шим магн. полям, но экономически невыгодно; размеры У. уменьшаются, но возрастает количество дорогого и энергоёмкого криогенного оборудования.

Менее жёстко определены минимально допустимые значения B. В У. с железным ярмом $B_{мин}$ не должно быть меньше $(6—10)\cdot 10^{-3}$ Тл, т. к. при меньших полях слишком большой вклад в полную величину магн. индукции начинают вносить остаточные магн. поля, пространственное распределение к-рых обычно бывает неблагоприятным. Отношение $B_{макс}/B_{мин}$, а следовательно, и отношение импульсов эжектируемых и инжектируемых частиц в У. с обычными магнитами не может поэтому превосходить 200—300. В сверхпроводящих магн. системах этот диапазон оказывается ещё меньше, т. к. при малых полях на пространств. распределении магн. индукции сильно сказываются вихревые токи в сверхпроводящих проводниках. Указанные ограничения — одна из причин, приводящих к тому, что все крупные ускорит. комплексы содержат неск. последовательно работающих У.: линейный У. — инжектор, один или неск. промежуточных У. — *бустеров*, наконец, основной У., доводящий заряж. частицы до предельной энергии, и, возможно, накопительное кольцо.

Схема ускорит. комплекса ЦЕРН приведена на рис. 6. Сооружение и эксплуатация этого комплекса производится и финансируется содружеством стран Европы. Наиб. У., входящий в состав комплекса, — это накопительно-столкновительное электрон-позитронное кольцо LEP [Large Electron Positron (Collider)], ускоряющее электронные и позитронные пучки до энергии 45 ГэВ. У. расположен в глубоком подземном тоннеле и имеет периметр 27 км. В этом тоннеле в 90-х гг. предполагается соорудить большой сверхпроводящий адронный коллайдер LHC (Large Hadron Collider), рассчитанный на ускорение протонов и антипротонов до энергии 7 ТэВ, а в дальнейшем и на ускорение ионов.

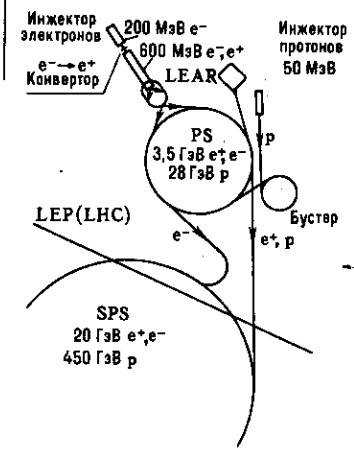

Рис. 6. Схема ускорительного комплекса ЦЕРН (Швейцария).

Для инжекции в LHC будет использоваться ускоритель SPS (Super Proton Synchrotron), на выходе к-рого протоны имеют энергию ~450 ГэВ. Периметр этого ускорителя 6,9 км, он расположен под землёй на глубине 40 м. SPS получает тяжёлые частицы от протонного синхротрона PS, в к-рый, в свою очередь, протоны и ионы попадают из бустера «Изольда», а электроны и позитроны — из бустера EPA.

В России наиб. протонный (и ионный) У. (70 ГэВ) работает в Протвино (ок. Серпухова, Моск. обл.). При нём начато сооружение ускорительно-накопительного центра (УНЦ) с периметром 21 км. Он рассчитан на ускорение протонов и антипротонов до энергии 3 ТэВ. В Международном объединённом ин-те ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна, Моск. обл.) работает протонный синхротрон, ускоряющий протоны до 9 ГэВ, фазотрон и сверхпроводящий У. ионов — нуклотрон, ускоряющий ионы до энергии 6 ГэВ/нуклон.

В Ин-те теоретич. и эксперим. физики (ИТЭФ, Москва) протонный синхротрон ускоряет протоны до энергии 9 ГэВ.

Фазовые колебания. Как уже отмечалось, в резонансных У. пучок ускоряемых частиц самопроизвольно разделяется на сгустки. Центр. частицы сгустков очередной раз подходят к ускоряющему зазору (в циклич. У.) или к очередному ускоряющему зазору (в линейных У.) в те моменты времени, когда фаза ускоряющего ВЧ-напряжения имеет нужное значение. Такие частицы наз. равновесными. Др. частицы сгустка в процессе ускорения колеблются около равновесной, то опережая её, то отставая от неё. Эти колебания наз. фазовыми. Они сопровождаются колебаниями энергии и импульса ускоряемых частиц относительно энергии и импульса равновесной частицы.

Рассмотрим фазовое движение в линейном У. Будем для простоты считать, что ускоряющие зазоры настолько коротки, что частицы проходят их практически мгновенно. Пусть нек-рая частица подошла к зазору позже, чем равновесная. Чтобы она начала её догонять, она должна получить больше энергии при прохождении зазора. Наоборот, частица, пришедшая к зазору раньше равновесной, должна получить меньше энергии.

На рис. 7 синусоидальная кривая изображает изменяющуюся во времени напряжённость E ускоряющего ВЧ-поля. Штриховая линия отмечает напряжённость, к-рая должна существовать в момент прохождения равновесной частицы, чтобы она вовремя подошла к следующему зазору. На каждом периоде изменения E есть две такие точки: C и D. Легко, однако, видеть, что движение устойчиво только в точке C. Лишь в этой точке в более поздние моменты времени напряжённость поля возрастает, а в более ранние моменты снижается.

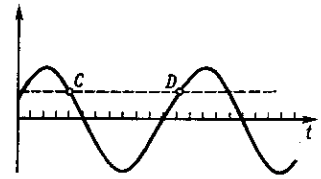

Рис. 7. К обсуждению принципа автофазировки.

Детальный анализ продольного движения частиц показывает, что при достаточной амплитуде ВЧ-колебаний всегда существует область устойчивого фазового движения — в данном случае область, расположенная вокруг точки С. Это утверждение наз. принципом *автофазировки*.

В циклическом У. от энергии зависит не только скорость частиц, но и длина пути, проходимого ими от предыдущего ускоряющего зазора до последующего (если их несколько), а также периметр траектории. Введём коэф. удлинения орбит

$$\alpha=\frac{dL/L}{dp/p}, \qquad (5)$$

где L — периметр орбиты, p — импульс частицы. Изменение времени, затрачиваемого частицей на обращение в У., зависит от её импульса и описывается ф-лой

$$\frac{dt}{t}=\left(\alpha-\frac{1}{\gamma^2}\right)\frac{dp}{p}, \qquad (6)$$

где γ — лоренц-фактор частицы, $\gamma=[1-(v/c)^2]^{-1/2}$. В линейных У. $\alpha=0$, и устойчивой является точка C. В циклическом У. при $\gamma^{-2}>\alpha$ устойчива точка C, а при $\gamma^{-2}<\alpha$ — точка D. Энергия, при к-рой эти точки меняются местами, соответствует соотношению

$$\alpha\gamma^2=1 \qquad (7)$$

и наз. критической энергией (в англ. литературе — transition energy). В этой точке фаза ускоряющего напряжения должна быть переброшена из одной «синхронной точки» в другую. При подходе к критич. энергии частоты фазовых колебаний (в циклических У. они часто наз. радиально-фазовыми) снижаются и фазовые размеры сгустков резко уменьшаются, а разброс частиц по импульсам (и по энергии) увеличивается. В момент перехода через критич. энергию усиливается влияние разл. вида неустойчивостей. В зависимости от особенностей конструкции У. — от величины α — критич. энергия может лежать внутри или вне рабочего диапазона энергий.

Проблема поперечной устойчивости. Бетатронные колебания. В крупных кольцевых У. за время ускорения частицы проделывают путь, измеряемый сотнями тысяч или даже