

6733

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9 - 6733



В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Н.И.Полумордвинова

ЭФФЕКТ РАСШИРЕНИЯ ЗАМКНУТЫХ ОРБИТ
В ПЕРИОДИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1972

P9 - 6733

В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Н.И.Полумордвинова

ЭФФЕКТ РАСШИРЕНИЯ ЗАМКНУТЫХ ОРБИТ
В ПЕРИОДИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

ОИЯИ
БИБЛИОТЕКА

В работе содержатся теоретические исследования и численный расчет эффекта, который возникает в ускорительных установках с вариацией магнитного поля /циклотроны, фазотроны/ при изменении глубины вариации вдоль радиуса ускорителя. Приведены аналитические выражения для расчета этого эффекта. В качестве иллюстрации выполнен расчет эффекта расширения замкнутых орбит для типичного секционированного изохронного циклотрона /мезонной фабрики/ в зоне конечных радиусов.

1. Замкнутая орбита в периодических полях

Известно ^{/1,2/}, что в периодических магнитных полях вида

$$H_z = H(r) \left[1 + \epsilon(r) \sin \left(N\phi - K \ln \frac{r}{r_0} \right) \right] \quad /1/$$

средний радиус замкнутой орбиты зависит от закона изменения вариации магнитного поля $\epsilon(r)$ и определяется из выражения

$$p_c = e H(r_c) \cdot r_c \cdot \lambda, \quad /2/$$

где p - импульс частицы, r_c - средний радиус замкнутой орбиты.

Если азимутально-симметричная часть магнитного поля соответствует закону $H = \left(\frac{r}{r_0} \right)^n H_0$, величина λ в линейном приближении находится из выражения ^{/2/}.

$$\lambda = \frac{l}{2} + \sqrt{\frac{l}{4} + \frac{2 + n + \frac{d \ln \epsilon}{d \ln r}}{2N^2}} + O\left(\frac{1}{N^4}\right). \quad /3/ *$$

Из /3/ непосредственно следует, что при выполнении условия

$$1,5 + n + \frac{r}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dr} \leq 0 \quad /4/$$

имеет место уменьшение величины λ и вследствие этого расширения замкнутой орбиты при незначительном изменении величины вариации

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \approx -(1,5 + n) \frac{\Delta r}{r}. \quad /5/$$

Таким образом в статическом режиме при наличии отрицательного показателя спада для вариации магнитного поля ($\frac{d\epsilon}{dr} < 0$) происходит увеличение энергетического шага в соответствии с выражением:

$$\frac{\Delta R}{\Delta r} = \frac{l + n}{l + n + \frac{r}{\lambda} \frac{d\lambda}{dr}}, \quad /6/$$

где $\frac{l}{l + n + \frac{r}{\lambda} \frac{d\lambda}{dr}} = \frac{p}{L} \frac{dL}{dp}$ - коэффициент уплотнения орбит в случае $d\epsilon/dr \neq 0$, Δr - энергетический шаг орбиты при $\frac{d\epsilon}{dr} = 0$.

Соответствующее значение величины $\frac{r}{\lambda} \frac{d\lambda}{dr}$ определяется из выражения /3/.

2. Динамический режим

В связи с тем, что в реальных ускорителях происходит медленное наплывание орбиты в зону, где $d\epsilon/dr$ отлично от нуля, эф-

* Учет высших приближений дает некоторое уточнение коэффициентов:

$$\lambda = \frac{l}{2} + \sqrt{\frac{l}{4} + \frac{1,5 + n + \frac{d \ln \epsilon}{d \ln r}}{2N^2}} \quad /3/$$

фekt расширения замкнутой орбиты проверялся численно на ЭВМ решением системы уравнений в цилиндрических координатах /3/ :

$$r'' - \frac{2r'^2}{r} - r = -\frac{e}{pc} \left(1 + \frac{r'^2}{r^2} + \frac{z'^2}{r^2}\right)^{1/2} [(r^2 + r'^2) H_z -$$

$$- r'z'H_z - rz'H_\phi] + \frac{e}{\beta pc} \left(1 + \frac{r'^2}{r^2} + \frac{z'^2}{r^2}\right) (r^2 \mathcal{E}_r - r'r\mathcal{E}_\phi),$$

$$z'' - \frac{2r'z'}{r} = \frac{e}{pc} \left(1 + \frac{r'^2}{r^2} + \frac{z'^2}{r^2}\right)^{1/2} [(r^2 + z'^2) H_r - \quad /7/$$

$$z'r'H_z - r'rH_\phi] + \frac{e}{\beta pc} \left(1 + \frac{r'^2}{r^2} + \frac{z'^2}{r^2}\right) (r^2 \mathcal{E}_z - z'r\mathcal{E}_\phi),$$

где $r' = \frac{dr}{d\phi}$, $\vec{\mathcal{E}}$ - ускоряющее поле, p , pc - импульс и скорость частицы, изменение энергии вычислялось по формуле $\frac{dE}{d\phi} = e(r'\mathcal{E}_r + r\mathcal{E}_\phi + z'\mathcal{E}_z)$, причем учитывалась только компонента

\mathcal{E}_ϕ . На рис. 1 приведены результаты численного расчета для параметров, близких к сооружаемому в настоящее время изохронному циклотрону SIN /4/. Закон изменения глубины вариации вдоль радиуса был принят

$$\epsilon(r) = \frac{\epsilon_0}{2} \left[1 + \cos \frac{\pi}{d} (r - r_0)\right]. \quad /8/$$

Предельная кинетическая энергия $W = 518$ Мэв, $r_0 = 443$ см,

$d = 53,5$ см, $r_\infty = \frac{c}{\omega} = 575,26$ см, ω - изохронная угловая

частота, $N = 8$, $\Delta W = 2$ Мэв/оборот. Расчет выполнен для двух значений угла спиральности магнитного поля ($\text{tg } \alpha = \frac{N}{K}$), $\alpha = 36^\circ$ и 45° .

Эффект расширения орбит, как и следовало ожидать из линейной теории, не зависел от угла α , величина которого влияет только на частоту аксиальных колебаний. Некоторое возрастание частоты

аксиальных колебаний в зоне расширения орбит не опасно из-за малого количества оборотов и может быть скомпенсировано регулированием угла α . Нарушение изохронизма в этой зоне также поддается регулировке при помощи коррекции среднего значения магнитного поля $H(r)$.

Из рис. 1 следует, что эффект позволяет разделить эмиттансы пучка на несколько сантиметров. Форма эмиттанса при этом практически сохраняется.

Заключение

Эффект расширения замкнутых орбит может быть с успехом использован для высокоэффективного вывода частиц из ускорителей с вариацией магнитного поля. Метод вывода основан на изменении коэффициента уплотнения орбит ($\frac{p}{L} \frac{dl}{dp}$) в зоне конечных радиусов с помощью изменения конфигурации магнитного поля /глубины вариации/. В этом случае отсутствует необходимость воздействия на свободные колебания низшими гармониками или локальными неоднородностями в структуре магнитного поля. Поэтому основным преимуществом этого метода является сохранение эмиттансов пучка в процессе расширения орбиты. Этот эффект может также оказаться полезным при инжекции частиц в кольцевые циклотроны как механизм отклонения частиц от инжекторной пластины.

Литература

1. А.А.Коломенский, А.А.Лебедев, *Теория циклических ускорителей*, Физматгиз, Москва, 1962 г.
2. V.P.Dmitrievsky, V.V.Kolga, N.I.Polumordvinova. Proc. of the 8th Intern.Conf. on High Energy Accelerators, p. 578, CERN (1971).
3. В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Н.И.Полумордвинова. *Сообщение ОИЯИ 13-4496, /1969/*.
4. H.A.Willax. Fifth Int.Cyclotron Conf., p. 58, Oxford (1969).

Рукопись поступила в издательский отдел
22 сентября 1972 года.

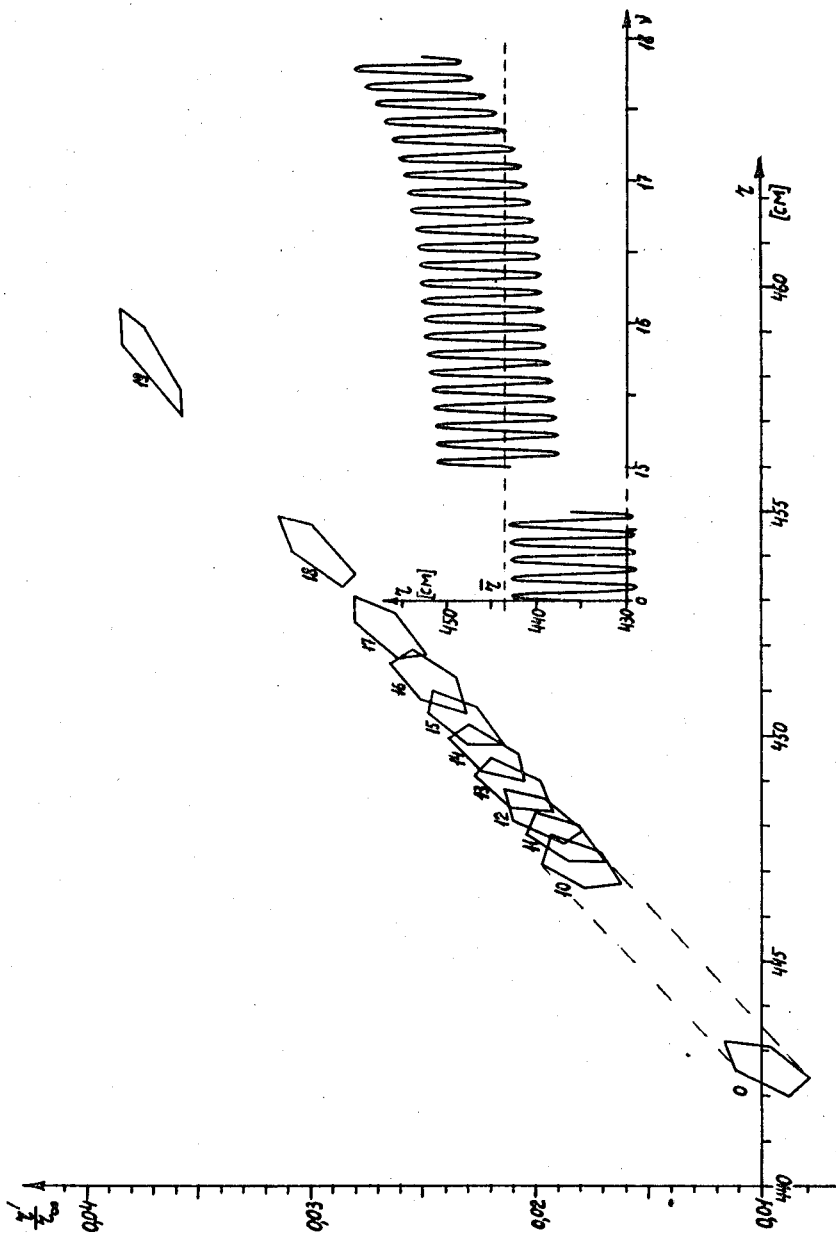


Рис. 1. Радиальные эмиттансы пучка в процессе ускорения при наличии спада вариации магнитного поля. Число около пятиугольника обозначает номер оборота. Справа - радиальная траектория, соответствующая центру пятиугольника, в зависимости от оборотов.