

миллионами км. В накопит. системах этот путь ещё на неск. порядков больше, а в небольших У.— на неск. порядков меньше, но он всегда очень велик по сравнению с диаметром вакуумной камеры, поперечные размеры к-рой обычно не превосходят двух десятков см. Столкновение частиц со стенками камеры приводит к их потере. Поэтому ускорение возможно лишь при наличии тщательно рассчитанной и исполненной системы фокусировки.

При любом значении энергии ускоряемой частицы (в области устойчивости фазовых колебаний) в кольцевых У. имеется замкнутая (устойчивая) орбита. Находясь в вакуумной камере У., частицы движутся вблизи этой орбиты, совершая около неё *бетатронные колебания*. Частоты этих колебаний существенно превосходят частоты фазовых колебаний, так что при исследовании бетатронных колебаний энергию ускоряемых частиц и положение замкнутой орбиты можно считать постоянными.

При теоретич. рассмотрении бетатронных колебаний обычно исследуют площади, к-рые занимают ускоряемые частицы в «фазовых плоскостях» (r, p_r) и (z, p_z), где r и z — горизонтальная и вертикальная координаты частицы ($r = R - R_0$, где R — радиус частицы, R_0 — радиус равновесной траектории), а p_r и p_z — соответствующие составляющие её импульса. При невозмущённом движении эти площади имеют форму эллипса. Согласно *Лиувилля теореме*, величины площадей не меняются при движении. В процессе ускорения частицы пересекают многочисл. неоднородности магн. и электр. полей. При этом занятая пучком в фазовом пространстве область может приобретать сложную форму, так что эфф. величина площади — площадь описанного эллипса — возрастает. В тщательно настроенном У. такого возрастания не происходит. При наличии связи между горизонтальным и вертикальным движениями сохраняется не каждая из указанных площадей, а объём, занимаемый пучком в четырёхмерном пространстве (r, z, p_r, p_z).

Практич. интерес обычно представляет область, занимаемая пучком не в фазовых плоскостях, а в плоскостях (r, θ_r), (z, θ_z), где θ_r и θ_z — углы, составляемые скоростями частиц с касательной к равновесной орбите. Эти площади наз. горизонтальным (или радиальным) и вертикальным (или аксиальным) *эмиттантами* пучка ϵ_r и ϵ_z . Переход от импульсов к углам даётся ф-лами

$$p_z = p\theta_z = p_0\gamma\theta_z, \quad p_r = p\theta_r = p_0\gamma\theta_r,$$

где p — продольная составляющая импульса, к-рая практически совпадает с полным импульсом; $p_0 = mc$. Из теоремы Лиувилля следует, что интегралами движения являются величины $p\epsilon_r$ и $p\epsilon_z$ или, соответственно, $\gamma\epsilon_r$ и $\gamma\epsilon_z$, к-рые наз. нормализованными *эмиттантами*.

Из сказанного ясно, что при ускорении нормализованные эммитансы остаются неизменными, а обычные эммитансы ϵ_r и ϵ_z уменьшаются как $1/\gamma$. Соответственно уменьшаются поперечные размеры пучка.

Важнейшей характеристикой любого У. является его аксептанс — наиб. эмиттанс, к-рый У. пропускает без потерь. Высокая интенсивность ускоряемого пучка может быть достигнута только в У. с достаточно большим аксептансом.

При заданных размерах вакуумной камеры аксептанс У. пропорционален макс. углу, к-рый могут составлять траектории частиц с равновесной орбитой, и, следовательно, обратно пропорционален длине волны бетатронных колебаний. Вертикальный и горизонтальный аксептансы У. пропорциональны, т. о., числам бетатронных колебаний на оборот Q_r и Q_z , к-рые поэтому желательно увеличивать. Во всех существующих У. Q_r и Q_z близки друг к другу. Если оба они меньше 1, фокусировка наз. слабой (мягкой), а если больше 1 — сильной (жёсткой).

Все целые и полуцелые значения Q_r и Q_z запрещены. При целых Q частицы возвращаются к магн. элементам в одной и той же фазе бетатронных колебаний, влияние погрешностей поля складывается и возникает резонансная раскачка колебаний (внешний резонанс). Вокруг целых значений имеются запрещённые области частот, внут-

ри к-рых возрастание колебаний, хотя и ограничено по величине, но оказывается недопустимо большим, напр. превосходит размеры вакуумной камеры.

Полуцелые значения Q_r и Q_z запрещены из-за возникновения параметрического резонанса — резонансной раскачки колебаний, возникающей благодаря нерегулярностям градиента магн. поля. В нек-рых У., в особенности в накопителях, сказываются и резонансы более высоких порядков.

В циклич. У. для фокусировки частиц используют поперечные магн. поля. В однородном ведущем поле имеется только горизонтальная фокусировка, а вертикальная фокусировка отсутствует ($Q_z = 0$). Этот результат легко понять, замечая, что при движении частиц в однородном (вертикальном) магн. поле ($B_r = 0, B_z = \text{const}$) силы Лоренца не имеют составляющей по z и частицы сохраняют нач. аксиальную скорость. Необходимые для осевой фокусировки силы возникают лишь при наличии радиальной составляющей магн. поля.

Конфигурация магн. поля зависит от формы полюсных наконечников. На рис. 8 (а) и 8 (б) изображены полюсные наконечники, имеющие форму фигуры вращения (вокруг оси z). На рис. 8 (а) изображены плоские полюсы, создающие однородное вертикальное поле, такие поля не создают осевой фокусировки. На рис. 8 (б) изображена картина по-

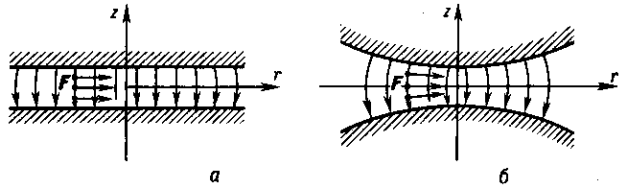


Рис. 8. а — магнитные силы в однородном поле; б — магнитные силы в поле, уменьшающемся к периферии.

ля, возникающая между полюсами, создающими зазор, расширяющийся к периферии. В этом случае сила Лоренца приобретает фокусирующую (возвращающую к центральной плоскости) осевую составляющую. Однако появление осевой фокусировки сопровождается ослаблением радиальной: частицы, отклонившиеся к периферии, медленнее возвращаются к равновесной траектории, т. к. попадают в более слабое поле.

В линейных У. проблема фокусировки также является важной, хотя она и не так критична, как в кольцевых У.: длина пути частиц в линейных У. невелика и ускоряемые частицы не возвращаются к уже пройденным возмущениям поля.

В циклических У., магн. система к-рых обладает азимутальной симметрией, справедлива ф-ла

$$Q_r^2 + Q_z^2 = 1. \quad (8)$$

Одновременная устойчивость радиальных ($Q_r^2 > 0$) и аксиальных ($Q_z^2 > 0$) бетатронных колебаний в этом случае возможна только при $Q_r < 1, Q_z < 1$, т. е. при слабой фокусировке (см. *Фокусировка частиц в ускорителе*). При сильной фокусировке участки, фокусирующие по z и дефокусирующие по r , сменяются участками, фокусирующими по горизонтальной и дефокусирующими по вертикальной координатам. При последоват. расположении таких участков и правильном выборе градиентов магн. поля и геометрии магнитов система в целом оказывается фокусирующей, причём оба результирующих значения бетатронных частот могут существенно превосходить единицу.

В У. с сильной фокусировкой применяются квадрупольные магн. или электр. (при небольших энергиях ускоряемых частиц) поля. На рис. 9 (а) изображена квадрупольная магн. линза, создающая фокусирующее в вертикальном направлении (по оси z) и дефокусирующее по радиусу r магн. поле. Вакуумная камера располагается вдоль оси линзы между её полюсами (на рис. не изображена). Поло-