

жительно заряженные частицы «летят» на читателя. Четыре такие частицы и действующие на них силы Лоренца изображены точками и стрелками. В фокусирующих по радиусу (и дефокусирующих по z) линзах магн. полюса N и S меняются местами. В кольцевых $У$. магниты, создающие ведущее магн. поле, располагаются между линзами. Они создают направленное по оси z однородное магн. поле. В нек-рых $У$. применяют магниты с совмещёнными ф-циями. Их магн. поле содержит как дипольную (ведущее поле), так и квадрупольную составляющую (рис. 9, б).

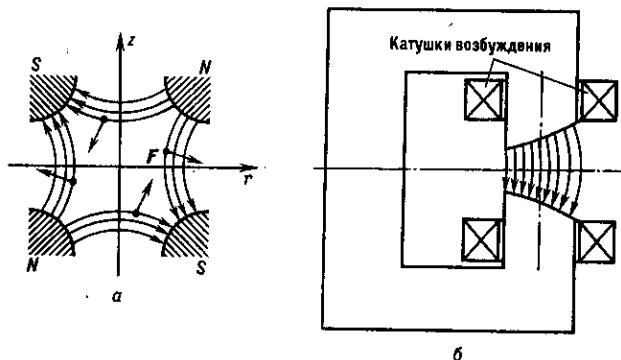


Рис. 9. а — квадрупольная магнитная линза; б — магнитный блок с совмещёнными функциями.

Для поперечной фокусировки в линейных $У$. можно было бы попытаться использовать эл.-магн. волну, к-рая ускоряет частицы. Однако в обычных волнах E -типа точки, соответствующие устойчивому фазовому движению, оказываются неустойчивыми для поперечных колебаний и наоборот. Чтобы обойти эту трудность, можно применять знакопеременную фазовую фокусировку (точки C и D на рис. 7 последовательно сменяют друг друга) или отказаться от азимутальной симметрии электрич. поля в резонаторе (квадрупольная ВЧ-фокусировка). Чаще всего, однако, для поперечной фокусировки применяют квадрупольные поля, создаваемые спец. магн. линзами. С 80-х гг. для изготовления таких линз начали использовать пост. магниты (сплав $SmCo$).

Эффекты, связанные с интенсивностью. Кроме резонансов, возникающих при взаимодействии пучка с внеш. полями, при больших интенсивностях пучков начинают играть роль разл. рода неустойчивости, связанные с взаимодействиями частиц пучка друг с другом, с элементами вакуумной камеры и ускоряющей системы, а в $У$. со встречными пучками — и с воздействием пучков друг на друга. Наиб. простым среди этих эффектов является кулоновский сдвиг частоты бетатронных колебаний. Электрич. поле пучка отталкивает к периферии наружные частицы и не действует на центральную частицу сгустка. В результате этого частоты бетатронных колебаний частиц в пучке начинают отличаться от частоты колебаний центра тяжести пучка. Если это различие превышает расстояние между ближайшими запрещёнными значениями Q , то при любой настройке $У$. часть пучка неизбежно теряется. Электростатич. отталкивание частиц сказывается и на фазовых колебаниях пучка (в частности, приводит к эффекту «отрицательной массы»).

Пучок ускоренных частиц взаимодействует со своим электростатич. изображением в вакуумной камере и с расположенными в ней предметами (резонаторами ускоряющих станций, датчиками измеряющих устройств, деталями и вводами вакуумной системы и т. д.). При этом сила, действующая на каждую частицу, пропорц. сдвигу пучка в камере относительно равновесной траектории и его линейной отклонности. В результате этого взаимодействия возникают эл.-магн. поля, действующие на позже пролета-

ющие частицы (эффект «голова — хвост») и на сами вызвавшие появление полей частицы при возвращении этих частиц к возбуждённому участку. Указанное взаимодействие вызывает ряд эффектов, приводящих к потере устойчивости пучка. Кроме уже упомянутого эффекта «голова — хвост», могут возникать резистивная неустойчивость (взаимодействие с бегущим вдоль камеры электрич. изображением пучка, к-рое запаздывает по фазе из-за конечной проводимости стенок камеры), микроволновая неустойчивость (взаимодействие с объектами, способными возбуждаться на высоких частотах) и др.

Ускорители со встречными пучками (коллайдеры). При генерации новых частиц в акте соударения должна выделяться энергия, равная или превосходящая энергию покоя рождающихся частиц, т.е. сотни МэВ, а иногда многие десятки ГэВ. При таких больших энерговыделениях теряет значение не только хим. связь частиц, входящих в состав мишени, но и связь нуклонов в ядре, так что соударение происходит с одиночными нуклонами или даже с одиночными кварками, составляющими нуклон. Т. н. *кумулятивные процессы*, к-рые можно рассматривать как одноврем. столкновение ускоренной частицы с двумя или неск. нуклонами, представляют научный интерес, но при высоких энергиях наблюдаются крайне редко.

Как уже отмечалось выше, при соударении частиц в коллайдерах может реализоваться вся набранная при ускорении энергия, в то время как при соударении быстрого протона с нуклоном неподвижной мишени используется только часть этой энергии. Так, для генерации J/ψ -мезона энергия протона должна в 3,7 раз превышать энергию покоя J/ψ -мезона, а для генерации Z^0 -бозона нужно 50-кратное превышение энергии. Генерация тяжёлых частиц на неподвижных мишенях оказывается поэтому катастрофически невыгодной, и необходимо переходить к коллайдерам. В коллайдерах частицы могут двигаться навстречу друг другу или в одном кольце (частицы и античастицы), или в двух пересекающихся кольцах.

Техника работы с накопит. кольцами, в к-рых движутся встречные пучки, очень сложна. Кол-во ядерных реакций, происходящих в единицу времени, оказывается в тысячи раз меньше, чем при неподвижных мишенях, из-за крайней разреженности пучков. Эффективность коллайдеров принято характеризовать их *светимостью*, т.е. числом, на к-рое нужно умножить эфф. сечение изучаемой реакции, чтобы получить число таких реакций в единицу времени. Светимость пропорц. произведению интенсивностей сталкивающихся пучков и обратно пропорц. площади сечения пучков (если они равны). Сталкивающиеся пучки должны, т. о., содержать много частиц и занимать небольшие объёмы в фазовом пространстве. Охлаждение фазового объёма электронных и позитронных пучков из-за синхротронного излучения обсуждалось выше. В то же время фазовый объём протонных пучков по мере ускорения уменьшается всего как $1/p$, т.е. совершенно недостаточно. А объём, занятый антипротонными пучками, оказывается очень большим уже при их генерации и мало уменьшается в дальнейшем, т.к. антипротоны образуются при высокой энергии (неск. ГэВ). Поэтому перед соударениями антипротонные пучки должны накапливаться и охлаждаться, т.е. сжиматься в фазовом пространстве.

Существует два способа охлаждения пучков тяжёлых частиц (протонов, антипротонов, ионов) — электронный и стохастический. Электронное охлаждение происходит при взаимодействии охлаждаемых пучков с пучком «холодных» электронов, летящим на нек-ром общем участке вместе с охлаждаемыми частицами и имеющим ту же ср. скорость. (Темп-рой пучка наз. средняя энергия его частиц, измеренная в системе координат, движущейся вместе с пучком.)

Стохастическое охлаждение основано на том, что число одновременно охлаждаемых частиц не очень велико. Если внутри устройства, измеряющего координаты пучка, находится всего одна частица, то её отклонение может быть измерено датчиком, а затем исправлено корректором. Если же внутри измерит. устройства окажется