

рассеяние и т. д.). Поэтому необходимо, чтобы в процессе ускорения при отклонении частиц от опорной траектории (см. ниже) на них действовали возвращающие или, как принято говорить, фокусирующие силы.

Методы фокусировки. Существующая классификация методов Ф. ч. в у. (Ф.) отражает историю развития ускорителей и основывается на двух осн. признаках: типе фокусирующего эл.-магн. поля и его распределении вдоль опорной траектории. Иногда в названии метода Ф. используются и др. признаки: характер изменения поля во времени, тип фокусирующего устройства и т. д.

Ф. ч. в у. принято разделять на внешнюю, при к-рой фокусирующее поле создается внеш. устройствами, и коллективную, при к-рой для фокусировки используется коллективное поле, создаваемое частицами ускоряемого пучка или системы связанных пучков. В большинстве действующих ускорителей применяется внеш. Ф., к-рая подразделяется на магнитную Ф., производимую статическим или медленно меняющимся во времени магн. полем, электрическую Ф., высокочастотную Ф., осуществляемую ВЧ эл.-магн. полем, и пучковую Ф. с помощью потоков (пучков) сторонних частиц.

В зависимости от распределения поля вдоль опорной траектории можно выделить однородную Ф., при к-рой на частицы действуют пост. фокусирующие силы, и знакопеременную Ф., при к-рой чередуются фокусирующие и дефокусирующие участки. В циклич. ускорителях однородная Ф. осуществляется с помощью магн. поля с пост. градиентом. При этом бетатронные частоты (число поперечных колебаний на оборот) всегда оказываются меньше единицы, в связи с чем такую Ф. называют слабой. При Ф. магн. полем со знакопеременным градиентом бетатронные частоты могут значительно превышать единицу (до неск. десятков), такую Ф. называют сильной. Идея сильной Ф. была независимо высказана в работах Н. Кристофилоса (N. Christophilos, 1950) и Э. Куранта (E. Courant), М. Ливингстона (M. Livingston) и Х. Снайдера (H. Snyder) в 1953.

Системы фокусировки и фокусирующие элементы. В реальных установках возможно одноврем. применение разл. методов Ф. Совокупность фокусирующих устройств наз. системой Ф., а сами эти устройства — фокусирующими элементами. В совр. фокусирующих системах ускорителей и накопителей высокой энергии чаще всего применяется Ф. магн. полем со знакопеременным градиентом, а наиб. распространённым фокусирующим элементом является электромагнитная квадрупольная линза, у к-рой индукция магн. поля линейно зависит от поперечных координат. Такие линзы могут быть как с т. н. «тёплой» обмоткой (рис. 1), так и со сверхпроводящей. Ли-

боды. Если же срез магнита направлен под углом к траектории, то возникает дополнит. краевая Ф. К числу типичных фокусирующих элементов относятся также электростатические квадрупольные линзы, соленоиды, электронные линзы и т. д.

Алгоритм анализа устойчивости. Несмотря на большое многообразие фокусирующих систем и элементов, исследование устойчивости поперечного движения во всех системах с внеш. Ф., как правило, проводится с помощью единого алгоритма. Сначала рассчитывается опорная траектория в идеальном ведущем и фокусирующем полях, затем выводятся ур-ния движения частиц в идеальном поле и исследуется устойчивость линейных поперечных колебаний частиц около этой траектории. Далее учитываются эффекты, связанные с линейными и нелинейными возмущениями ведущего и фокусирующего полей, а также коллективные эффекты, связанные с собств. эл.-магн. полем пучка.

Опорная траектория и натуральная система координат. В циклич. ускорителях в качестве опорной обычно выбирают траекторию равновесной частицы, импульс (энергия) к-рой соответствует величине (в данный момент времени) и распределению магн. поля. При этом магн. поле предполагается идеальным, т. е. считается, что оно имеет нек-рую априорно заданную зависимость от координат и времени. Можно показать, что в синхротронах среди множества возможных траекторий равновесной частицы существует одна замкнутая траектория, к-рая наз. равновесной орбитой. В линейных ускорителях опорная траектория обычно совпадает с осью машины, а в кольцевых ускорителях она близка к ср. линии вакуумной камеры.

Анализ поперечного движения частиц сгустка, мало отклоняющихся от опорной траектории (параксимальных частиц), удобно вести в т. н. натуральной системе координат, в к-рой в качестве одной из координат используется длина s , отсчитываемая вдоль опорной траектории. Оси этой системы определяются сопровождающим трёхгранником, т. е. единичными векторами внеш. нормали $n(s)$, касательной $t(s)$ и бинормали $b(s)$, к-рые образуют правую тройку. Отклонение частицы от равновесной траектории в этой системе можно представить в виде

$$\Delta r(s) = xn(s) + zb(s),$$

где x и z — поперечные координаты частицы. Заметим, что в случае плоской орбиты с пост. кривизной натуральная система координат переходит в цилиндрич. систему. Если опорная траектория, как это обычно бывает, находится в горизонт. плоскости, то z определяет вертикальное, а x — радиальное отклонения от этой траектории. Для прямолинейной орбиты (линейный ускоритель) натуральная система координат совпадает с обычной декартовой системой.

Устойчивость линейных колебаний. При анализе устойчивости поперечных колебаний записанные в натуральной системе координат ур-ния движения прежде всего линеаризуются по переменным x, z, x', z' ($x' = dx/ds, z' = dz/ds$). Предположим, что нет искажений ведущего и фокусирующего полей, и ограничимся наиб. распространённым случаем, когда продольное магн. поле отсутствует. Тогда ур-ния движения по двум поперечным степеням свободы разделяются и приводятся к виду

$$\frac{d^2x}{ds^2} + g_x(p, s)x = 0,$$

$$\frac{d^2z}{ds^2} + g_z(p, s)z = 0,$$

где $g_x(p, s)$ и $g_z(p, s)$ — нек-рые известные ф-ции, p — импульс частицы. Из-за медленности продольных колебаний (их период, как правило, много больше периода поперечных колебаний) при исследовании этих ур-ний обычно можно пренебречь зависимостью p от s и рассматривать импульс как пост. параметр.

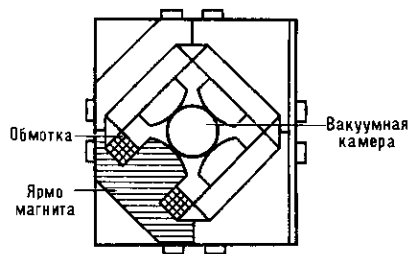


Рис. 1. Схематическое изображение электромагнитной квадрупольной линзы с «тёплой» обмоткой.

нейность магн. поля в «тёплых» линзах обеспечивается формой магн. полюсов, а в сверхпроводящих линзах — распределением токонесущих проводников. Иногда применяются линзы с пост. магнитами. К числу стандартных фокусирующих элементов относятся также секторные магниты с однородным полем. Если срез такого магнита перпендикулярен центр. траектории пучка, то магнит фокусирует только по одной (горизонтальной) степени сво-