

# Физический проект бустерного протонного синхротрона для DESY–III

Коллаборация ИФВЭ<sup>a</sup>–DESY<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия*

<sup>b</sup> *DESY, Hamburg, Germany*

В рамках соглашения о МНТС между ИФВЭ и DESY в Институте физики высоких энергий разработано физическое обоснование бустерного протонного синхротрона на энергию 800 МэВ для ускорителя DESY–III, находящегося в начальной части каскада протонных инжекторов накопителя HERA. В работе приводится описание технических деталей предлагаемого ускорителя. Участники работы перечислены ниже\*.

**Введение.** В настоящее время протоны ускоряются в DESY–III от кинетической энергии 50 МэВ до импульса 7.5 ГэВ/с. Интенсивность пучка  $N \simeq 1.3 \cdot 10^{12}$  протонов в 11 сгустках. Нормализованные поперечные эмиттансы  $\varepsilon_{z,x}$  (по уровню  $1\sigma$ , без  $\pi$ ) составляют примерно 2.5 мкм по вертикали,  $z$  и 5.0 мкм по горизонтали,  $x$ . Поперечная яркость пучка — она пропорциональна  $N/\varepsilon_{z,x}$  — ограничена эффектом кулоновского сдвига бетатронной частоты. Получение более ярких протонных пучков рассматривается как один из способов увеличения светимости накопителя HERA.

Для увеличения в 5 раз предела по пространственному заряду в DESY–III предлагается использовать промежуточный бустерный синхротрон. Его спецификация приведена в табл. 1.

Таблица 1: Основные параметры бустера

Частота циклов	1	Гц
Максимальная энергия (кинетическая)	800	МэВ
Энергия инжекции (кинетическая)	50	ГэВ
Интенсивность пучка	$\geq 2 \cdot 10^{11}$	р.р.р.
Длина орбиты	57.6	м
Частота обращения	1.635–4.381	МГц
Кратность ускорения	2	
Вертикальный эмиттанс, $\varepsilon_z$	0.8	мкм
Горизонтальный эмиттанс, $\varepsilon_x$	1.2	мкм
Продольная фазовая площадь сгустка	$\leq 0.080$	эВ·с

Входной пучок формируется за  $\sim 6$  оборотов из ионов  $H^-$  с энергией  $(50 \pm 0.12)$  МэВ, инжектируемых из линейного ускорителя Linac–III через тонкую обдирочную фольгу. Проводится квазиadiaбатический захват пучка в режим ускорения, в результате чего образуются 2 сгустка с фактором группировки (длина сгустка/расстояние между сгустками)  $B=0.54$ , полным разбросом по импульсам  $\Delta p/p = \pm 0.28\%$  и продольной фазовой площадью 0.068 эВ·с. Для выбранной магнитной структуры кулоновские сдвиги бетатронных частот составляют  $\Delta Q_z = -0.20$  и  $\Delta Q_x = -0.14$  при инжекции.

Пять циклов бустера используются для заполнения 10 из 11 сепаратрис DESY–III за время 4–5 с. Каждый раз инжектируется два сгустка. Одна сепаратриса остается пустой для упрощения процесса инжекции в DESY–III и последующего перевода пучка.

---

\*W. Ebeling, J. Maidment, В. Балбеков, С. Иванов, П. Чирков, О. Курнаев, В. Сычев, А. Василевский, Э. Меркер, О. Лебедев, Ю. Каршев, Е. Ткаченко, В. Маценко, Ю. Калинин, И. Дегтярев и др.

Бустер может быть размещен в уже существующем на территории DESY экспериментальном зале № 1. Его план показан на левом рис. 1 (слева). Прямолинейный промежуток, в котором размещается ВЧ-резонатор, ориентирован антипараллельно направлению выходного канала частиц из Linac-III. Внутри зала оставлено место, достаточное для размещения внешней радиационной защиты, собранной из блоков тяжелого бетона с толщиной 80 см.

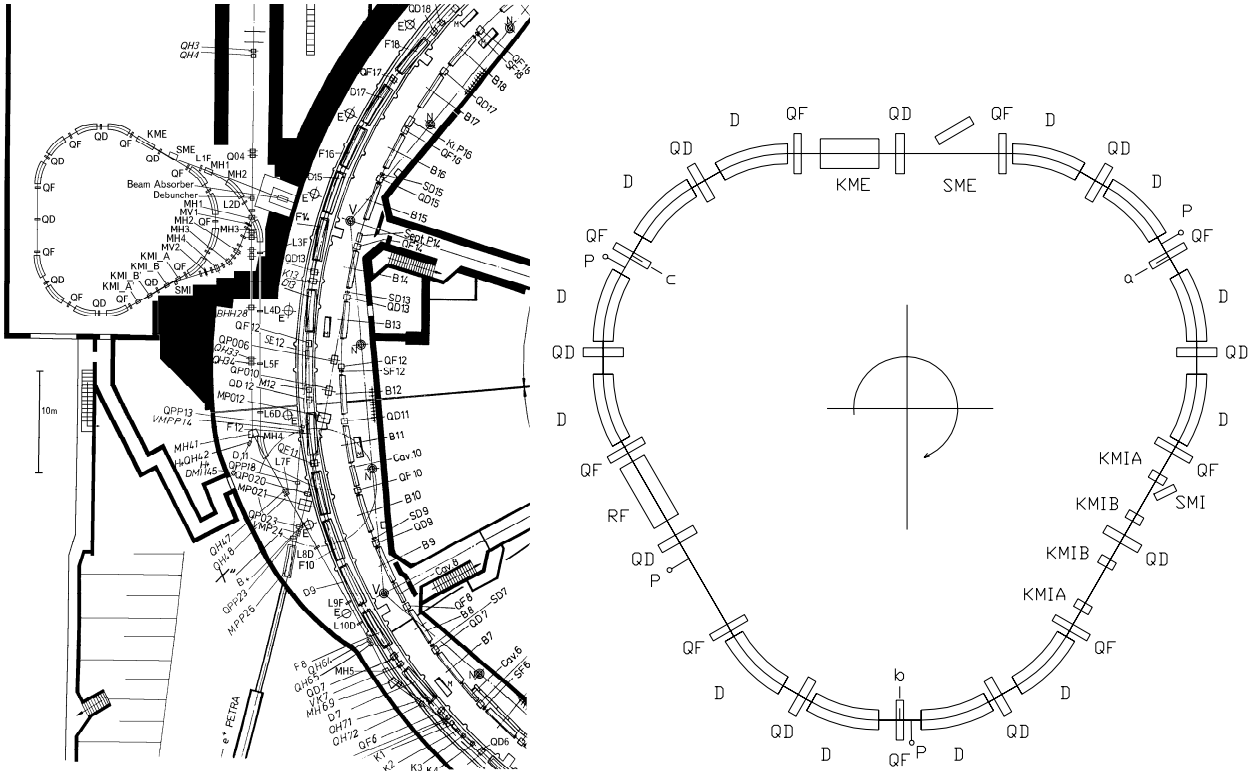


Рис. 1: План DESY-III и бустера (слева). Основное оборудование бустера (справа).

Инжекция в и вывод из бустера проводятся в горизонтальной плоскости. Орбита бустера находится в той же плоскости, что и орбита DESY-III. Трасса пучка поднимается от уровня линейного ускорителя в канале ввода частиц. При запуске ускорителя и в течение сеансов по его изучению выведенный пучок направляется в абсорбер. Канал вывода заканчивается в прямолинейном промежутке #6 DESY-III, который используется в настоящее время для инъекции из Linac-III.

Далее приводится техническое описание бустерного синхротрона.

**Структура и магниты.** Используются 12 диполей (D), 9 фокусирующих (QF) и 9 дефокусирующих (QD) квадруполей, образующих FODO цепочку, показанную на правом рис. 1. Структура имеет порядок симметрии 3, полную длину 57.6 м и состоит из 3 суперпериодов *ab, bc, ca* длиной 19.2 м каждый. Один суперпериод состоит из 3 периодов длиной 6.4 м. Диполи каждого центрального периода пропущены, чтобы оставить прямолинейные промежутки длиной 2.97 м для размещения ВЧ-резонатора, систем ввода/вывода и т.д.

Критическая энергия  $\gamma_{tr}=2.208$  (кинетическая 1.133 ГэВ) находится выше максимальной проектной энергии кольца. Номинальная рабочая точка расположена в центре области устойчивости ( $Q_z=2.25, Q_x=2.25$ ), что может быть изменено позже. Естественная линейная хроматичность  $\chi = p(\partial Q/\partial p)$  равна  $-1.854$  в  $z$ - и  $-1.277$  в  $x$ -направлениях. На левом рис. 2 показаны амплитудные и дисперсионная функции суперпериода.

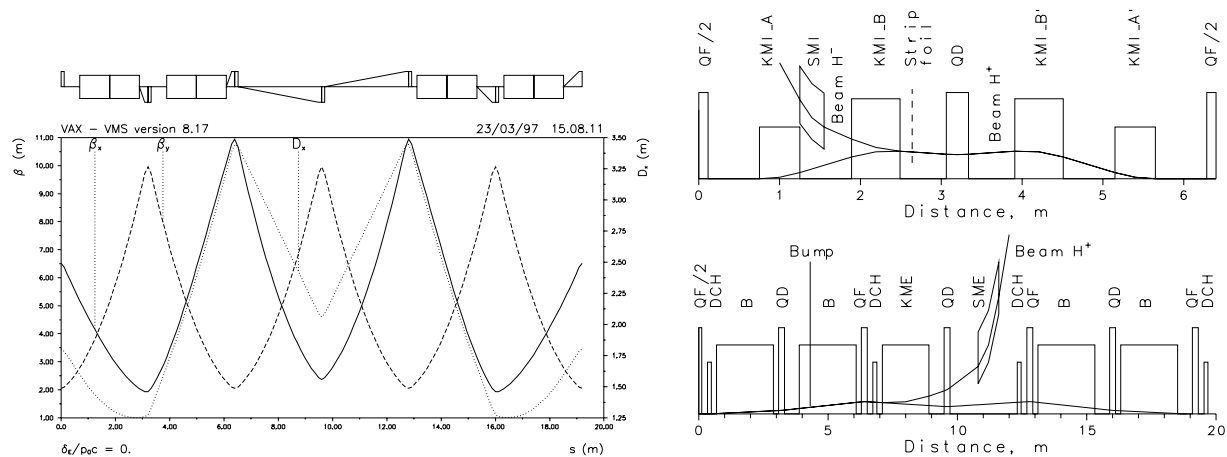


Рис. 2: Динамические функции структуры (слева). Системы ввода/вывода пучка (справа).

Параметры магнитов приведены в табл. 2. Чтобы обеспечить достаточную апертуру для инжектируемого пучка и сохранить 3-кратную симметрию кольца, 3 квадруполья в центре каждого суперпериода имеют увеличенную апертуру с диаметром 84.6 мм.

Таблица 2: Магниты структуры

Дипольный магнит		D
Длина по полю		2.2 м
Радиус поворота		4.2017 м
Угол поворота		30 deg
Поле, 50/800 МэВ		0.2464/1.1617 Т
Скорость роста поля		2.615 Т/с
Зазор		64 мм
Квадруполь		QF QD
Длина по полю	0.230	0.230 м
Отношение $G/(B\rho)$	1.5956	1.8973 м <sup>-2</sup>
Градиент, 50/800 МэВ	1.656/7.810	1.973/9.304 Т/м
Скорость роста градиента	17.58	20.94 Т/м/с
Диаметр апертуры	75	75 (84.6) мм

Для коррекции орбиты вблизи каждой фокусирующей линзы соответствующего направления установлены 9 вертикальных и 9 горизонтальных дипольных корректоров с индивидуальным питанием. Их интегральная сила 0.0042 Т·м. Перед выводом создается импульсный горизонтальный бамп орбиты. Поэтому дополнительные обмотки 4 корректоров, расположенных вблизи участка вывода, увеличивают их силу до 0.014 Т·м.

Три D-, QF- и QD-цепи питаются независимо, что обеспечивает перестройку рабочей точки в пределах  $\pm 10\%$ . Для коррекции линейной связи бетатронных колебаний предусмотрены 2 косых квадрупольных корректора с интегральным градиентом 0.06 Т. Хроматичность поддерживается вблизи 0 (отрицательной) в течение всего цикла с помощью 3 вертикальных и 3 горизонтальных секступольных корректоров с интегральной силой 12 Т/м.

**Вакуумная система.** Вакуумная камера изготовлена из нержавеющей стали и имеет эллиптическое поперечное сечение с внутренними размерами  $59 \times 87$  мм<sup>2</sup> (вертикальный  $\times$

горизонтальный). Этого достаточно для проведения пучка по уровню  $\pm 4\sigma$ . Толщина стенок 1.5 мм. Сечение вакуумной камеры постоянно по кольцу за исключением небольшого прямолинейного участка ввода вблизи и внутри QD, где камера увеличена до  $59 \times 112$  мм<sup>2</sup>.

Давление остаточного газа составляет  $\lesssim 2 \cdot 10^{-7}$  Торр и обеспечивает  $\lesssim 10\%$  рост эмиттанса из-за рассеяния на остаточном газе. Кольцо и каналы ввода/вывода откачиваются магнито-разрядными насосами со скоростями откачки 100 л/с (7 единиц оборудования), 250 л/с (9) и 400 л/с (1). Предварительный вакуум получается с помощью передвижного поста откачки, оборудованного турбо-молекулярным насосом с производительностью 100 л/с.

**Ускоряющая система.** Используется 1 резонатор с ферритовым заполнением, аналогичный установленному в DESY-III. Диапазон перестройки частоты 3.269–8.763 МГц. Время ускорения 0.4 с (из них 0.3 с приходится на режим с линейным ростом магнитного поля) и соответствует частоте следования циклов 1 Гц. Максимальная скорость набора энергии 0.633 КэВ/оборот. В течение основной части цикла ускорения амплитуда ВЧ-напряжения  $V$  поддерживается постоянной на уровне 3.0 кВ. В конце цикла она снижается до 0.9 кВ, что обеспечивает продольное согласование сгустков при переводе. Предусмотрен режим 100% адиабатического захвата, в течение которого происходит медленное включение  $V$  от 0 до 3.0 кВ за 3 мс после плавного старта  $dB/dt$  от уровня плато инжекции.

**Системы ввода и вывода.** Схемы систем ввода/вывода показаны в правой части рис. 2. Данные их магнитов приведены в табл. 3.

Пучок инжектируется в горизонтальном направлении за 6 оборотов. Импульсные кикерные магниты KMLA, KMLB, KMLB' и KMLA' возбуждают быстрый симметричный бамп замкнутой орбиты. Пучок  $H^-$  проходит через септум SMI в KMLB и сливается с циркулирующим пучком  $H^+$  выше линзы QD. После обдирки в тонкой ( $\lesssim 40$  мг/см<sup>2</sup>) углеродной фольге инжектируемые частицы оказываются на предписанной орбите.

Таблица 3: Магниты систем ввода/вывода.

	KMLA	KMLB	SMI	KME	SME
Длина, м	0.500	0.600	0.300	1.800	0.800
Поле, мТ	73.6	74.5	552	33.7	964
Апертура верт. $\times$ гориз., мм <sup>2</sup>	38 $\times$ 76	52 $\times$ 106	33 $\times$ 46	52 $\times$ 76	30 $\times$ 45
Отклонение, мрад	35.5	43.2	160.0	12.43	158.0
Время спада поля, мкс	2	2	—		
Время подъема поля, нс				65	—

Пучок выводится в горизонтальном направлении за 1 оборот с помощью кикерного (KME) и септумного (SME) магнитов. Центральная линза QD увеличивает отклонение пучка по направлению к SME. Чтобы облегчить требования к KME, с помощью 4 нормальных корректоров DCH возбуждается бамп замкнутой орбиты, приводящий к дополнительному смещению пучка на входе в SMI на 10.6 мм. Время подъема поля в быстром кикере KME позволяет вывести сгусток с длиной  $\lesssim 150^\circ$  (ВЧ).

**Каналы пучков.** План каналов ввода и вывода пучков показан на левом рис. 1.

Длина канала инжекции (от линзы Q04 до QF/2 в бустере) — 21.919 м вдоль трассы пучка. Всего используется 8 квадрупольей, 4 горизонтальных и 2 вертикальных поворотных диполя. Пучок отклоняется на  $60^\circ$  вправо и поднимается на +44 см по высоте от уровня Linac-III в плоскость орбиты бустера. Угол подъема 64.5 мрад относительно горизонта.

Длина канала вывода (от линзы QF/2 в бустере до QD6/2 в промежутке SS#6 кольца DESY-III) равна 74.739 м вдоль трассы. Используются 10 квадрупольей и 5 горизонтальных

поворотных диполей. Пучок направляется на абсорбер при выключенном переключающем диполе МН1. Поворотные магниты МН2–5 идентичны диполям бустера (МН2–4 обеспечивают стандартный поворот на  $30^\circ$ ). Каналы ввода и вывода пересекаются с разведением в 44 см по высоте. Отрезок МН3–МН4 идет параллельно (на расстоянии  $\sim 0.8$  м) имеющемуся каналу от Linac к DESY–III. После магнита МН4 новый канал имеет ту же самую горизонтальную проекцию, что и существующий канал, подлежащий замене.

Каналы ввода/вывода согласованы по амплитудным и дисперсионным структурным функциям с бустером и DESY–III.