

Установки со встречными пучками

Физический комплекс, лаборатория, город, страна	Частицы	E_r , ГэВ	L , см ⁻² с ⁻¹	Начало работы, статус комплекса
Лептонные пучки				
ВЭП-1 (ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск)	e ⁺ e ⁻	0,32	5·10 ²⁷	1965, закрыт
Накопитель Центра SLAC (Станфорд, США)	e ⁺ e ⁻	1,0	2·10 ²⁸	1965, закрыт
ВЭПП-2 (ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск)	e ⁺ e ⁻	1,4	3·10 ²⁸	1966, используется как бустер
АСО (Орсе, Франция)	e ⁺ e ⁻	1,1	1·10 ²⁹	1967, источник синхротронного излучения
ADONE (Фраскати, Италия)	e ⁺ e ⁻	3	6·10 ²⁹	1970, действует
CEA (Кембридж, США)	e ⁺ e ⁻	4	3·10 ²⁸	1971, закрыт
SPEAR (SLAC, Станфорд, США)	e ⁺ e ⁻	8,2	2·10 ³¹	1972, действует
ВЭПП-2М (ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск)	e ⁺ e ⁻	1,4	3·10 ³⁰	1974, действует
DORIS (Центр DESY, Гамбург, ФРГ)	e ⁺ e ⁻	11	1·10 ³¹	1976, действует
DCI (Орсе, Франция)	e ⁺ e ⁻	4	1·10 ³⁰	1976, действует
ВЭПП-4 (ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск)	e ⁺ e ⁻	5,5	5·10 ³⁰	1979, действует
PETRA (Центр DESY, Гамбург, ФРГ)	e ⁺ e ⁻	45	1,7·10 ³¹	1978, действует
CESR (Корнелл, США)	e ⁺ e ⁻	11	3·10 ³¹	1979, действует
PEP (SLAC, Станфорд, США)	e ⁺ e ⁻	29	2·10 ³¹	1980, действует
LEP (ЦЕРН, Швейцария), 1-я очередь	e ⁺ e ⁻	110	1,6·10 ³¹	1989, строится
SLC (SLAC, Станфорд, США)	e ⁺ e ⁻	100	1,6·10 ³¹	1987, строится
TRISTAN (Центр КЕК, Япония)	e ⁺ e ⁻	60	1·10 ³¹	1988, строится
ВЛЭПП (ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск)	e ⁺ e ⁻	300	1·10 ³²	проект
		1000	1·10 ³²	проект
Барийные пучки				
ISR (ЦЕРН, Швейцария)	pp	62	7·10 ³¹	1971, закрыт
	$\bar{p}p$	62	1·10 ²⁷	1981, закрыт
SPS (ЦЕРН, Швейцария)	pp	600	3·10 ²⁹ (3·10 ³⁰)*	1981, действует
Теватрон (Лаборатория им. Ферми, США)	$\bar{p}p$	2000	(3·10 ³⁰)*	1985, действует
УНР (ИФЭФ, Серпухов)	pp	6000	1·10 ³²	1993, строится
SSC (США)	pp	40 000	1·10 ³³	1994, проект
LEP (ЦЕРН)	pp	17 000	1,5·10 ³³	проект
2-я очередь — LHC	$\bar{p}p$			
Лептон-барийные пучки				
HERA (Центр DESY, Гамбург, ФРГ)	e [±] p	310 (30 _e -820 _p)	6·10 ³¹	1988, проект
LEP (ЦЕРН), 2-я очередь	e [±] p	1800	1·10 ³¹	проект

* Проектная величина.

лятивистских пучков существенными становятся потери, обусловленные внутрипучковым рассеянием. Интенсивность пучков убывает и в результате «полезной» гибели частиц в реакциях взаимодействия В. п. Обычно для времени жизни пучков определяющим является один из перечисленных процессов. Напр., для накопителя ВЭПП-2М при малом токе пучков ($N \sim 10^8$ частиц) время жизни при энергии 500 МэВ ограничено тормозным излучением на остаточном газе и составляет 50 ч при ср. вакууме $5 \cdot 10^{-10}$ Торр. При $N = 5 \cdot 10^9$ частиц время жизни одного сгустка падает до 35 мин из-за внутр. рассеяния (длина сгустка 3 см, поперечные размеры в месте встречи 0,5 мм × 8 мкм). В режиме двух встречных сгустков τ падает ещё вдвое и определяется т. н. эффектами встречи (см. раздел 3).

Многочисленные процессы (многократное рассеяние частиц на атомах остаточного газа, рост разброса частиц по продольному импульсу из-за флуктуаций поляризации, потеря на атомах остаточного газа, многократное внутр. рассеяние и многократное рассеяние на В. п.) вызывают увеличение размеров пучков и, согласно (4), уменьшение светимости. Если движение частиц в накопителе сопровождается охлаждением, демпфирующим бетатронные и синхротронные колебания, многократные процессы подавляются и устанавливается равновесный размер пучка.

3. Эффекты встречи пучков. Интенсивность В. п. не может быть произвольно большой. Для одного пучка она ограничена действием пространственного заряда пучка и внутр. рассеянием. В режиме встречи двух пучков появляются эффекты взаимодействия частиц одного пучка с эл.-магн. полями др. пучка, вызывающие изменение частот бетатронных колебаний ω_v ;

при приближении ω_v к резонансным значениям резко падает время жизни пучков и возрастают их размеры.

Электрич. и магн. поля пучков существенно нелинейны, поэтому сдвиг частот бетатронных колебаний зависит от амплитуды колебаний a , а воздействие В. п. носит периодич. характер с частотой, кратной частоте обращения ω_s . Если отношение ω_v и ω_s — рациональное число:

$$\frac{\omega_v}{\omega_s} = \nu = \frac{p}{q}, \quad (5)$$

где p и q — целые числа, орбита оказывается замкнутой (через q оборотов), т. е. «привязанной по фазе» к частоте обращения. При этом возникает нек-рая область бетатронной автофазировки вблизи резонансной точки $\nu(a_{pp})$. Сам по себе нелинейный резонанс может и не приводить к гибели частиц, однако при этом возрастает поперечный размер пучка, что уменьшает светимость. С увеличением интенсивности В. п. (а с ней и сдвиг $\Delta\nu$) области автофазировки соседних резонансов начинают перекрываться и движение частиц приобретает стохастич. характер [4] — начинается случайное изменение частот бетатронных колебаний. В результате могут значительно возрастать размеры пучка и падать его интенсивность из-за ухода частиц за апертуру. Такой стохастизации движения способствуют пумы ускоряющей ВЧ-системы и пульсации магн. поля накопителя.

Количественно эффекты встречи принято описывать сдвигом частоты $\Delta\nu_{x,z}$ бетатронных колебаний частиц данного пучка в плоскостях xz . Величина $\Delta\nu_{x,z}$ пропорциональна числу частиц во встречном пучке и обратно пропорциональна его поперечным размерам.