходимо отметить, что создание модели кольцевого фазотрона позволит провести важные исследования, которые явятся основой для разработки нового типа сильноточных ускорителей.

Л и т е р а т у р а

1. А.А. Коломенский, В.А. Петухов, М.С. Рабинович. Сборник "Некоторые вопросы теории циклических ускорителей". М., изд-во АН СССР, 1955.
2. K.R. Symon. *Phys. Rev.*, 98, 1152 (1955).
3. D.W. Kerst, K.M. Terwilliger, K.R. Symon, L.W. Jones, *Bull. Amer. Phys. Soc.* 30, 1 (1955).
4. A.A. Clasov, M. Kuzmiak, *Jaderna energie, čísle 2* (1960).
5. А.А. Глазов, Е. Швабе, В.А. Кочкин. *Nucleonica* (в печати).

Рукопись поступила в издательский отдел
9 января 1962 года.

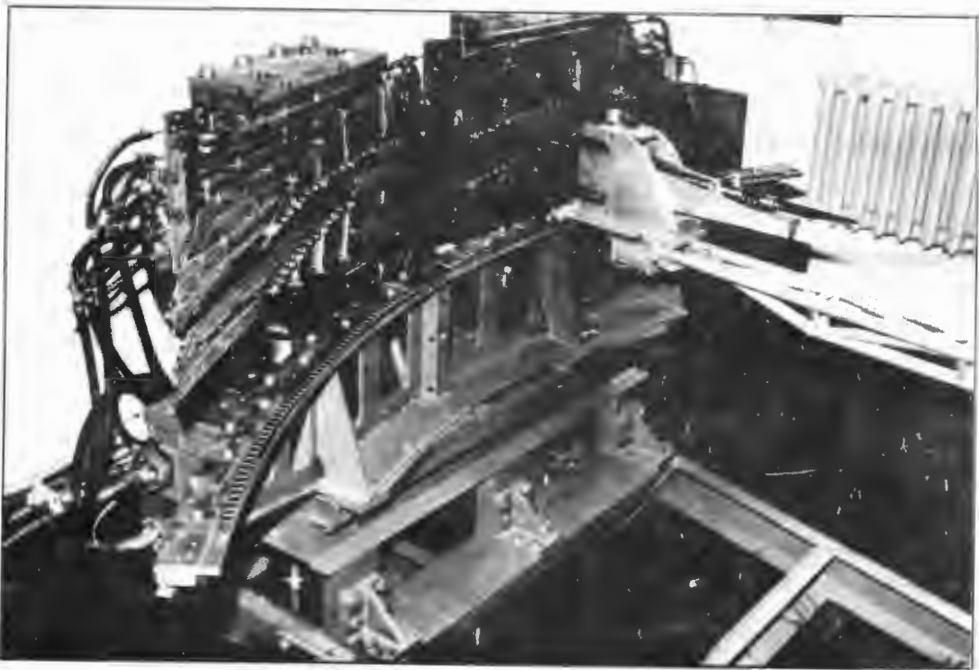


Рис. 1.

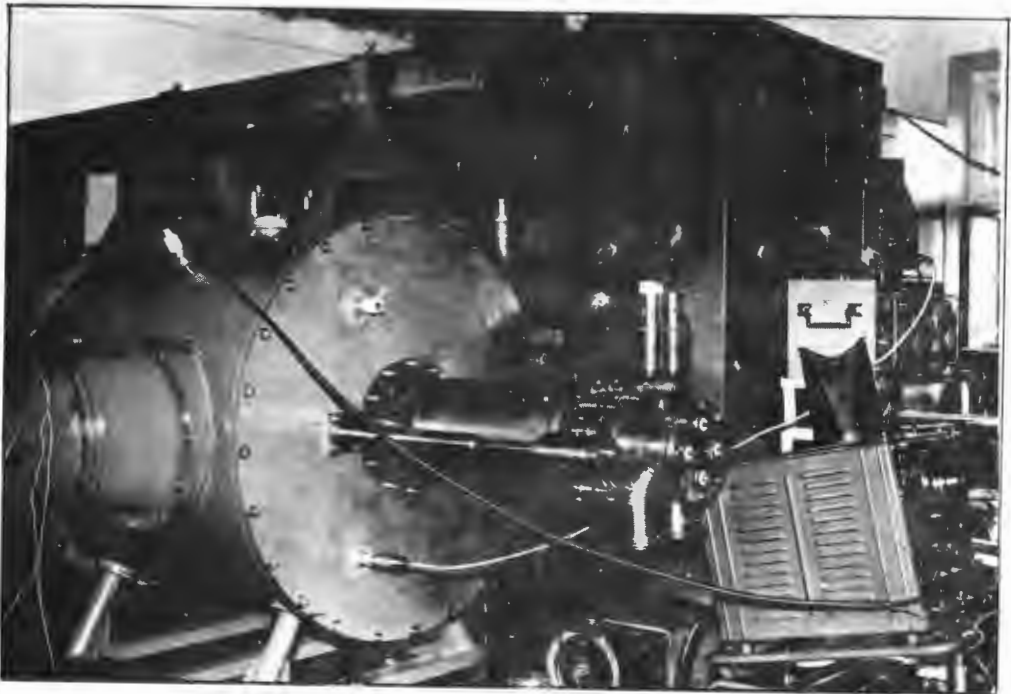


Рис. 2.