

обычно используются поля с большим градиентом магн. индукции (жёсткая, или *сильная фокусировка*). Изгибающие и фокусирующие ф-ции магн. поля могут совмещаться (магниты с совмещёнными функциями) или разделяться (магн. система с разделёнными функциями). В последнем случае поворотные магниты (изгибающие траекторию частиц) создают однородные, а фокусирующие (магн. линзы) — квадрупольные поля. Магн. индукция в поворотных магнитах (и её производная в магн. линзах) в течение ускорит. цикла непрерывно возрастает (чаще всего во много раз) в соответствии с ростом импульса ускоряемых частиц.

На криволинейных участках траектории пучки электронов (позитронов) испускают *синхротронное излучение*, мгновенная мощность к-рого в расчёте на один электрон определяется ф-лой:

$$W = \frac{2}{3} e^2 c \gamma^4 / R^2(s), \quad (1)$$

где  $e$  — заряд частицы,  $\gamma$  — её лоренц-фактор (отношение полной энергии частицы к её энергии покоя),  $R(s)$  — радиус кривизны траектории на участке с координатой  $s$ . Мощность, рассеиваемая за оборот, пропорциональна  $\gamma^4/R$ . При больших энергиях частиц потери на излучение могут достигать неск. МэВ на оборот. Чтобы уменьшить потери, приходится увеличивать размеры С. э., что сопряжено с увеличением стоимости их строительства. Размеры реальных С. э. (иногда до км) определяются разумным компромиссом между эксплуатационными (гл. обр. стоимость электроэнергии) и капитальными затратами. Потери на излучение приходится всё время компенсировать, поэтому процесс ускорения электронов выгодно вести быстро, за сравнительно небольшое число оборотов (быстроциклические С. э.). Пиковая мощность ускоряющей ВЧ-системы С. э. на энергии в десятки ГэВ может достигать ~1 МВт.

Поскольку синхротронное излучение ускоряемых частиц направлено практически по вектору их скорости (составляет с ним углы  $\sim 1/\gamma$ ), в процессе ускорения происходит радиац. охлаждение пучка (см. *Охлаждение пучков заряженных частиц*) — уменьшение *эммитанса* (фазового объёма) пучка как для поперечных, так и для продольной степени свободы. Аксиальные *бетатронные колебания* затухают с декрементом

$$\lambda_z = W/2\mathcal{E}, \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}$  — полная энергия частицы. Сумма декрементов затухания радиальных бетатронных ( $\lambda_r$ ) и синхротронных ( $\lambda_s$ ) колебаний равна  $3\lambda_z$ . Величина каждого из них в отдельности определяется устройством магн. системы ускорителя. В С. э. с азимутально-симметричным полем (слабая фокусировка) величины  $\lambda_r$  и  $\lambda_s$  определяются ф-лами:

$$\lambda_r = n\lambda_z/(1-n); \quad \lambda_s = (3-4n)\lambda_z/(1-n), \quad (3)$$

из к-рых следует, что для одноврем. затухания этих колебаний показатель спада магн. поля  $n$  должен находиться в интервале

$$0 < n < 3/4. \quad (4)$$

В общем случае условие одноврем. затухания колебаний определяется более сложными неравенствами. В жёстко-фокусирующих С. э. с разделёнными ф-циями условие одноврем. затухания выполняется автоматически. Радиац. охлаждение позволяет использовать С. э. в качестве *накопителей* лёгких частиц (электронов, позитронов).

Квантовый характер излучения приводит к стохастич. раскатке колебаний (нагреву пучка), к-рая ограничивает его охлаждение. В установившемся стационарном состоянии радиальный размер пучка обычно опре-

деляется связью радиальных бетатронных и синхротронных (радиально-фазовых) колебаний частиц. С ростом энергии он увеличивается  $\propto \gamma^2$ . Теоретически достижимый аксиальный размер пучка  $\propto \sqrt{\Lambda_e R}$  крайне мал ( $\Lambda_e$  — комптоновская длина волны электрона). В типичных условиях размер пучка существенно превосходит теоретич. предел из-за связи радиальных и аксиальных бетатронных колебаний, а также вследствие того, что несовершенство магн. системы приводит к появлению зависимости аксиального положения частиц от их энергии — к паразитной аксиальной дисперсионной ф-ции. Как правило, поперечные размеры пучка в начале ускорения не превышают неск. см, а в конце могут уменьшаться до миллиметровых размеров.

В С. э. ср. диапазона энергии (неск. сотен МэВ) с коротким циклом ускорения радиац. эффекты могут не успевать проявляться. В таких ускорителях, как и в *синхротронах протонных*, уменьшение размеров пучка связано только с адиабатич. затуханием бетатронных и *синхротронных колебаний* частиц и не может использоваться для создания накопителей.

Ограничения интенсивности (числа частиц в одном цикле ускорения) в совр. С. э. в основном связаны с когерентными микроволновыми неустойчивостями пучка, возникающими вследствие его взаимодействия с металлич. поверхностями, обращёнными к пучку (с неоднородностями вакуумной камеры, соединит. фланцами и сильфонами, с деталями ускоряющих резонаторов, с измерит. электродами и т. д.). Для борьбы с такими неустойчивостями изменяют собств. частоту резонирующих элементов, вводят обратные связи, используют широкополосные демпфирующие системы.

При одноврем. ускорении в С. э. нескольких ступеней появляется ещё один тип неустойчивости — относ. движение ступеней.

Электронные синхротроны в наст. время (90-е гг.) являются осн. типом ускорителей на высокие энергии (начиная с неск. сотен МэВ). Они применяются также в качестве накопителей частиц и источников синхротронного излучения. Конкретные данные по нескольким типичным С. э. приводятся в табл.

Параметры некоторых электронных синхротронов

Название, местоположение	Энергия, ГэВ	Интенсивность, частиц/имп.	Рабочая частота, Гц	Год пуска
Синхротрон Боннского ун-та, ФРГ	2,5	$4 \cdot 10^{10}$	50	1967
DESY, Гамбург, ФРГ	7,5	$2,2 \cdot 10^{11}$	50	1964
Синхротрон Фраскати, Италия	1,1	$5 \cdot 10^{10}$	20	1959
Синхротрон университета Токио, Япония	1,3	$4 \cdot 10^{10}$	22,5	1961
LESY, Лунд, Швеция	1,2	$2 \cdot 10^{10}$	12,5	1960
NINA, Дарсбери, Англия	5,2	$2,4 \cdot 10^{11}$	53	1966
Синхротрон Корнелльского ун-та, США	10	$1,8 \cdot 10^{12}$	60	1967
Синхротрон ТПИ, Томск	1,5	$2 \cdot 10^{10}$	2	1967
ВЗ-М, ИЯФ СО РАН, Новосибирск	0,3	$2 \cdot 10^{11}$	1	1968

Лит.: Коломенский А. А., Лебедев А. Н., Теория циклических ускорителей, М., 1962; Брук Г., Циклические ускорители заряженных частиц, пер. с франц., М., 1970; Коломенский А. А., Физические основы методов ускорения заряженных частиц, М., 1980; Лебедев А. Н., Шальнов А. В., Основы физики и техники ускорителей, т. 1 — Ускорители заряженных частиц, М., 1981. Д. В. Пестриков. **СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** — магнитотормозное излучение, испускаемое релятивистскими заряж. частицами в однородном магн. поле. Излучение частиц, движущихся в переменных электр. и магн. полях, наз. *обдужающим излучением*. С. и. обусловлено уско-