Синхротрон

Синхротрон – кольцевой циклический ускоритель заряженных частиц, в котором частицы двигаются по орбите неизменного радиуса за счёт того, что темп нарастания их энергии в ускоряющих промежутках синхронизован со скоростью нарастания магнитного поля на орбите. Он позволяет ускорять как лёгкие заряженные частицы (электроны, позитроны), так и тяжёлые (протоны, антипротоны, ионы) до самых больших энергий. В настоящее время все циклические ускорители на максимальные энергии – это ускорители синхротронного тип (их принцип предложен в 1944 г. [В. Векслером](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/veksler_vl.htm) (СССР) и независимо в 1945 г. [Э. Макмилланом](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/images/mcmillan_edwin.gif) (США).

 В *синхротронах* магнитное поле переменное и частицы двигаются по одной и той же замкнутой траектории, многократно проходя прямолинейные промежутки с ускоряющим электрическим полем радиочастотного диапазона. Частицы, увеличивающие свою энергию, удерживаются на фиксированной орбите с помощью нарастающего поля мощных отклоняющих (в том числе и сверхпроводящих) кольцевых магнитов. Для удержания частиц на орбите постоянного радиуса темп нарастания поля синхронизован с темпом нарастания энергии частиц (отсюда происходит название этого типа ускорителя). По достижении максимального магнитного поля ускоренные частицы либо направляются на неподвижную мишень, либо (в коллайдерах) сталкиваются со встречным пучком, после чего цикл ускорения повторяется. В синхротронах есть два типа чередующихся кольцевых магнитов: отклоняющие двухполюсные (дипольные), удерживающие частицы на орбите, и фокусирующие четырёхполюсные (квадрупольные). Последние фокусируют частицы (как линзы свет), собирая их в узкий пучок, циркулирующий в вакуумной камере.  
    Когда скорость частицы близка к скорости света, соотношение между кинетической энергией частицы Е и радиусом траектории R имеет в системе СИ вид

E = cqHR

где H – величина напряженности магнитного поля, а q – заряд частицы. Поэтому максимально достижимая энергия частицы пропорциональна радиусу траектории и величине магнитного поля. Сократить размеры установки можно, увеличивая величину поля, а она ограничена эффектом насыщения металла (обычно, железа), используемого в качестве материала сердечника электромагнита. В самых современных ускорителях, в этой связи, используются электромагниты с катушкой из сверхпроводящего материала, работающие при температуре жидкого гелия.

Импульс частицы p (и, соответственно, ее энергия) должен быть пропорционален индукции поля B в поворотных магнитах и радиусу равновесной орбиты R: p ~ BR. Поскольку технически величина магнитного поля ограничена, то для повышения энергии ускоряемых частиц необходимо увеличивать радиус кольца.  
    Синхротроны используют как для ускорения тяжелых заряженных частиц (протонов, ионов), так и для ускорения электронов. Однако в случае электронов при высоких энергиях становятся существенными потери ими энергии на излучение (называемое синхротронным) при криволинейном движении по орбите.

Таким образом, если электроны и протоны одинаковых энергий, двигаются по орбитам одного радиуса, то потери энергии на синхротронное излучение у электронов будут в (mp/me)4 neaeqv1013 раз больше. Поэтому на синхротронах пока не удалось ускорить электроны до энергий бoльших 100 ГэВ. Крупнейшим современным синхротроном является синхротрон в Батавии (США). Он ускорял протоны и антипротоны до энергии 1 ТэВ = 1012 эВ и называется Теватрон. Радиус круговой орбиты в этом ускорителе 1 км.

Крупнейшие протонные синхротроны, предназначенные для экспериментов с неподвижной мишенью:

PS – ЦЕРН - Женева, Швейцария – 1960 – 28 ГэВ (максимальная энергия протонов)

У-70 – ИФВЭ - Протвино, Россия – 1967- 76 ГэВ

SPS – ЦЕРН - Женева, Швейцария – 1976 – 450 ГэВ