

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

621.384.6

**УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ****Ю. М. Адо**

*Некоторые вопросы физики и техники ускорительно-накопительных установок.— Действующие ускорительные и накопительные установки.— О перспективе развития ускорителей.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Для многих направлений современной ядерной физики, и в особенности для физики элементарных частиц, ускорители заряженных частиц являются незаменимым инструментом при исследовании явлений, протекающих внутри атомных ядер и на субъядерных расстояниях. Уникальность ускорителей состоит в том, что они позволяют получать пучки частиц различных типов с заранее заданными характеристиками, что очень важно при расшифровке результатов физических экспериментов. По существу, это и привлекло внимание физиков к ускорителям сразу же после открытия атомного ядра, и с тех пор прогресс науки в изучении структуры материи и развитие ускорителей оказались тесно связанными друг с другом. Очередные проблемы физики стимулировали разработку новых ускорителей и, наоборот, достижения в ускорительной технике открывали новые возможности в экспериментальной физике.

Большое число фундаментальных открытий сделано при исследованиях на ускорителях в диапазоне энергий частиц до 100 ГэВ. К ним, например, относятся установление закона сохранения векторного тока в слабых взаимодействиях; открытие антипротонов, мультиплетов мезонов, различных типов гиперонов; установление различия между электронным и мюонным нейтрино; обнаружение кумулятивного эффекта при столкновении релятивистских ядер; открытие  $J/\psi$ - и  $\Upsilon$ -частиц; доказательство партонной структуры нуклонов; синтезирование трансурановых элементов; синтезирование антивещества (антигелий, антитритий, антидейтерий); установление масштабной инвариантности; открытие Серпуховского эффекта в полных сечениях; открытие  $\tau$ -лептона. Исследования при более высоких энергиях привели к открытию теоретически предсказанных тяжелых промежуточных бозонов  $W^\pm$  и  $Z^0$  с массами примерно 81 и 96 ГэВ/ $c^2$ , являющихся переносчиками слабых взаимодействий.

Полученные данные содержат в себе богатейшую информацию, необходимую для правильного понимания физики элементарных частиц. Открыты принципиально новые особенности микромира, как, например, кварковое строение элементарных частиц, новые квантовые числа: странность, очарование, прелесть, дробный электрический заряд, цветные заряды кварков и глюонов. Исследования взаимодействия цветных зарядов образовали новое направление — квантовую хромодинамику. Открытия последних лет дают

основания для построения общей теории, объединяющей сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия элементарных частиц. Начало этому положено объединением слабых и электромагнитных взаимодействий, возможность которого экспериментально подтверждена обнаружением  $W^\pm$  и  $Z^0$ -бозонов. Сделанные на ускорителях открытия заставляют по-новому подходить к описанию природы на уровне элементарных частиц, и значение их трудно переоценить.

За сравнительно короткое время ускорители заряженных частиц превратились из небольших установок лабораторного типа в крупные сооружения, габариты которых измеряются десятками километров. Взамен простейших способов ускорения предложены новые принципы, открывшие возможности для получения высокоинтенсивных пучков частиц с гигантскими энергиями, диапазона энергий космических лучей. Особенно крупный шаг

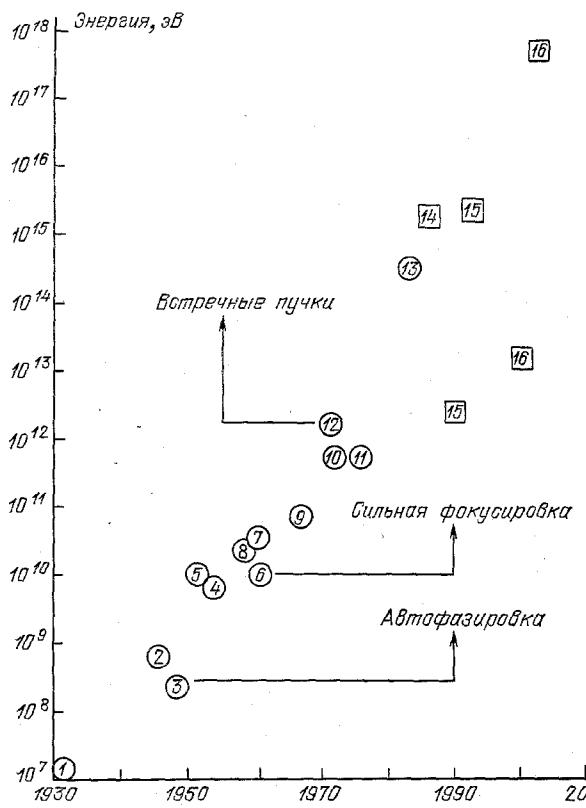


Рис. 1. Рост достигнутой энергии частиц на ускорителях по годам.

1 — циклотрон; 2 — синхропиклotron (СССР, ОИЯИ); 3 — электронный синхротрон (СССР, ФИАН); 4 — протонный синхротрон (США, Беркли); 5 — протонный синхротрон (ОИЯИ). СильноФокусирующие протонные синхротроны: 6 — СССР, ИТЭФ; 7 — США, Брукхейвен; 8 — ЦЕРН; 9 — СССР, ИФВЭ; 10 — США, ФНАЛ; 11 — ЦЕРН. Установки со встречными пучками: 12 — протон-протонные (ЦЕРН); 13 — протон-антипротонные (ЦЕРН). Перспектива: 14 — Tevatron 1 (ФНАЛ); 15 — УНК, неподвижная мишень и встречные пучки (ИФВЭ); 16 — SSC (Superconducting Super Collider), неподвижная мишень и встречные пучки (США).

в достижении больших энергий взаимодействия частиц сделан после практической реализации метода встречных пучков частиц. Наглядной иллюстрацией высоких темпов развития ускорителей может служить рис. 1, на котором показан рост предельно достижимой энергии по годам. На графике отмечены некоторые конкретные ускорительные установки, характерные для соответствующего энергетического рубежа. Для установок со встречными пучками по шкале энергий отложена так называемая эквивалентная энергия, определяемая как энергия частиц одного из пучков в системе координат, где встречный пучок неподвижен.

Независимо от появления новых идей и создания новых типов ускорителей, достижимая в лабораторных условиях энергия частиц возрастала со временем примерно по экспоненциальному закону, и пока нет тенденции к замедлению темпов. За каждые 8 лет, начиная с 1930 г. энергия ускорителей возрастала примерно на порядок величины. Наиболее высокозадачные

частицы получаются на ускорителях синхротронного типа. Наибольшие энергии в системе центра инерции (с. ц. и.) могут быть получены в установках со встречными пучками частиц. Однако это не означает, что надо отдавать им предпочтение. В ускорителях с неподвижными мишнями могут генерироваться пучки разнообразных типов вторичных частиц, с которыми возможно вести эксперименты, недоступные на встречных пучках. Более правильно считать, что ускорители и установки со встречными пучками взаимо дополняют друг друга.

В научных центрах СССР, США, Англии, Швейцарии, ФРГ, Италии, Японии работает свыше двадцати протонных и электронных ускорителей и более десяти установок со встречными пучками частиц с энергиями, превышающими 1 ГэВ. Максимальные энергии частиц, достижимые в лабораторных условиях, приблизились к рубежу 1000 ГэВ (1 ТэВ). Намечается создание ускорителей на энергии до 20 ТэВ и установок со встречными пучками с эквивалентной энергией, достигающей  $8,5 \cdot 10^5$  ТэВ. Для современной физики микромира область энергий порядка нескольких десятков ТэВ в с. ц. и. представляет большой интерес, поскольку при таких энергиях ожидается получение принципиально новых данных о пространстве и времени на длинах  $10^{-16}$ — $10^{-17}$  см. Следует, однако, заметить, что стремление идти все дальше по шкале энергий не должно ослаблять усилия в исследованиях при достигнутых энергиях, где с более совершенными методиками могут быть обнаружены новые фундаментальные явления. Примером этого служат открытия, сделанные на ускорителях ИФВЭ, Брукхейвена (США) и на других, давно работающих установках. Это подчеркивает важность усовершенствования действующих установок и особенно работ, направленных на повышение интенсивности ускоренных пучков частиц. В настоящее время реально стремиться к получению пучков с интенсивностями, превышающими  $10^{13}$  частиц в секунду. Средние мощности таких пучков в ускорителе на энергию 1 ТэВ будут превышать 2 МВт.

Важный класс сильноточных ускорителей составляют так называемые мезонные фабрики, снабжающие экспериментальную ядерную физику высоконапряженными пучками  $\pi$ - и  $\mu$ -мезонов и другими вторичными частицами. Большой интерес, и в частности для релятивистской ядерной физики, представляют пучки ускоренных ядер практически всех элементов, входящих в таблицу Менделеева. Для их получения могут использоваться как линейные, так и кольцевые ускорители. При некоторой модернизации действующих протонных ускорителей на высокие энергии в них возможно также ускорение ядер легких элементов.

Ускорители заряженных частиц стали играть большую роль и в решении ряда важных практических задач. Особенно в последнее время они успешно применяются в медицине, биологии, материаловедении, производстве изотопов, изготовлении электронных микросхем и в других областях науки и техники. Имеется также большое число предложений по использованию сильноточных ускорителей в ядерной энергетике. Для этих целей создаются специальные ускорители, как, например, сильноточные ускорители для генерации интенсивных нейтронных потоков, кольцевые электронные ускорители и накопители как фабрики синхротронного излучения и т. д.

История ускорителей заряженных частиц началась в середине 20-х годов созданием ускорителей прямого действия на энергию до 1 МэВ. К наиболее интересным установкам того времени относятся электростатический генератор Р. Ван-де-Граафа (1931 г.)<sup>1</sup> и каскадный генератор Дж. Кокрофта и Э. Уолтона (1932 г.)<sup>2</sup>. Идея линейного резонансного ускорителя впервые была высказана шведским ученым Г. Изингом в 1924 г.<sup>3</sup>. Действующая модель ускорителя такого типа построена в 1931 г. Э. Лоуренсом и Д. Слоуном<sup>4</sup>. Крупный шаг в дальнейшем развитии ускорителей был сделан американским ученым Э. Лоуренсом, предложившим круговую модификацию линейного резонансного ускорителя, в котором частицы движутся в магнитном поле по

спиральной траектории, проходя много раз через один и тот же ускоряющий промежуток (циклотрон)<sup>5</sup>. До 1944 г. большинство работ по ядерной физике велось на циклотронах и электростатических генераторах на энергии до 25 МэВ. В 1940 г. Д. Керст начал разработку электронного кольцевого ускорителя — бетатрона (автор Р. Видерое, 1928 г.<sup>6</sup>), в котором ускорение частиц производится вихревым электрическим полем. Было построено большое число ускорителей такого типа, однако пройти по энергиям выше нескольких сотен МэВ оказалось невозможным. Только после открытия в 1944 г. советским физиком В. И. Векслером<sup>7</sup> принципа автофазировки частиц ограничения на энергию ускорителей были сняты. Позднее, в 1945 г., аналогичный принцип был предложен американским физиком Э. М. Мак-Милланом<sup>8</sup>. Механизм ускорения заряженных частиц, основанный на этом принципе, заложен во все современные ускорители на высокие энергии, и на его основе проектируются ускорители следующего поколения.

Статья посвящена одному из важнейших направлений в ускорительной технике — ускорителям и накопителям заряженных частиц высоких энергий. Цель ее состоит в том, чтобы дать представление о некоторых особенностях динамики частиц в таких установках (accent делается на кольцевые ускорители), рассказать о наиболее крупных современных ускорительных комплексах и обсудить возможные перспективы развития ускорителей в направлениях повышения интенсивности и энергии пучков ускоренных частиц.

#### 1. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В настоящем разделе кратко излагаются некоторые физические закономерности, положенные в основу работы ускорителей и накопителей заряженных частиц, особенности ускорения больших токов частиц и некоторые технические вопросы создания ускорительных установок на высокие энергии.

##### а) П р и н ц и п а в т о ф а з и р о в к и

Принципом автофазировки частиц определяются условия, при которых возникает продольная устойчивость движения частиц в резонансных ускорителях. Суть его заключается в следующем. Как известно, ускорение заряженных частиц в линейных и циклических ускорителях производится волной электрического поля, бегущей в направлении движения частиц  $s$  с фазовой скоростью  $v_f$ , равной средней скорости частиц. Бегущая электрическая волна либо возбуждается в радиоволноводе, либо создается в. ч. резонаторами, последовательно установленными вдоль  $s$ . По мере увеличения энергии частиц скорость волны  $v_f$  должна возрастать синхронно со скоростью частиц. Очевидно, что это может выполняться только для частицы, находящейся все время в определенной фазе волны  $\Phi_0$ , которая называется равновесной. Частицы, находящиеся в других фазах бегущей волны (неравновесные), будут либо недобирать энергию, либо получать лишнюю и, смеясь по фазе бегущей волны, начнут выходить из синхронизма, попадая даже в тормозящее электрическое поле. Однако, в соответствии с принципом автофазировки, при достаточно большой амплитуде электрического поля смещение по фазе таких неравновесных частиц оказывается ограниченным, и смещение в одну сторону сменяется движением в обратном направлении. Неравновесные частицы начинают совершать колебания по  $\Phi$  вокруг  $\Phi_0$  (фазовые колебания частиц) и за период колебаний набирают такую же энергию, что и равновесные. В направлении  $s$  образуется потенциальная яма, заполненная частицами с центром в  $\Phi_0$ , движущаяся со скоростью бегущей волны. Глубина потенциальной ямы (области устойчивости) определяется частотой и амплитудой электрического поля. Применительно к кольцевым ускорителям сущность автофазировки остается такой же, если не рассматриваются

особенности, возникающие вблизи так называемой критической энергии частиц, где происходит резкая деформация области устойчивости. На орбите кольцевых ускорителей может быть сформировано большое число продольных областей устойчивости. Число их называют кратностью ускорения.

Значение принципа автофазировки состояло в том, что он снял существовавшие принципиальные ограничения на энергию ускоренных частиц, достижимую в ускорителях. Проектная энергия ускорителя стала определяться только экономическими факторами.

За короткий срок на основе принципа автофазировки было построено большое число циклических резонансных ускорителей. По-видимому, первым из них был электронный синхротрон на энергию 30 МэВ, созданный в 1948 г. в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР под руководством В. И. Векслера и П. А. Черенкова.

### б) Поперечная фокусировка частиц

Устойчивость движения частиц в направлениях  $r$  и  $z$ , поперечных к направлению  $s$ , обеспечивается магнитными полями, распределенными вдоль  $z$  и создающими поперечную фокусировку частиц. Для ускорителей на высокие энергии определяющую роль сыграл принцип сильной (жесткой) фокусировки заряженных частиц. Идея его похожа на известный метод построения короткофокусных оптических систем последовательной установкой фокусирующих и дефокусирующих линз. Сильнофокусирующие магнитооптические каналы могут быть построены с большой пропускной способностью по фазовому объему и позволяют канализировать плотные пучки частиц с малым поперечным сечением. Метод сильной фокусировки частиц широко применяется в линейных и кольцевых ускорителях. Создание кольцевых ускорителей на высокие энергии вообще было бы невозможным без сильной фокусировки. Первая работа по сильной фокусировке частиц была опубликована в 1952 г. Э. Курантом, М. Ливингстоном и Г. Снайдером<sup>9</sup>. По неопубликованным данным этот принцип был предложен греческим инженером Н. Кристофилем в 1950 г. Еще раньше, в 1944 г., аналогичный метод фокусировки пучка частиц разрабатывался советским физиком В. С. Фурсовым (неопубликованный отчет). Интересно отметить, что принцип сильной фокусировки частиц базируется на давно известной теории устойчивости движения, описанного дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами, полученными впервые Э. Матье в 1868 г.<sup>10</sup>.

Современные магнитооптические системы для кольцевых ускорителей делаются с разделенными функциями, когда дипольная составляющая магнитного поля, формирующая замкнутую орбиту, и квадрупольная составляющая, обеспечивающая поперечную фокусировку частиц, создаются разными магнитными элементами. Такое разделение существенно облегчает создание магнитов кольцевых ускорителей и накопителей с заданным изменением формы огибающей пучка частиц вдоль орбиты.

При инъекции частиц в ускоритель производится заполнение частицами областей устойчивости движения по координатам  $s$ ,  $r$ ,  $z$ . В пределах этих областей частицы начинают совершать медленные радиально-фазовые колебания по  $s$  и быстрые бетатронные колебания по  $r$  и  $z$ . Движение их аналогично движению физического маятника. Процесс ускорения можно представить себе как ускоренное движение этих областей вместе с инъектированными в них частицами. Для сохранения частиц необходимо, во-первых, производить ускорение достаточно медленно, чтобы частицы успевали набирать заданную энергию за период фазовых колебаний, и, во-вторых, устранить влияние различных возмущающих факторов, приводящих к росту амплитуд колебаний частиц, которые они совершают в пределах областей устойчивости. В кольцевых ускорителях отличие магнитного поля от идеального приводит к появлению сил, действующих на частицы с периодом,

кратным периоду обращения частиц по орбите. При частотах, близких к резонансным значениям частот колебаний частиц, может наступать раскачка их амплитуд, возрастание эффективного эмиттанса пучка и потери частиц на стенах вакуумной камеры ускорителя. Резонансные частоты бетатронных колебаний могут быть рассчитаны из соотношения

$$k_r Q_r + k_z Q_z = K, \quad (1)$$

где  $Q_r$  и  $Q_z$  — частоты бетатронных колебаний, выраженные в числе длин волн, укладывающихся на орбите;  $k_r$ ,  $k_z$  и  $K$  — целые числа.

Вид соотношения (1) показывает, что при любом выборе  $Q_r$  и  $Q_z$  (рабочая точка) всегда найдется тройка чисел  $k_r$ ,  $k_z$  и  $K$ , при которых вблизи рабочей точки пройдет какой-либо резонанс. Однако силы резонансов и соответственно степень их воздействия на частицы быстро падают с ростом порядка резонанса  $|k_r| + |k_z|$ . Практически оказывается достаточным подавление резонансов до 4-го порядка. Наибольшую опасность представляют целые резонансы  $Q_{r,z} = K$ , искажающие орбиту, и параметрические  $2Q_{r,z} = K$ . Влияние резонансов третьего и четвертого порядков  $2Q_{r,z} + Q_{z,r} = K$  и  $2Q_{r,z} + 2Q_{z,r} = K$  проявляется в сильноточных ускорителях и установках со встречными пучками частиц, когда под действием собственного электромагнитного поля пучка частоты бетатронных колебаний приближаются к этим резонансам (см. (2)).

Проблема подавления резонансов бетатронных колебаний является одной из главных в ускорительной технике. Большие ускорители оснащаются сложными системами коррекции, воздействующими на основные характеристики магнитного поля (гармонические по орбите составляющие дипольных и квадрупольных магнитных полей, нелинейности магнитного поля и т. д.).

### в) Влияние электромагнитного поля пучка на динамику частиц

Для исследований редких событий в физике высоких энергий и ряда прикладных задач необходимо иметь высокоинтенсивные пучки ускоренных частиц. В современных кольцевых ускорителях и накопителях токи частиц на орбитах достигают десятка ампер, а запасенная в пучках энергия превышает сотни мегаджоулей. Электромагнитные поля пучков, воздействуя на отдельные частицы и пучки в целом, меняют динамику ускорения и могут ограничивать величину токов частиц на орбите. В поперечных к орбите направлениях на частицы действуют дефокусирующая сила от электрического поля заряда пучка и фокусирующая сила от магнитного поля тока пучка. Результирующая сила оказывается дефокусирующей (от орбиты). Это ослабляет силы фокусировки, создаваемые квадрупольными составляющими магнитного поля ускорителя, и уменьшает частоты бетатронных колебаний  $2Q_{r,z}$ , смешая их к опасным резонансным значениям, определяемым формулой (1). При равномерном распределении плотности электрического заряда в пучке по  $r$  и  $z$  и без учета сил изображения пучка в проводящих стенах вакуумной камеры величина сдвига частот бетатронных колебаний рассчитывается по формуле<sup>11</sup>

$$\Delta Q_{r,z} = -\frac{r_0 R N B}{\pi \delta_{r,z} (\delta_{r,z} + \delta_{z,r}) \beta^2 \gamma^3 Q_{r,z}}, \quad (2)$$

где  $r_0 = q^2/M_0 c^2$  — классический радиус ускоряемых частиц;  $R$  — радиус орбиты;  $N$  — число частиц на орбите;  $B$  — фактор группировки частиц, равный отношению плотности частиц в густоте к средней плотности по орбите;  $2\delta_{r,z}$  — поперечные размеры пучка по  $r$  и  $z$ ;  $\gamma$  — релятивистский фактор;  $\beta = v/c$ ;  $v$  — скорость частиц.

Для протонного синхротрона ИФВЭ на энергию 70 ГэВ при энергии инъекции 100 МэВ максимальный сдвиг  $\Delta Q$  близок к единице при  $N =$

$= 6 \cdot 10^{12}$ . Величину  $N$ , при которой  $\Delta Q = 1$ , следует считать предельной для данного ускорителя, поскольку при дальнейшем увеличении числа ускоряемых частиц частоты бетатронных колебаний неизбежно должны попасть в зону действия целочисленных резонансов.

Анализ формулы (2) позволяет дать рекомендации на увеличение интенсивности ускоренного пучка частиц. Например, роль собственного электромагнитного поля при ускорении частиц можно снизить, повысив жесткость поперечной фокусировки, уменьшая длину волны бетатронных колебаний  $2\pi R/Q$ . Наиболее радикальный путь повышения интенсивности пучков ускоренных частиц в действующих ускорителях заключается в переходе к более высокой энергии инжекции ( $N \sim \beta^2 \gamma^3$ ). Так, например, в ЦЕРНе в протонном синхротроне на энергию 28 ГэВ энергия инжекции поднята с 50 МэВ до 800 МэВ; в ускорителе ИФВЭ предполагается увеличить энергию инжекции со 100 МэВ до 1,5 ГэВ.

В продольном направлении  $s$ , благодаря уменьшению плотности частиц вдоль сгустка к его краям, возникает продольное электрическое поле, действующее на частицы аналогично внешнему ускоряющему напряжению. При достигнутых интенсивностях пучков оно также начинаетказываться на динамике частиц и может даже нарушать автофазировку частиц. Особенно сильное влияние на режим ускорения электрическое поле оказывает в районе критической энергии, где оно возрастает из-за сильного сжатия сгустков частиц в продольном направлении.

Собственное электромагнитное поле пучка ускоряемых частиц вызывает целый ряд других явлений в ускорителях, которые становятся опасными при ускорении больших токов. К ним относятся различного вида когерентные неустойчивости пучка, возникающие в результате взаимодействия тока пучка ускоряемых частиц с током изображения пучка в проводящих стенках вакуумной камеры, как, например, так называемая резистивная неустойчивость или неустойчивость вследствие конечной электрической проводимости стенок вакуумной камеры. Нестабильность продольных колебаний может возникать также при взаимодействии пучка частиц с электромагнитными шарами, которые он возбуждает в различных полостях вакуумной камеры, резонирующих на частотах, близких к частотам, кратным частоте обращения частиц по орбите. Если не принимать специальных мер по уменьшению шунтовых сопротивлений резонаторов самой ускоряющей системы, то они также могут оказаться причиной такой нестабильности.

Одно из явлений в циклических ускорителях получило название неустойчивости отрицательной массы. Возникновение ее связано с продольным электрическим полем, которое появляется при возникновении флюктуации плотности по координате  $s$ . Частицы, находящиеся впереди возникающего уплотнения, будут набирать энергию, а частицы позади него замедляться. Продольное движение частиц с импульсом  $p$  относительно равновесной фазы  $\phi_0$  описывается дифференциальным уравнением маятника с эффективной массой

$$M = M_0 \frac{\gamma^3}{1 - \alpha \gamma^2},$$

где  $\alpha = (p/R) dR/dp$  — коэффициент расширения орбит<sup>12</sup>. При  $\alpha \gamma^2 > 1$ , т. е. после критической энергии,  $M < 0$ , и набор энергии приводит к уменьшению угловой скорости движения частицы по орбите, а потеря энергии — к ее увеличению. Таким образом, частицы, находящиеся как впереди уплотнения, так и позади него, будут «тягиваться» в уплотнение, увеличивая начальную неоднородность. Возникшее в каком-либо месте пучка уплотнение будет инициировать появление уплотнений по всей длине пучка. Расстояние между уплотнениями будет порядка поперечного сечения размера вакуумной камеры.

Таким образом, для получения высокointенсивных пучков частиц необходимо устранять большое число эффектов, нарушающих механизм ускоре-

ния. Для этих целей в ускорительной технике применяются сложные системы подавления нестабильных мод поперечных и продольных колебаний, вводится дополнительный разброс частот колебаний частиц для использования затухания Ландау<sup>13</sup>, корректируются резонансы бетатронных колебаний.

### г) Сверхпроводимость в ускорительной технике

Размеры кольцевых ускорителей определяются радиусами кривизны траектории частиц  $R$ , какие можно получить в магнитных полях с индукцией  $B$ :

$$R = \frac{pc}{qB}. \quad (3)$$

В обычных электромагнитах индукция магнитного поля ограничивается насыщением железа и не может превышать 2 Тл. Радиус кривизны орбиты протонов в ускорителе на энергию 1000 ГэВ должен быть больше 1,7 км, а периметр орбиты с учетом прямолинейных промежутков составит примерно 12 км. При таких размерах большое значение приобретает проблема снижения мощности, потребляемой ускорителями от энергосети. Средние мощности крупных ускорительных комплексов достигают сотен мегаватт. В последнее время интенсивно ведутся разработки магнитов со сверхпроводящими обмотками, в которых полностью устраняются омические потери энергии. В вариантах сверхпроводящих магнитов, где магнитное поле формируется токонесущими сверхпроводящими нитями, его предельная величина определяется критическим значением магнитной индукции, характерным для выбранного сверхпроводника.

Создание ускорителей на высокие энергии с использованием сверхпроводимости становится вполне реальной задачей при хорошо отработанной технологии изготовления сверхпроводящих магнитов, обеспеченности сверхпроводниками с параметрами, необходимыми для работы в переменных магнитных полях, и при достаточно развитой криогенной технике. Сокращение размеров ускорителей за счет повышения  $B$  в несколько раз может дать большой экономический эффект. Первый ускоритель на сверхпроводящих магнитах создан в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми в США на энергию 1000 ГэВ.

### д) Встречные пучки частиц

Качественно новый подход в достижении больших энергий наметился в середине 50-х годов, когда были найдены технические пути реализации известного ранее метода встречных пучков. В обычных ускорителях исследуется взаимодействие ускоренных частиц с неподвижной мишенью, и на изучение какого-либо процесса, связанного с рассеянием частиц или рождением новых частиц, идет только часть их энергии. Большая ее часть тратится на движение центра инерции налетающей и покоящейся частиц.

Полезная энергия  $\tilde{W}$ , которая может участвовать в реакции взаимодействия двух одинаковых частиц с энергией покоя  $M_0c^2$ , зависит от энергии налетающей частицы  $W_0$  следующим образом:

$$W = 2M_0c^2 \left( \sqrt{1 + \frac{W_0}{2M_0c^2}} - 1 \right) \quad (4)$$

Например, при столкновении протона, ускоренного до энергии 100 ГэВ, с покоящимся протоном ( $M_0c^2 = 938 \text{ МэВ}$ )  $W = 12 \text{ ГэВ}$ . При столкновении одинаковых частиц с равными энергиями  $W_0$  в реакцию может идти их суммарная энергия  $2W_0$ , поскольку центр инерции покоятся. Показательна величина так называемой эквивалентной энергии  $W_e$ , которую должны иметь частицы при соударении с неподвижной частицей, когда полезная энергия

становится равной энергии сталкивающихся частиц. Для релятивистского случая

$$W_0 = 2 \frac{W_0^2}{M_0 c^2}. \quad (5)$$

Для сталкивающихся протонов с  $W_0 = 100$  ГэВ  $W_0 = 21\,400$  ГэВ. Методика сталкивающихся пучков получила всеобщее признание после того, как в 1956 г. Д. У. Керст обратил внимание на возможность получения достаточно плотных сталкивающихся пучков в сильнофокусирующих магнитных структурах<sup>14</sup>. С тех пор это направление стало интенсивно разрабатываться, и сейчас на встречных пучках частиц успешно ведутся исследования по физике элементарных частиц при энергиях, недоступных в ускорителях с неподвижными мишениями. Число событий изучаемого процесса в единицу времени  $\eta$  пропорционально сечению этого процесса  $\sigma$ :  $\eta = L\sigma$ . Коэффициент пропорциональности  $L$  характеризует эффективность установки со встречными пучками и называется светимостью установки. Для кольцевых установок с непрерывными пучками  $L$  выражается через параметры пучков следующим образом<sup>15</sup>:

$$L = \frac{N_1 N_2}{c S T^2} l_0 (\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}), \quad (6)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  — числа частиц во встречных пучках;  $S$  — площадь поперечного сечения пучков в месте встречи;  $T$  — период обращения частиц по орбите;  $l_0$  — протяженность экспериментальной зоны вдоль орбиты.

Для установок со встречными пучками, состоящими из сгустков частиц, следящих с частотой  $f$ , выражение для светимости удобно записать в виде

$$L = \frac{n_1 n_2}{S} f m, \quad (6')$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — количества частиц в отдельных сгустках;  $m$  — число мест столкновений (регистрирующая аппаратура охватывает всю область взаимодействия).

Из этих выражений видно, что для достижения высокой светимости необходимо повышать интенсивность пучков встречных частиц и уменьшать поперечные сечения пучков в месте встречи.

Ускорительная техника располагает интенсивными источниками электронов и протонов, и поэтому задачи создания электрон-электронных, протон-протонных или электрон-протонных встречных пучков с достаточной светимостью решаются сравнительно простыми методами. Для осуществления  $e^-e^-$ - и  $p-p$ -столкновений требуется сооружение двух кольцевых накопительных установок с противоположным направлением движения частиц, орбиты которых пересекаются в одном или нескольких местах. Прямых источников античастиц нет. Для генерации  $e^+$  используется рождение пар  $e^-e^+$  гамма-квантами тормозного излучения электронов, ускоренных до энергии десятков или сотен МэВ. Антипротоны получают в парах с протонами при облучении вещества протонами, ускоренными до энергии порядка десятков ГэВ. Энергетический порог рождения пары  $p-p$  примерно 5,6 ГэВ или около 2 ГэВ в с. ц. и. (см. (4)). Эффективность генерации античастиц очень низкая, и для получения достаточно интенсивных пучков частиц требуется их длительное накопление путем последовательной инъекции в накопительные установки большого числа порций  $e^+$  или  $p$  до получения необходимых токов на орбитах.

Механизмы накопления легких и тяжелых частиц принципиально отличаются друг от друга. Движение легких частиц в кольцевых установках сопровождается электромагнитным излучением (синхротронное излучение), мощность которого  $P$  быстро растет с энергией<sup>16</sup>:

$$P = \frac{2}{3} \frac{q^2 c}{R^2} \gamma^4. \quad (7)$$

Синхротронное излучение вызывает затухание амплитуд колебаний частиц, и пучок сжимается как в реальном, так и в фазовом пространстве. Этим создаются условия для многократной инъекции частиц в одно и то же фазовое пространство ускорителя. Ограничение на увеличение фазовой плотности частиц, следующее из теоремы Лиувилля, снимается, и накопление  $e^+$  не вызывает принципиальных трудностей. Для антiproтонов величина  $P$  на несколько порядков меньше, и накопление может производиться только с одновременным возрастанием фазового объема пучка. Для получения плотных антiprotonных пучков необходимо вводить принудительное сжатие фазового объема пучка, или, как принято говорить, необходимо «охлаждать» пучок. Оригинальный и эффективный механизм электронного охлаждения пучков антiproтонов или других ионов предложен Г. И. Будкером<sup>17, 18</sup>. Физическая сущность электронного охлаждения следующая. На каком-либо прямолинейном участке орбиты в продольном направлении через пучок тяжелых частиц проpusкается электронный пучок со скоростью, равной средней продольной скорости ионов. Возникающее при этом кулоновское рассеяние электронов на ионах, которое при малых относительных скоростях идет с большим сечением, приводит к интенсивному обмену импульсами. Электронный пучок формируется с существенно меньшим импульсным разбросом, чем у ионного, и передача импульсов идет преимущественно от ионного пучка к электронному. Другими словами, электронный пучок нагревается, а ионный охлаждается. После взаимодействия с ионным пучком электроны выводятся из накопителя и уносят часть энергии поперечных и продольных колебаний. Таким путем нарушается консервативность ионного пучка. Холодный электронный пучок непрерывно циркулирует через область взаимодействия с ионами.

Другой метод охлаждения пучков тяжелых частиц предложен в ЦЕРНе Ван-дер-Майером<sup>19</sup>. Метод получил название стохастического и основан на отборе энергии колебаний частиц с помощью внешних электрических полей. В сгустках частиц, врачающихся в накопителях по замкнутой орбите, возникают случайные флуктуации плотности частиц, приводящие к появлению областей с повышенной плотностью. Колебания этих уплотнений относительно орбиты могут быть зарегистрированы с помощью электростатических электродов с достаточно большой полосой пропускания (порядка гигагерц). Если теперь, используя сигнал с электрода, на каком-либо участке орбиты приложить поперечное электрическое поле в противофазе поперечным склонностям этих уплотнений, то их колебания можно погасить (охладить). Воздействуя таким образом на пучок длительное время, можно сжать его в целом. Поскольку метод использует флуктуации плотности частиц, эффективность его падает с ростом числа частиц в накопителе и время охлаждения пучков достигает десятков часов. Предложенные методы охлаждения пучков тяжелых частиц положены в основу создания установок со встречными pp-пучками.

Для проведения физических исследований на встречных пучках требуются прямолинейные участки орбиты частиц, длина которых при больших энергиях достигает сотен метров и более. Магнитная оптика этих участков рассчитывается таким образом, чтобы в месте столкновений частиц поперечные размеры встречных пучков имели минимальные значения. Вместе с использованием охлаждения пучков античастиц это позволяет в одном кольцевом накопителе получать встречные пучки частиц и античастиц с большой светимостью.

Метод встречных пучков предъявляет высокие требования к вакууму по всей длине орбиты и в особенности в местах установки регистрирующей аппаратуры. Это необходимо для достижения большого времени жизни частиц, чтобы не повторять часто операцию накопления частиц, и для устранения фона в регистрирующей аппаратуре, возникающего из-за взаимодействия накопленных частиц с ядрами остаточного газа. Например, в протон-

протонных накопительных кольцах ЦЕРНа (ISR) на энергию 31,4 ГэВ среднее давление остаточного газа в вакуумной камере  $\sim 5 \cdot 10^{-10}$  Па, а в зоне столкновений меньше  $1,3 \cdot 10^{-10}$  Па. Накопление протонов ведется в течение 2—4 часов. Ток на орбите возрастает до 35 А ( $7 \cdot 10^{14}$  протонов) и держится на этом уровне более 50 часов.

Создание кольцевых ускорительных и накопительных установок электронов и позитронов на большие энергии сильно осложняется наличием мощного синхротронного излучения частиц. Для уменьшения мощности излучения установки проектируют с большими радиусами (малые магнитные поля). Примером этого служит сооружаемое в ЦЕРНе электрон-позитронное накопительное кольцо LEP на энергию 200 ГэВ в системе центра масс с периметром орбиты 27 километров<sup>20</sup>. Потери энергии на излучение за оборот составят 2,56 ГэВ. При токах частиц на орбите 9,15 мА мощность излучения двух пучков достигает 47,4 МВт. Для компенсации таких потерь энергии в кольцо устанавливается мощная высокочастотная система. По-видимому, строительство кольцевых машин для легких частиц на еще более высокие энергии нецелесообразно. Надо искать пути использования линейных ускорителей, где излучения практически нет. Например, если взять темпы ускорения 11 МэВ/м, достигнутые в Стенфордском линейном ускорителе (США)<sup>21</sup>, то длина линейного ускорителя на энергию 100 ГэВ должна быть около 9 км, что по современным масштабам немногого. Имеются также перспективы увеличения темпов ускорения. Один из путей предложен в работе<sup>22</sup>. Авторами предлагаются резонансные высокочастотные структуры, в которых напряженности электрических полей близки к пределу по вакуумному пробою и автоэлектронной эмиссии. Ожидаемые темпы ускорения в таких структурах превышают 100 МэВ/м.

Встречные  $e^-e^-$ - и  $e^+e^-$ -пучки могут быть реализованы с помощью двухлинейных ускорителей, «стреляющих» навстречу друг другу, как это заложено в проекте ВЛЭПП<sup>19</sup>. Такой вариант рассматривался также М. Тигнером в 1965 г.<sup>23</sup>. Основная проблема состоит в получении достаточной светимости. Светимость  $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{s}^{-1}$  предполагается достигнуть сжатием площади поперечного сечения пучка в месте встречи до  $10^{-7} \text{ см}^2$ .

В развитие метода встречных пучков частиц сделан большой вклад в ИЯФ СО АН СССР Г. И. Будкером, А. А. Наумовым и А. И. Скрипинским с сотрудниками. Начиная с 1965 г., в ИЯФ были построены накопитель ВЭП-1 с электронными встречными пучками на энергии 160 МэВ и накопители со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2 на энергию 700 МэВ и ВЭПП-4 на энергию 7 ГэВ. К числу первых экспериментов по реализации встречных электрон-позитронных пучков принадлежат также работы, выполненные в ФИАНе в 60-х годах<sup>24</sup>.

#### е) Каскадная схема построения ускорительных комплексов

Ускорительные комплексы на большие энергии выгодно строить по каскадному принципу, когда конечная энергия достигается после ускорения в нескольких, последовательно работающих ускорителях, каждый из которых служит инжектором для последующего. Это позволяет использовать адиабатическое сжатие размеров ускоряемого пучка частиц с ростом их энергии и проектировать элементы магнитной оптики последующих ускорителей с меньшими размерами межполюсного пространства. В результате достигается большая экономия капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Каскадная схема необходима также для того, чтобы избежать малых индукций магнитного поля при инъекции, когда на топографию магнитных полей оказывают сильное влияние остаточные магнитные поля, возникающие в магнитах с железными сердечниками из-за гистерезиса и в сверхпроводящих магнитах за счет остаточных «замороженных» токов.

На рис. 2 показана каскадная схема ускорителей, заложенная в проект протонного ускорительно-накопительного комплекса (УНК) ИФВЭ на энергию 3000 ГэВ<sup>25</sup>.

Предварительное ускорение протонов производится в линейном ускорителе с квадрупольной фокусировкой ускоряющим электрическим полем, разработанном В. А. Тепляковым и И. М. Капчинским<sup>26</sup>. Возможность создания квадрупольных электрических полей путем изменения конфигурации высокочастотного поля в ускоряющих промежутках линейного ускорителя впервые рассмотрена В. В. Владимирским<sup>27</sup>. В быстроциклическом синхротроне (первый каскад) частицы ускоряются до энергии 1,5 ГэВ и инжектируются в протонный синхротрон второго каскада, где проектное число

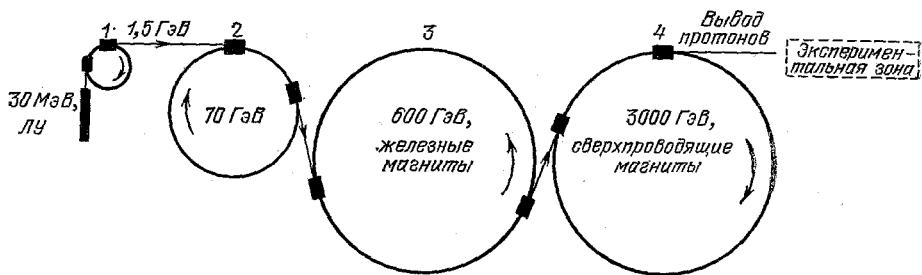


Рис. 2. Каскадная схема ускорительно-накопительного комплекса ИФВЭ.  
Ускорители на энергию 600 и 3000 ГэВ сооружаются в одном туннеле

частиц достигается при тридцатикратной инжекции на протяжении 1,5 с. В течение этого времени магнитное поле ускорителя второго каскада поддерживается постоянным. В следующий ускоритель протоны переводятся после их ускорения до энергии 70 ГэВ. Одной порцией ускоренных частиц заполняется часть орбиты ускорителя третьего каскада. Для заполнения частицами всей орбиты ускорителя необходима 12-кратная инжекция, осуществляемая в течение 71,5 с. После ускорения в третьем каскаде до энергии 600 ГэВ протоны переводятся в сверхпроводящий ускоритель и ускоряются до конечной энергии 3000 ГэВ. Ускорители на энергии 600 и 3000 ГэВ будут сооружаться в одном кольцевом туннеле. Это позволяет в проекте УНК также предусмотреть возможности для получения встречных протон-протонных пучков на базе этих ускорителей с энергией 2,2 ТэВ в с. ц. и. (табл. I).

Таблица I  
Некоторые параметры УНК

Каскады:	1	2	3	4
Длина орбиты, м	99,16	1484	20772	20772
Энергия протонов, ГэВ	1,5	70	600	3000
Длительность цикла ускорения, включая накопление, с	6,5	6,5	78	78
	между сериями по 30 циклов			
Число протонов на орбите	$1,7 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{14}$
Энергия, запасенная пучком, МДж	0,002	0,56	19	286
Размеры вакуумной камеры (горизонтальный и вертикальный), см	$14 \times 6,1$	$20 \times 11,4$	$12 \times 6,5$	$7 \times 6$

Современный этап развития ускорителей характерен широким использованием электронно-вычислительных машин для целей диагностики технологических систем, параметров пучка ускоряемых частиц и, что очень важно, для управления ускорителем<sup>28</sup>. Особенно большой эффект это дает

при оптимизации работы ускорительного комплекса по большему числу параметров и поддержания с высокой точностью режимов работы систем ускорителя. Большую роль ЭВМ играют также при автоматизации управления сложной физической аппаратурой в экспериментах с пучками частиц на ускорителях. Работы по кибернетизации ускорительных комплексов были начаты в 1960 г. А. Л. Минцем, А. А. Васильевым, В. А. Петуховым, С. М. Рубчинским, Э. Л. Бурштейном<sup>29</sup>.

## 2. ДЕЙСТВУЮЩИЕ УСКОРИТЕЛЬНЫЕ И НАКОПИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

К ускорителям и накопителям заряженных частиц на высокие энергии принято относить установки на энергию более 1 ГэВ. До внедрения в ускорительную технику жесткой фокусировки частиц строились слабофокусирующие протонные синхротроны. Энергии частиц в таких машинах не превышали 10 ГэВ. К наиболее мощным ускорителям этого класса, действующим в настоящее время, относятся следующие (указывается год запуска):

- Синхрофазotron (10 ГэВ), ОИЯИ, Дубна, 1957 г. В дальнейшем модернизирован<sup>30</sup> для ускорения легких ядер с  $Z/A = 0,5$ ,
- Беватрон (6,2 ГэВ), Лоуренсовская лаборатория Калифорнийского университета, Беркли, США, 1954 г.
- «Сатурн» (3 ГэВ), Национальная лаборатория в Сакле, Франция, 1958 г. В 1978 г. реконструирован на сильную фокусировку.

Принцип жесткой фокусировки частиц применен в следующих протонных синхротронах:

- У-10 на энергию 10 ГэВ, Института теоретической и экспериментальной физики, Москва, 1961 г.
- Синхротрон с переменным градиентом (AGS) на энергию 33 ГэВ, Брукхейвенской национальной лаборатории, США, 1960 г.
- Протонный синхротрон ЦЕРНа (CPS) на энергию 28 ГэВ, Швейцария, 1959 г.
- KEK PS на энергию 12 ГэВ, Национальная лаборатория физики высоких энергий, Япония, 1976 г.

Самые крупные жесткофокусирующие протонные ускорители:

- Протонный синхротрон на энергию 70 ГэВ Института физики высоких энергий, Серпухов, Протвино, 1967 г.
- Большой (гигантский — super) протонный синхротрон (SPS) на энергию 450 ГэВ, ЦЕРН, Швейцария, 1976 г.
- Синхротрон 200/500 ГэВ, Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми, США. Запущен в 1972 г. на энергию 200 ГэВ. Энергия 500 ГэВ достигнута в 1976 г. В июле 1983 г. осуществлен запуск ускорителя DOUBLER с магнитной оптикой на сверхпроводящих магнитах с индукциями полей до 4 Тл. Его проектная энергия 1000 ГэВ. В настоящее время протоны ускоряются до энергии 800 ГэВ.

К числу ускорителей на высокие энергии относится также уникальный линейный электронный ускоритель SLAC на энергию до 33,4 ГэВ, построенный в Стэнфорде (США) в 1966 г.

Накопители со встречными пучками частиц либо строятся отдельно с использованием ускорителей как инжекторов, либо условия для получения встречных пучков частиц и античастиц создаются непосредственно в ускорительных установках, как это предлагалось в работе<sup>31</sup>.

Примерами могут служить установки ЦЕРНа:

- ISR — накопительное кольцо со встречными протон-протонными и протон-антипротонными пучками с энергиями 31,4 ГэВ (1971 г.).
- Протон-антипротонные встречные пучки на энергию 270 ГэВ в протонном синхротроне SPS.

Самыми крупными действующими накопительными установками со встречными электрон-позитронными пучками в настоящее время являются:

- PETRA, энергия частиц 22,5 ГэВ, Гамбург, ФРГ, 1978 г.
- PEP, энергия частиц 18 ГэВ, Стэнфорд, США, 1980 г.

Далее дается краткое описание некоторых ускорительных и накопительных установок заряженных частиц, которые составляют основу экспериментальной базы ведущих научных центров по физике высоких энергий.

### а) Протонный синхротрон ИФВЭ на энергию 70 ГэВ<sup>32</sup>

Ускоритель схематически показан на рис. 3, где даны его основные габаритные размеры. Орбита частиц, близкая к круговой с периметром 1,5 км, формируется магнитным полем, которое создается электромагнитом, состоящим из 120 отдельных блоков. Магнитное поле в межполюсном пространстве каждого блока содержит дипольные и квадрупольные компоненты,

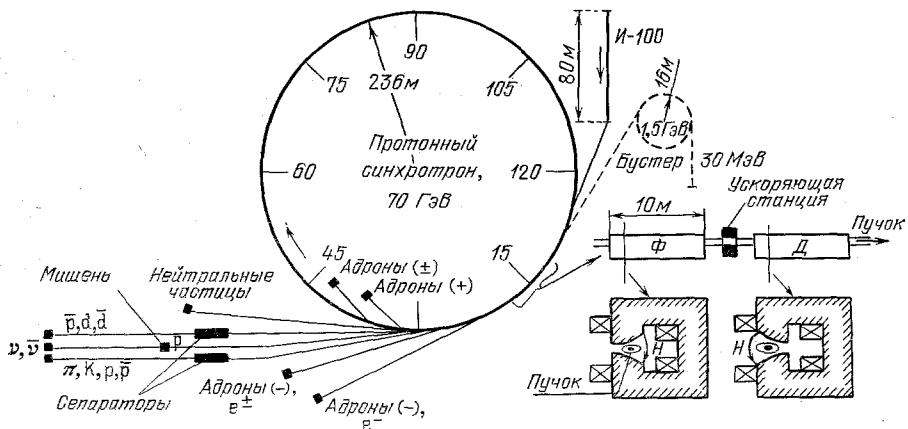


Рис. 3. Схема протонного синхротрона ИФВЭ на энергию 70 ГэВ

необходимые для поворота частиц и обеспечения сильной поперечной фокусировки частиц ( $Q_{r,z} = 9,8$ ). Требуемая топография магнитного поля задается формой полюсов электромагнитов. Фокусирующие и дефокусирующие блоки чередуются вдоль орбиты, как показано на рисунке. В промежутках между блоками размещаются высокочастотные станции для ускорения частиц, устройства вывода частиц из ускорителя и различная диагностическая аппаратура. Предварительное ускорение протонов производится в линейном ускорителе И-100 до энергии 100 МэВ. С помощью поперечных к орбите импульсных электрических полей осуществляется многооборотная инъекция частиц. При токе линейного ускорителя 100 мА на орбите накапливается до  $2 \cdot 10^{13}$  протонов. В соответствии с принципом автофазировки, под действием ускоряющего напряжения, частота которого в 30 раз больше частоты обращения частиц по орбите, происходит группировка частиц на орбите в 30 сгустков (30 областей устойчивости) и ускорение их до конечной энергии. За каждый оборот протоны приобретают примерно 200 кэВ. Время ускорения 2,85 с; путь, проходимый частицами, больше 500 тыс. км. Вывод протонов и вторичных частиц производится на участке кольца между блоками 16 и 36, откуда по магнитооптическим каналам они транспортируются к установкам.

На рис. 4 приведен временной цикл магнитного поля ускорителя, на котором отмечен момент инъекции протонов и схематически показан один из вариантов распределения пучка ускоренных протонов по каналам выведенных частиц. Один сгусток протонов, выведенный из ускорителя на подъеме магнитного поля, используется для формирования пучка частиц выбранного типа, как, например, π-мезонов, K-мезонов, антипротонов. Сначала протонами на внешней мишени генерируется весь возможный набор частиц. Выделение в пространстве частиц с нужными массами производится в специальном

высокочастотном сепараторе после прохождения пучка через протяженный магнитооптический канал, пропускающий частицы с примерно одинаковыми импульсами. Такие «чистые» пучки применяются в физических исследованиях на пузырьковых камерах. В начале плато магнитного поля делается быстрый вывод 19-ти сгустков частиц для генерации пучка нейтрино на внешней мишени. Оставшиеся 10 сгустков после отключения ускоряющего напряжения, благодаря импульсному разбросу, быстро расплываются по периметру

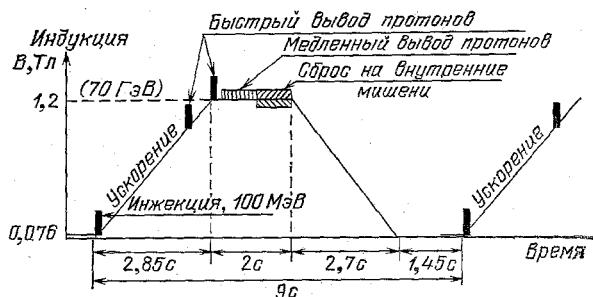


Рис. 4. Временной цикл магнитного поля; распределение ускоренных протонов на физические эксперименты в ИФВЭ

орбиты, и на протяжении половины плато магнитного поля часть пучка специальными системами выводится из ускорителя для экспериментов с внешними мишениями. Оставшаяся часть пучка используется для генерации вторичных частиц на второй половине плато наведением протонов на мишени, установленные внутри вакуумной камеры ускорителя. Раствинутые во времени пучки частиц необходимы для физических экспериментов с электронной методикой. В этом примере протоны расходуются на 5 одновременно проводимых экспериментов. Число ускоряемых протонов за цикл для такого режима превышает  $5 \cdot 10^{12}$ . Ускоренные протоны используются для генерации широкого класса вторичных частиц, перечень которых дается в табл. II. Схематическое расположение каналов пучков частиц показано на рис. 3.

Таблица II

Типы частиц на ускорителе ИФВЭ<sup>33</sup>

Частицы	Диапазон вариации импульса $p$ (ГэВ/с)	Число частиц в цикле ( $\Delta p/p = 10^{-2}$ )	Примечание
Протоны	70	$10^8 - 10^{12}$	Длительность импульса $\tau = 1$ с
		$10^{11} - 4 \cdot 10^{12}$	При $10^{11}$ : $\tau = 5 \cdot 10^{-8}$ с, при $4 \cdot 10^{12}$ : $\tau = 5 \cdot 10^{-6}$ с
Адроны (-)	25—65	$5 \cdot 10^6$ ( $p = 40$ ГэВ/с)	$\tau = 1$ с
Адроны (+)	3—17	$10^8$	То же
Электроны	2—45	$10^5$	»
Позитроны	2—45	$8 \cdot 10^4$	»
Нейтрино и антинейтрино	5—6 (средний)	$5 \cdot 10^9$	$\tau = 5 \cdot 10^{-6}$ ; спектр широкий
Сепарированные пучки для пузырьковых камер:			
π- и K-мезоны, протоны и антипротоны	До 40	$\sim 5$	$\tau \approx 2 \cdot 10^{-6}$ с
дейтероны	10—12	$\sim 5$	То же
антидейтероны	То же	$\sim 0,7$	»
Нейтральные частицы	70	$\sim 10^6$	Полное число частиц по спектру; $\tau = 1$ с

Число вторичных частиц дается на  $10^{12}$  первичных протонов.



Рис. 5. Часть кольцевого электромагнита ускорителя ИФВЭ

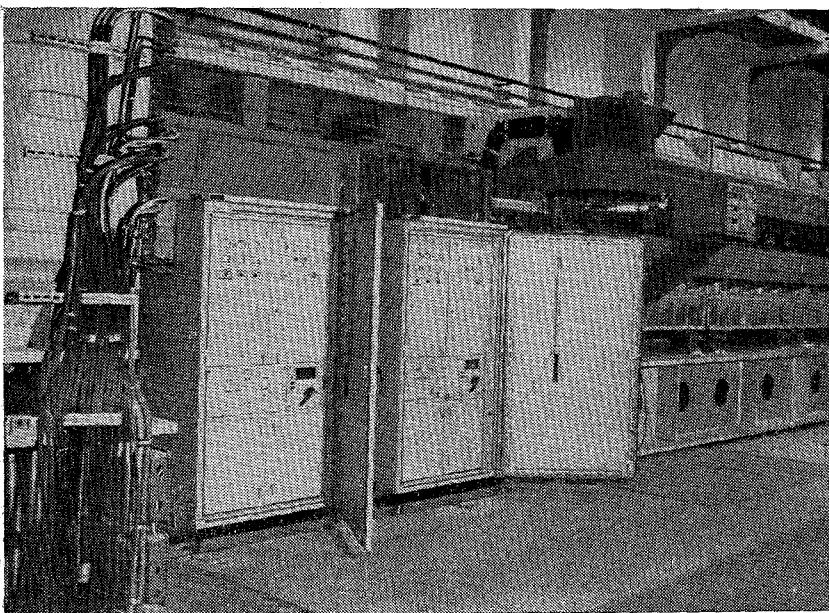


Рис. 6. Две ускоряющие станции.  
В нижней части мощные выходные каскады, в верхней части ВЧ резонаторы

Физические эксперименты на ускорителях отличаются большой трудоемкостью и ведутся в течение длительного времени. Для некоторых экспериментов требуются тысячи часов работы энергоемкого оборудования. Сокращение экспозиций возможно при более высокой интенсивности пучка ускоренных частиц. На ускорителе ИФВЭ предполагается поднять интенсивность пучка до  $5 \cdot 10^{13}$  протонов за цикл путем перехода на инъекцию при энергии 1,5 ГэВ. Новый инжектор представляет собой быстроциклический протонный синхротрон (бустер)<sup>34</sup>, работающий в пакетно-импульсном режиме с частотой 20 Гц. На рис. 3 он вместе с линейным ускорителем на энергию 30 МэВ и каналом инъекции показан пунктиром. За каждый цикл ускорения в бустере будет заполняться одна из продольных областей устойчивости основного ускорителя. Заполнение частицами всех областей устойчивости потребует 30-кратной инъекции. Во время инъекции магнитное поле в основном ускорителе должно поддерживаться неизменным в течение 1,5 с на уровне 0,0386 Тл. На фотографии рис. 5 показана часть кольцевого электромагнита ускорителя. Две из 40 ускоряющих станций показаны на рис. 6. В верхней части ускоряющих станций размещены высокочастотные резонаторы, встроенные в вакуумную камеру ускорителя. Кожух одного из резонаторов открыт, и видны ферритовые пластины, используемые для перестройки собственной частоты резонаторов во время ускорения.

### б) Ускорительно-накопительный комплекс ЦЕРНа<sup>35</sup>

По сравнению с другими научными центрами экспериментальная база ЦЕРНа располагает наибольшим числом ускорительно-накопительных установок. Для ЦЕРНа также характерны высокие темпы развития ускорительной техники. Многокомпонентная и многоцелевая схема комплекса представлена на рис. 7. Первым, в 1959 г., начал работать протонный синхротрон

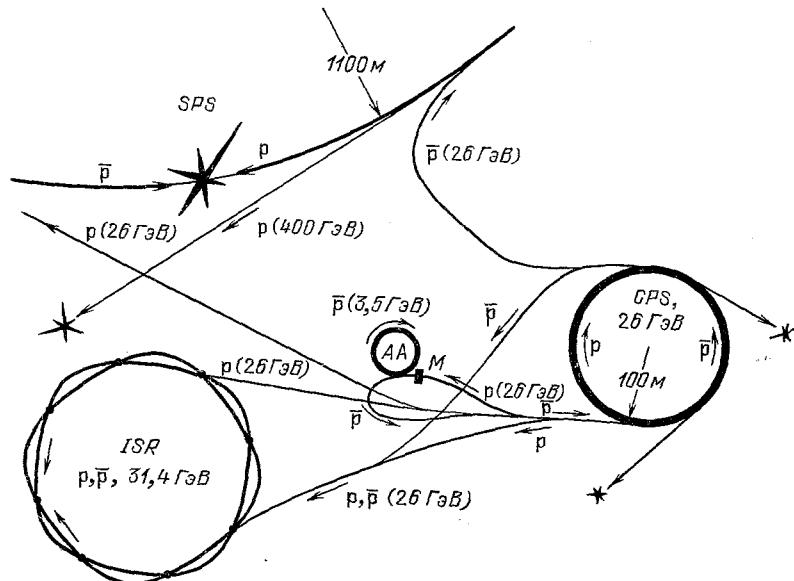


Рис. 7. Схема ускорительно-накопительного комплекса ЦЕРНа.

CPS — ускоритель протонов на энергию 28 ГэВ, инжектор протонов и антипротонов в ISR и SPS; ISR — накопитель сталкивающихся pp- и p-p-пучков с энергиями 31,4 ГэВ; SPS — ускоритель протонов на энергию 570 ГэВ, накопитель сталкивающихся pp с энергией 270 ГэВ

CPS (CERN Proton Synchrotron) на энергию 28 ГэВ. Затем была построена протонная накопительная установка ISR (Intersection Storage Rings), состоящая из двух одинаковых колец с прямолинейными промежутками, пересе-

кающихся в 8 точках. Инжекция частиц из CPS в кольца производится поочередно в противоположных направлениях. После накопления нужных токов частиц и небольшого дополнительного ускорения получают два встречных протонных пучка с энергиями 31,4 ГэВ. Крупный шаг в развитии ускорительно-накопительного комплекса ЦЕРНа был сделан созданием большого протонного синхротрона SPS (Super Proton Synchrotron) на энергию 450 ГэВ. Для инжекции протонов используется ускоритель CPS. Это второй ускоритель, после ускорителя ФНАЛ (США), с такой высокой энергией частиц.

После экспериментального изучения механизмов электронного и стохастического охлаждений протонных пучков стала быстро реализоваться качественно новая, антипротонная программа. Был сооружен антипротонный накопитель AA, играющий в схеме решающую роль, произведена необходимая реконструкция ISR и SPS, создана разветвленная магнитооптическая система транспортировок пучков  $p$  и  $\bar{p}$ . В результате образовался сложный технический комплекс ускорительных установок с широкими экспериментальными возможностями для работы на выведенных пучках частиц из CPS и SPS и на сталкивающихся протон-протонных и протон-антипротонных пучках в ISR и SPS.

Накопление антипротонов в AA производится при энергии 3,5 ГэВ со стохастическим охлаждением пучка. Рождение  $\bar{p}$  происходит в мишени  $M$ , облучаемой пучком протонов, ускоренных в CPS. На  $10^6$  протонов, в нужном для инжекции фазовом объеме, образуется примерно 2 антипротона. Для получения светимости сталкивающихся пучков в SPS  $10^{30} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  необходимо накопить  $6 \cdot 10^{11}$  антипротонов, и при интенсивности CPS  $10^{13}$  протонов в секунду время накопления составляет примерно 3 дня (эффективность накопления 30%). После накопления антипротоны по магнитооптической петле, как показано стрелками, возвращаются в CPS, где ускоряются до энергии 26 ГэВ, затем выводятся и инжектируются либо в SPS, либо в ISR. Энергия

Таблица III  
Ускорители CPS и SPS

Установка	Число ускоряемых протонов	Вторичные пучки частиц	Диапазон импульсов, ГэВ/с
CPS	$1,8 \cdot 10^{13}$ протон/цикл	Протоны	$\leq 28$
	$1,0 \cdot 10^{13}$ протон/с	Антипротоны	$\leq 1,5$
SPS	$2,5 \cdot 10^{13}$ протон/цикл	Протоны, $\pi$ -мезоны	$\leq 14$
	$2,5 \cdot 10^{12}$ протон/с	$\pi^+$ -мезоны	$\leq 2,5$
		Протоны	250–450
		Адроны	$\leq 350$
		Нейтрино	$\leq 275$ (узкий спектр)
		$\mu$ -мезоны	$\sim 30$ (широкий спектр)
		Электроны	$\leq 280$
			$\leq 150$

Таблица IV  
Сталкивающиеся пучки

Установка	Энергия частиц, ГэВ	Ток пучка, А	Светимость, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$
ISR: $p\bar{p}$ -пучки	31,4	50	$5 \cdot 10^{31}$
	31,4	$p : 50$	$10^{29}$
SPS: $p\bar{p}$ -пучки	270	$p : 30$	
		4,35	$10^{30}$

540 ГэВ в системе центра масс сталкивающихся протонов и антипротонов в SPS является наибольшей из достигнутых в настоящее время на ускорительных установках.

В табл. III и IV приведены данные о пучках частиц, которые могут быть получены на установках ЦЕРНы, а также основные характеристики сталкивающихся пучков в ISR и SPS.

**в) Протонные ускорители на энергии 500—1000 ГэВ  
(ФНАЛ, США)<sup>36</sup>**

Национальная ускорительная лаборатория им. Э. Ферми, расположенная недалеко от Чикаго, является одним из крупнейших научных центров США по физике высоких энергий. Построенный там протонный синхротрон на энергию 500 ГэВ хронологически был первым, на котором стали проводиться исследования по физике высоких энергий в диапазоне сотен ГэВ. Применение инжекции протонов с энергиями около 8 ГэВ от быстроциклического бустера значительно ослабило влияние пространственного заряда пучка на динамику ускорения и позволило получать в импульсе до  $3 \cdot 10^{13}$  протонов. При создании магнита ускорителя была применена магнитооптическая система, состоящая из дипольных магнитов, осуществляющих поворот частиц, и квадрупольных линз, обеспечивающих жесткую фокусировку частиц. Система с таким разделением функций оказалось намного более оперативной в управлении ускорителем, чем система с совмещенными функциями (см. ускоритель ИФВЭ), и ее стали использовать в последующих проектах ускорителей на высокие энергии.

В течение последних десяти лет в лаборатории разрабатывался протонный ускоритель DOUBLER на энергию до 1000 ГэВ. Электромагнит ускорителя спроектирован на базе сверхпроводящих дипольных магнитов и квадрупольных линз с обмотками из сплава NbTi. Магниты и линзы, удовлетворяющие жестким требованиям на допуски магнитного поля и пригодные для ускорителя, были созданы после длительной отработки технологии их изготовления. Ускоритель сооружен в том же туннеле, что и базовый ускоритель ФНАЛ, который использован как инжектор протонов при энергии 150 ГэВ. Время ускорения протонов до максимальной энергии ограничено возможностями сверхпроводников и составляет примерно 15 с. Основная программа физических исследований будет выполняться на выведенном пучке протонов. Предусматривается вывод протонов из ускорителя за время до 10 с (медленный вывод) и за время 1 мс (быстрый вывод). Запуск ускорителя осуществлен в 1983 г. В историю ускорительной техники DOUBLER войдет как первый сверхпроводящий ускоритель в ТэВном диапазоне энергий. Ускорительный комплекс ФНАЛ представляет сейчас каскад следующих ускорителей: линейный ускоритель (200 МэВ) — быстроциклический бустерный синхротрон (8 ГэВ) — протонный синхротрон (150—500 ГэВ) — DOUBLER (1000 ГэВ). Некоторые параметры основных ускорительных установок приводятся в табл. V.

Схема на рис. 8 иллюстрирует принятый на ускорителе порядок использования пучка ускоренных протонов в физических экспериментах. Генерация вторичных частиц производится на внешних мишнях. Каналы пучков вторичных частиц разбиты на три направления, образующих мезонную, нейтринную и протонную зоны. Пучок протонов, выведенный из ускорителя с помощью специальных систем, распределяется по этим направлениям с заданной дозировкой. Ведутся также эксперименты непосредственно с внутренним пучком протонов, циркулирующим в камере ускорителя. Для того чтобы возмущение пучка протонов при этом было в допустимых пределах, работы ведутся на очень тонких мишнях, например, газоструйных. Такая методика была впервые использована на ускорителе ИФВЭ. В экспериментальных зонах могут быть получены пучки различных типов вторичных частиц в ши-

Таблица V

## Основные параметры ускорителей ФНАЛ

<b>Базовый протонный синхротрон</b>	
Максимальная энергия протонов	500 ГэВ
Число ускоряемых протонов	$3 \cdot 10^{13}$ протон/цикл
Средний радиус кольца	$3,75 \cdot 10^{12}$ протон/с
Энергия инжекции	1000 м
Максимальная индукция магнитного поля	8 ГэВ
Средняя потребляемая мощность	2,23 Тл
Число циклов ускорения в минуту	40 МВт
Частота бетатронных колебаний $Q$	7,5
	19,4
<b>DOUBLER</b>	
Максимальная энергия протонов	1000 ГэВ
Энергия инжекции	150 ГэВ
Максимальная индукция магнитного поля	4,42 Тл
Число магнитных диполей	774
Число магнитных квадрупольей	216
Частота бетатронных колебаний $Q$	19,4

роких диапазонах по импульсам. Например, адроны: 20—400 ГэВ/с; электроны: 40—300 ГэВ/с; нейтрино: 10—300 ГэВ/с;  $\mu$ -мезоны: 25—270 ГэВ/с;  $\gamma$ -

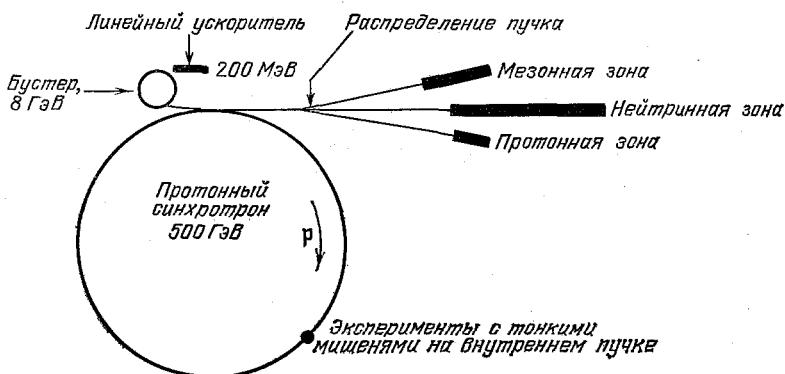


Рис. 8. Схема ускорителя ФНАЛ с разводкой выведенного пучка протонов по тематическим направлениям

кванты: 10—280 ГэВ/с. С вводом в строй сверхпроводящего ускорителя экспериментальные зоны обоготятся вторичными частицами с примерно удвоенными импульсами.

В дальнейших планах развития ускорительного комплекса ФНАЛ предусматривается развитие антипротонной программы. Предполагается сооружение накопителя антипротонов и получение в DOUBLERe встречных протон-антипротонных пучков с энергией 2000 ГэВ в системе центра инерции.

г) Электрон-позитронное накопительное кольцо PETRA<sup>37</sup> (Гамбург, ФРГ)

Установка PETRA (Positron Electron Tandem Ring Accelerator), запущенная в 1978 г., является наиболее мощной среди ускорительно-накопительных установок электронов и позитронов. Недавно в ней получены встречные электрон-позитронные пучки с энергиями в с.ц.и. до 45 ГэВ. Пока эта самая высокая энергия легких частиц, достигнутая в кольцевых ускорителях. В научном центре Гамбурга первым был сооружен электронный синхротрон

DESY (Deutshes Electronen Synchrotron) на энергию 7,5 ГэВ, затем накопительная установка DORIS со встречными электрон-позитронными пучками на энергию 5,1 ГэВ. Схема каскада ускорительных установок показана на рис. 9. Инжекция позитронов в накопитель PETRA осуществляется с использованием синхротрона DESY, работающего с частотой 50 Гц, и накопителя DORIS. Получение позитронов и их предварительное ускорение до энергии

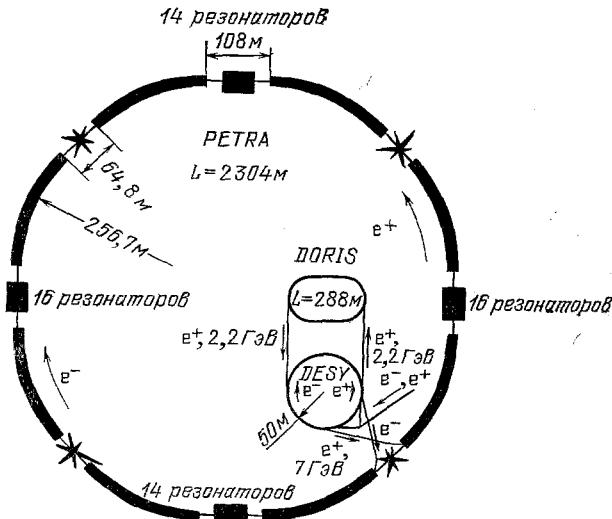


Рис. 9. Электрон-позитронный накопительный комплекс PETRA

300 МэВ происходит в линейном ускорителе. Накопление позитронов ведется в два этапа. Вначале производится промежуточное накопление в DORIS при энергии 2,2 ГэВ. При этом цепочка линейный ускоритель — DESY — DORIS работает в течение времени, необходимого для накопления на орбите DORIS числа позитронов, предельного по условиям устойчивости пучка. После этого позитроны переводятся обратно в DESY, ускоряются до энергии 7 ГэВ и инжектируются в основное накопительное кольцо. Такие циклы повторяются до тех пор, пока на орбите PETRA не будет накоплен проектный ток 80 мА. При токе электронов в начальной части линейного ускорителя 0,2 А процесс накопления  $e^+$  длится около 10 минут. Пучок электронов с достаточной интенсивностью получают за один цикл ускорения в DESY. Энергия накопленных таким образом частиц увеличивается затем с 7 ГэВ до нужной величины с помощью высокочастотной ускоряющей системы с одновременным подъемом индукции магнитного поля на орбите. Характерные параметры накопителя даются в табл. VI.

Таблица VI

Проектные параметры PETRA

Максимальная энергия $e^+e^-$	19 ГэВ
Ток каждого пучка	80 мА
Время жизни частиц	10 часов
Число мест пересечений пучков на орбите	4
Размеры пучков в местах встречи	
горизонтальный	0,8 мм
вертикальный	0,03 мм
Светимость	$10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Проектная энергия ускоренных частиц 19 ГэВ ограничивалась суммарной амплитудой высокочастотного ускоряющего напряжения, компенси-

рующего потери энергии частицами на синхротронное излучение. Мощность ускоряющих устройств определяла максимальные токи встречных пучков-частиц. Для достижения полной энергии встречных пучков 45 ГэВ потребовалось удвоить число ускоряющих резонаторов, работающих на частоте 500 МГц, для компенсации синхротронного излучения, составившего почти 100 МэВ за один оборот на каждую накопленную частицу. Под установку всех резонаторов (112 штук) отведено примерно 10% периметра орбиты накопителя. Дальнейшее увеличение энергии частиц возможно при переходе на сверхпроводящие резонаторы.

д) Линейный ускоритель электронов SLAC  
(Stanford Linear Accelerator Center, США)<sup>21</sup>

Ускорительный центр SLAC Стенфордского университета, вблизи Сан-Франциско, оснащен уникальным ускорителем электронов, являющимся в настоящее время самым крупным в мире электронным линейным ускорителем (табл. VII). В обычном режиме электроны ускоряются до энергии 24 ГэВ.

Таблица VII

Основные параметры ускорителя

Длина ускорителя	3050 м
Средний ток пучка:	
электронов	48 мкА
позитронов	0,6 мкА
Длительность импульса тока	1,6 мкс
Частота следования импульсов	360 Гц
Частота В. Ч. ускоряющего электрического поля	2856 МГц
Высокочастотная мощность:	
пиковая	7300 МВт
средняя	7 МВт

При включении дополнительных высокочастотных устройств, позволяющих увеличить темп ускорения, их энергия может быть поднята до 33,4 ГэВ. Ускоряться могут также и позитроны. Их генерация производится в вольфрамовой мишени, устанавливаемой на пути пучка ускоряемых электронов, в конце первой трети длины ускорителя. Небольшая доля рожденных в мишени позитронов, вылетая в том же направлении, что и первичные электроны, ускоряется в оставшейся части линейного ускорителя до энергии 15 ГэВ. Количество позитронов, которые захватываются в режим ускорения, составляет примерно 8% от числа первичных электронов, падающих на мишень.

Физические исследования ведутся как с первичным пучком ускоренных электронов, так и со вторичными частицами, которые генерируются электронами на внешних мишнях. Кроме пучков мезонов, протонов и антипротонов, тормозных  $\gamma$ -квантов, на ускорителе имеется пучок монохроматических  $\gamma$ -квантов с энергиями 20 ГэВ. Такой пучок образуется при обратном рассеянии фотонов лазерного луча, направленного навстречу ускоренным электронам. Интенсивность пучка достигает  $3,6 \cdot 10^4$  квантов в секунду. Идея использования встречных пучков ускоренных электронов и лазерного излучения для создания такого уникального источника  $\gamma$ -квантов была впервые высказана в Ереванском Физическом институте АН СССР<sup>38</sup> и независимо, но позже, за рубежом<sup>39</sup>.

Экспериментальные возможности ускорительного центра намного расширились после ввода в строй электрон-позитронных накопительных колец SPEAR на энергию 4,2 ГэВ и PEP (Positron Electron Project) на энергию 18 ГэВ. Для того и другого накопителя инжектором частиц служит линейный ускоритель SLAC. В установке SPEAR, при токе каждого пучка 0,1 А,

достигается светимость  $10^{31}$  см $^{-2}$ с $^{-1}$ . Примерно такая же светимость получена и в установке PEP. По своим параметрам эти установки близки к накопителям DORIS и PETRA. Вообще говоря, по характеру развития научные центры в Стэнфорде и в Гамбурге имеют много общего, поскольку основой экспериментальной базы в обоих центрах служат электронные ускорители на примерно одинаковые энергии.

Кроме программы по физике высоких энергий, на SPEAR ведутся широкие исследования по химии, биологии, металлургии на пучках синхротронного излучения электронов, спектр которого простирается далеко в область ультрафиолетового и рентгеновского излучений. Организация проведения этих работ параллельно основной программе намного увеличивает научное и практическое значение электронных накопителей.

### 3. О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ

Современные действующие ускорители и накопители заряженных частиц в приведенных выше примерах уже нельзя назвать лабораторными установками. По своим габаритам и технической оснащенности они скорее относятся к крупным индустриальным сооружениям, требующим значительных капитальных и эксплуатационных затрат, многочисленного обслуживающего персонала. Проекты, о которых идет речь в настоящее время, оцениваются в суммах, превышающих миллиарды долларов. Тенденций к снижению темпов развития ускорителей пока нет. Запросы физики на энергию ускоренных частиц значительно опережают возможности ускорительной техники. Открытия на достигнутых энергетических рубежах рождают проблемы, для решения которых требуется идти дальше по энергиям. Для выбора наиболее оптимального пути развития ускорителей в этом направлении пока имеются довольно ограниченные возможности. Ускорительная техника продолжает развиваться на базе известных принципов ускорения, и в ближайшее время повышение энергии ускоренных частиц будет неизбежно требовать увеличения размеров ускорителей. Кибернетизация ускорителей, внедрение сверхпроводимости в технику получения магнитных и высокочастотных электромагнитных полей открывает возможности для создания более экономичных установок с меньшими затратами на единицу энергии ускоренных частиц. В ускорителях следующего поколения это найдет самое широкое применение. С фактором 2—3 это позволяет сократить и габариты колышевых ускорителей, отнесенные к энергии ускоренных частиц, как это сделано в проекте ускорительно-накопительного комплекса ИФВЭ на энергию 3000 ГэВ.

В ближайшее время в ряде научных центров предполагается ввести в строй ускорительно-накопительные установки на энергию в диапазоне сотен и тысяч ГэВ в с.п.и. (SPS — первая установка этого диапазона)<sup>40</sup>. В ИЯФ СО АН СССР ведутся работы по созданию ВЛЭПП со встречными электрон-позитронными пучками с однократным столкновением частиц, ускоренных в двух линейных ускорителях, «стреляющих» навстречу друг другу. Вначале предполагается сооружение линейных ускорителей на энергию 150 ГэВ. Затем длина их будет увеличена для повышения энергии до 500 ГэВ. Аналогичный метод получения встречных пучков с однократным столкновением частиц, но с применением одного ускорителя, реализуется в Стэнфорде на SLACe (США). Энергия ускоренных электронов и позитронов будет поднята до 50 ГэВ после соответствующей модернизации высокочастотной системы. Столкновения пучков организуются с помощью магнитооптических каналов, формирующих в месте встречи пучки с диаметрами около 4 микрон<sup>41</sup>. В лаборатории ФНАЛ (США) ускоритель DOUBLER планируется использовать для получения встречных протон-антипротонных пучков с энергиями 1 ТэВ. В научном центре DESY (Гамбург) разрабатывается установка HERA для встречных электрон-протонных пучков с энергиями соответственно 30 ГэВ и 820 ГэВ. Кольцо для протонного пучка планируется на

сверхпроводящих магнитах. В ЦЕРНе сооружается электрон-позитронное кольцо LEP с периметром 27 км. Имеется также предложение использовать его туннель для размещения в нем кольца на сверхпроводящих магнитах для встречных протон-антипротонных пучков с энергиями 5—10 ТэВ. В Японии, в Национальной лаборатории по физике высоких энергий, планируется создать установку TRISTAN для встречных электрон-позитронных пучков на энергии 33 ГэВ (с последующим увеличением). Для ускоряющей системы будут использованы сверхпроводящие высокочастотные резонаторы.

Недавно американские специалисты предложили создать протонный ускорительный комплекс на энергию 20 ТэВ. В предложении предусматривается сооружение двух колец на такую энергию для получения встречных пучков с энергиями 40 ТэВ в с.д.и. Ожидается получить светимость  $10^{32}$ — $10^{33}$  см $^{-2}$ с $^{-1}$ . Магнитные структуры колец предполагается компоновать из сверхпроводящих фокусирующих и поворотных магнитов. Рассматриваются два варианта магнитов. Один из них с железным магнитопроводом и сверхпроводящей обмоткой. Нужная конфигурация магнитного поля формируется геометрией полюсов. Максимальные индукции полей в таких магнитах ограничиваются насыщением железа. Основным преимуществом магнитов является их простота в изготовлении и эксплуатации. Периметр колец с индукциями в поворотных магнитах 2 Тл превысит 200 км. При некотором усложнении конструкции дипольных магнитов и специальном размещении сверхпроводящих обмоток возможно получать геометрическое сложение магнитных полей в зазоре и увеличить индукцию магнитного поля примерно до 3 Тл без значительного насыщения железа<sup>42</sup>. При использовании магнитов с токонесущими сверхпроводящими нитями и увеличением индукции магнитных полей до 5 Тл и выше периметр кольца соответственно уменьшится. Окончательный выбор варианта магнитов пока не сделан.

Для сокращения размеров кольцевых ускорителей необходимо перейти к более высоким магнитным полям. Возможности здесь имеются. В настоящее время освоены сверхпроводники на основе сплава NbTi с критическим магнитным полем  $B_k = 10$  Тл. На основе соединения Nb<sub>3</sub>Sn ( $B_k = 25$  Тл) могут быть созданы сверхпроводящие магниты с полями до 10 Тл, а на базе сверхпроводника V<sub>3</sub>Ga ( $B_k = 35$  Тл) становятся достижимы поля 20 Тл. Однако для практического использования таких больших магнитных полей в ускорительной технике предстоит еще решить ряд сложных технологических проблем.

Наряду с развитием традиционных методов ускорения интенсивно ведутся поиски новых принципов, позволяющих резко повысить темп ускорения. Как отмечалось ранее, в ИЯФ СО АН СССР разрабатывается высокочастотная структура линейного ускорителя с проектным темпом ускорения 100 МэВ/м, что на порядок выше, чем в современных ускорителях. Большое число идей основаны на использовании принципиально новых механизмов ускорения<sup>43</sup>. Например, рассматриваются различные возможности передачи энергии заряженным частицам мощными лазерными пучками, в которых имеются электрические поля с высокими напряженностями. В некоторых схемах предлагается применить известные эффекты, но, так сказать, наоборот (в обращенном виде). Например, ускорение обращенным излучением Вавилова — Черенкова, когда заряженная частица поглощает энергию лазерного луча, пересекающего ее траекторию под характерным для этого излучения углом. Расчетные градиенты ускорения в таких схемах достигают 500 МэВ/м. Примерно такие же темпы ускорения получаются при оценках ускорения обращенным излучением лазера на свободных электронах.

В ряде предложений по ускорению заряженных частиц используются электромагнитные явления в плазме для получения бегущих волн электрического поля с фазовыми скоростями, меньшими, чем скорость света. Возбуждение волн может осуществляться, например, мощным электронным пучком, модулированным по плотности, или при облучении плазмы двумя

интерферирующими лазерными пучками. Градиенты ускорения, которые при этом можно ожидать, достигают 1 ГэВ/м. Однако пока разработки по этим направлениям находятся на уровне теоретических и лабораторных исследований, и говорить об их практическом использовании или делать какие-либо прогнозы преждевременно.

По-видимому, прогресс в ускорительной технике в течение ближайшего десятилетия будет идти по пути совершенствования технологии сооружения более экономичных ускорительно-накопительных установок, работа которых основана на проверенных принципах.

Можно ожидать, что в ускорительных установках нового поколения на встречных адронных пучках будут достигнуты полные энергии до 40 ТэВ (см. рис. 1). Конечно, нельзя исключить и появление практически реализуемой новой идеи получения частиц сверхвысоких энергий, но такие события в истории науки и техники чаще всего происходят неожиданно.

Институт физики высоких энергий,  
Серпухов (Московская обл.)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van de Graaff R. J.— Phys. Rev., 1931, v. 38, p. 1919.
2. Cockcroft J. D., Walton E. T.— Proc. Roy. Soc. Ser. A, 1932, v. 137, p. 229.
3. Ising G.— Arkiv mat., astron., fys., 1925, v. 18, Nr. 4, p. 1.
4. Lawrence E. O., Sloan D. H.— Proc. Nat. Acad. Sci., 1931, v. 17, p. 64.
5. Lawrence E. O., Livingston M. S.— Phys. Rev., 1931, v. 37, p. 1707.
6. Kerst D. W.— Ibidem, 1940, v. 58, p. 841.
7. Векслер В. И.— ДАН СССР, 1944, т. 43, с. 346; т. 44, с. 393.
8. Mc Millan E. M.— Phys. Rev., 1945, v. 68, p. 143.
9. Courant E. D., Livingston M. S., Snyder H. S.— Ibid., 1952, v. 88, p. 1190.
10. Стретт М. Д. О.— В кн. Функции Ляме, Матье и родственные им в физике и технике.— Харьков; Киев: ГНТИ Украины, 1935, с. 28.  
Mathieu E.— J. Math. (Liouville), 1868 (2), t. 13, p. 137.
11. Лебедев А. Н., Шабалинов А. В.— В кн. Основы физики и техники ускорителей.— М.: Энергоиздат, 1982, т. 2, с. 60.
12. Коломенский А. А., Лебедев А. Н.— В кн. Теория циклических ускорителей.— М.: Физматгиз, 1962.— С. 158.
13. Ландau Л. Д.— ЖЭТФ, 1946, т. 16, с. 574.
14. Kerst D. W.— CERN Symposium, 1956, v. 1, p. 36.
15. Скринский А. Н.— УФН, 1982, т. 138, с. 4.
16. Соколов А. А.— В кн. Введение в квантовую электродинамику.— М.: Физматгиз, 1958 с. 173.
17. Будкер Г. И.— АЭ. 1976, т. 22, с. 346.
18. Будкер Г. И., Скринский А. Н.— УФН, 1978, т. 124, с. 561.
19. Van der Meer S. CERN-ISR-PO/72-31.— 1972.
20. Adams J. B. et al. CERN-ISR-LEP/79-33.— 1979.
21. Loew G. A.— В кн. Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Протвино, июль 1977 г.— Серпухов: ИФВЭ, 1977, т. 1, с. 58.
22. Балакин В. Е., Будкер Г. И., Скринский А. Н.— В кн. Проблемы физики высоких энергий и управляемого термоядерного синтеза.— М.: Наука, 1981. с. 49.
23. Tigrone M.— Nuovo Cimento, 1965, v. 37, p. 3.
24. Адо Ю. М., Беловиццев К. А., Бессонов Е. Г., Черенков П. А.— Труды Физического института АН СССР.— М.: Наука, 1971, т. 54, с. 130; АЭ, 1965, т. 18, с. 104.
25. Балбеков В. И., Гридацов В. И., Гуров Г. Г., Дмитревский Ю. П., Дунайцев А. Ф., Елистратов В. В., Курнаев О. В., Лебедев В. Н., Логунов А. А., Мызников К. П., Рогозинский В. Г., Соловьев Л. Д., Сулыгин И. И., Тарраканов Н. М., Федотов Ю. С., Шембель Б. К., Ярба В. А. (ИФВЭ); Артемов А. Д., Васильев С. Н., Глухих В. А., Гусев О. А., Карасев Б. Г., Косякин М. Н., Малышев И. Ф., Мозалевский И. А., Мозин И. В., Монасзон Н. А., Перегуд В. Н., Сакаганский Г. Л., Сенченко О. Б., Смирнов П. В., Титов В. А. (НИИЭФА им. Д. В. Ефремова); Васильев А. А., Воронцов Г. П., Гюльханданян А. М.,

- Макеев Е. Л., Ширяев Ф. З. (ГКАЭ). Препринт ИФВЭ 83-120 ОУНК.— Серпухов, 1983.
26. Капчинский И. М., Тепляков В. А.— ПТЭ, 1970, № 2, с. 19.
  27. Владимировский В. В.— ПТЭ, 1956, № 3, с. 35.
  28. Матюшин А. А.— В кн. Труды Всесоюзного семинара по автоматизации научных исследований в ядерной физике и смежных областях.— Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1982, с. 130.
  29. Бурштейн Э. Л., Васильев А. А., Минц А. Л., Петухов В. А., Рубчинский С. М.— ДАН СССР, 1961, т. 141, с. 590.
  30. Балдин А. М., Безногих Ю. Д., Волков В. И., Донец Е. Д., Зиновьев Л. П., Колпаков И. Ф., Макаров Л. Г., Мончинский В. А., Пикин А. И., Семенюшкин И. Н., Силаев Е. А.— Цит. в <sup>21</sup> сб., т. 1, с. 367.
  31. Адо Ю. М.— АЭ, 1962, т. 12, с. 54.
  32. Владимиরский В. В., Гольдин Л. Л., Кошкарев Д. Г., Тарасов Е. К., Яковлев Б. М., Густов Г. К., Комар Е. Г., Куликов В. В., Малышев И. Ф., Моносзон Н. А., Попкович А. В., Столлов А. М., Стрельцов Н. С., Титов В. А., Водопьянов Ф. А., Кузьмин А. А., Кузьмин В. Ф., Минц А. Л., Рубчинский С. М., Уваров В. А., Жаданов В. М., Филаретов С. Г., Ширяев Ф. З.— В кн. Труды Международной конференции по ускорителям. Дубна, 21—27 августа 1963 г.— М.: Атомиздат, 1964, с. 197.
  33. Галиев Н. А., Головня Н. И., Грачев М. И., Губриенко К. И., Еременко Е. В., Запольский В. Н., Котов В. И., Прилепин А. А., Селезнев В. С., Суляев Р. М., Ходырев Ю. С.— В кн. Proc. of the VIII Intern. Conference on High Energy Accelerators.— Geneva: CERN, 1971, р. 17.
  - Грачев М. И., Котов В. И., Самойлов А. В.— В кн. Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц.— М.: Наука, 1977, т. 2, с. 106.
  34. Адо Ю. М., Балбеков В. И., Мяэ Э. А., Наумов А. А., Тишин В. Г., Тепляков В. А., Троянов Е. Ф., Тушабрамишвили К. З., Глухих В. А., Горюнов Э. П., Гутнер Б. М., Гусев О. А., Малышев И. Ф., Моносзон Н. А., Титов В. А., Шукейло И. А., Бацких Г. И., Водопьянов Ф. А., Елян В. В., Кузьмин В. А., Мещеров Р. А., Мурин Б. П., Воронцов Г. П., Касаткин В. П.— Ibidem, т. 1, с. 42.
  35. Adams J. B.— Цит. в <sup>21</sup> сб., т. 1, с. 17.  
Billinge R., Cowley-Milling M. C.— IEEE Trans. Nucl. Sci., 1979, v. NS-26, p. 2974.
  36. McDaniel B. D.— Ibidem, p. 2978.
  37. Voss G. A.— Ibidem, p. 2970.
  38. Арутюнян Ф. Р., Туманян В. А.— ЖЭТФ, 1963, т. 44, с. 2400.
  39. Milburn R. H.— Phys. Rev. Lett., 1963, v. 10, p. 89.
  40. Brianti G.— IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983, v. NS-30, p. 1950.
  41. Stiening R.— Ibidem, p. 1976.
  42. Umstatter H. H.— Ibidem., 1973, v. NS-20, p. 723.
  43. Sessler A. M.— Ibidem, 1983, v. NS-30, p. 3145.