

частицы около равновесного значения, соответствующего центру ускоряемого сгустка. Ускоряющая система состоит из нескольких или многих ускоряющих станций, возбуждающих нагруженные или полые (в ультрарелятивистских С. п.) резонаторы. Резонаторы располагаются в промежуточных между элементами магн. системы. Для управления частотой резонаторов широко применяется подмагничивание ферритов, к-рым нагружается резонатор. Частота резонатора синхронизируется с частотой обращения частиц с помощью спец. систем автоподстройки. Погрешности и шумы в частоте, напряжении и др. параметрах ускоряющей системы приводят к шумовой расклатке амплитуды синхротронных колебаний. Стабилизирующим фактором является затухание фазовых колебаний, происходящее при увеличении полной (в релятивистском смысле) энергии частиц ($\sim v^{-1/2}$).

Основные характеристики протонного синхротрона. Наиб. важные характеристики ускорителей — предельная энергия и интенсивность ускоренного пучка. Совр. С. п. позволяют достичь самых высоких (в принципе неограниченных) значений энергии; интенсивность же С. п. слишком мала для их техн. применения. Поэтому осн. приложение С. п. — физика частиц высоких энергий. Как видно из (1), для повышения энергии необходимо увеличивать магн. жесткость $\langle B(x)R(x) \rangle$. Обычные железные магниты не позволяют достичь величин индукций, существенно превосходящих 2 Тл; поэтому в С. п. на сверхвысокие энергии используются сверхпроводящие магниты, индукция к-рых может достигать 6—8 Тл. Радиус С. п. также возрастает: предполагается, что в проектируемой в США установке SSC ср. радиус $\langle R \rangle$ будет равен 13,8 км. В связи с увеличением размеров установок стоимость С. п. также растёт, однако не очень быстро, т. к. размеры вакуумной камеры (и, следовательно, апертура магнитов) при этом, как правило, несколько сокращаются. Уменьшить размеры вакуумной камеры можно, сокращая размеры инжектируемого пучка (при инжекции из бустера этому способствует уменьшение размеров пучка, происходящее при его ускорении $\sim p^{-1/2}$). Среди др. применяемых мер укажем на усовершенствование методов коррекции возмущений магн. поля, улучшение вакуума и связанное с этим уменьшение рассеяния на остаточном газе.

Ср. интенсивность С. п. (число ускоренных протонов в с) определяется ф-лой:

$$I = N/T,$$

где N — число частиц, ускоренных за рабочий цикл, T — длительность этого цикла.

Величина N определяется числом инжекторов, частиц и потерями во время ускорения. В совр. С. п. N ,

как правило, приближается к предельному значению, определяемому коллективными эффектами: допустимым сдвигом частоты поперечных колебаний, коллективными неустойчивостями и т. д. Длительность цикла ускорения зависит гл. обр. от скорости роста магн. поля в поворотных магнитах и меняется в очень широких пределах: от 0,05 с у быстрых бустеров до 100—150 с у С. п. на сверхвысокие энергии.

Осн. параметры нек-рых из действующих С. п. сведены в табл. Последний из этих С. п. — тэватрон — объединяет в себе функции ускорителя и накопительного кольца со встречными $p - \bar{p}$ пучками. Тэватрон — первый из С. п. со сверхпроводящими магнитами на энергию, измеряемую многими сотнями ГэВ. Наиб. крупные проектируемые установки: LHC — большой адронный столкновитель (СЕРН, Женева, 2×8 ТэВ) и SSC — сверхпроводящий суперстолкновитель (США, Техас, 2×20 ТэВ). Эти установки также объединяют в себе ф-ции С. п. и столкновителя. Намеченное время сооружения — 1996 и 1998 гг. соответственно.

Лит.: Коломенский А. А., Лебедев А. Н., Теория циклических ускорителей, М., 1962; Лебедев А. Н., Шальнов А. В., Основы физики и техники ускорителей, т. 1—3, М., 1981—83; Catalogue of high energy accelerations, Tsukuba, 1989. П. Р. Зенкевич.

СИНХРОТРОН ЭЛЕКТРОННЫЙ — кольцевой резонансный ускоритель электронов (позитронов) на энергии от неск. МэВ до десятков ГэВ, в к-ром частота ускоряющего электрич. поля не меняется, ведущее магн. поле увеличивается во времени и равновесная орбита не меняется в процессе ускорит. цикла. Обычно электроны уже при инжекции являются ультрарелятивистскими; если же ускорение начинается с энергии $\lesssim 5 \div 7$ МэВ, то в начале ускорит. цикла применяется бетатронный режим ускорения (см. Бетатрон).

Траектории ускоряемых в синхротроне электронов (позитронов) заполняют кольцевую область в вакуумной камере ускорителя. Обращаясь в ней, частицы многократно возвращаются к одним и тем же ускоряющим промежуткам, на к-рые подано переменное напряжение с частотой, в целое число раз q ($q \geq 1$) превосходящей частоту обращения частиц по т. н. равновесной орбите. Число q наз. кратностью ускорения. При каждом прохождении через промежуток фаза идеальной (равновесной) частицы остаётся неизменной, но фаза реальных частиц немного изменяется, колеблется около равновесного (синхронного) значения. При ускорении пучок частиц разбивается на сгустки — б а н ч и, заполняющие нек-рую область около синхронных значений фазы. Макс. число сгустков на орбите равно q .

Траектория частиц в С. э. изгибается с помощью дипольных магнитов, создающих ведущее (поворотное) магн. поле. Для фокусировки частиц в совр. С. э.

Основные параметры некоторых действующих протонных синхротронов

Место размещения и название	СССР, Серпухов, ИФВЭ	Япония, КЕК	Швейцария, СИС (SPS)	США, тэватрон
Время начала строительства, год	1961	1971	1970	1979
Первый пучок (фактически или по плану), год	1967	1976	1976	1983
Энергия, ГэВ	76	12	450	800
Частота повторения, цикл/с	0,1	0,4	0,1	1/60
Интенсивность внутр. пучка, частота/цикл	$1,7 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{10}$	$3,3 \cdot 10^{12}$	—
Диаметр кольца, м	236,3	108	2200	2000
Структура периода фокусирующей системы	ФОДО	ФОДО	ФОДО	ФОДО
Бетатронная частота	9,85	7,11	26,6	19,42
	9,8	7,22	26,6	19,41
Число магнитов	120	48	744	744
Магн. индукция (при инжекции, Тл)	0,038	0,15	0,063	0,66
максимальная, Тл	4,2	1,75	2,025	4,4
Ср. мощность питания магн. системы, МВт	15	2,9	57	7
Число резонаторов	49	9	4	8
Кратность гармоник	30	4	4620	1113
Диапазон изменения частоты, МГц	5,5—6,1	6,03—7,93	199,4—200,4	53,1
Ср. мощность ВЧ-системы, МВт	1	$8 \cdot 10^{-2}$	0,5	—
Апертура вакуумной камеры, мм	170×115	145×50	150×150	75×75
Ср. давление, торр	$3 \cdot 4 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	10^{-10}	10^{-10}