

Неизменность магн. поля и частоты ускоряющего напряжения делают возможным непрерывный режим ускорения: в то время как одни частицы движутся по внеш. виткам спирали, другие находятся на середине пути, а третьи только начинают движение (частицы инжектируются в вакуумную камеру Ц. вблизи её центра); радиус инжекции зависит от импульса, к-рый приобретают частицы в *ионном источнике* или на пути от источника к дуанту.

Ускоряемые частицы заполняют спиральную траекторию не сплошь. Занятыми оказываются только те её участки, к-рые соответствуют частицам, приходящим в зазор при ускоряющем направлении электрич. ВЧ-поля. Поэтому пучок ускоряемых частиц распадается на цепочку следующих друг за другом групп частиц (банчей, см. *Банчи-ровка*).

При значит. ускорении частиц, когда происходит релятивистское увеличение массы ( $\gamma > 1$ ), частота обращения частиц начинает падать, и они выходят из синхронизма с ускоряющим полем. В таком случае режим ускорения частиц сменяется их замедлением и их дальнейшее ускорение становится невозможным. Этого эффекта можно избежать, если с увеличением энергии (массы) частицы, т. е. с увеличением радиуса её орбиты, увеличивать индукцию поля *В*. Однако для Ц. с азимутально-симметричным полем это ведёт к появлению неустойчивости вертикального движения ускоряемых частиц.

При устойчивом движении всякое отклонение параметров движения частиц от равновесных значений должно сопровождаться возникновением эффектов, стремящихся вернуть эти параметры к равновесным, так что частицы совершают колебания около равновесных значений. Принято различать устойчивость поперечных колебаний (колебаний по высоте и по радиусу) и устойчивость продольного движения (*радиально-фазовые колебания*).

Можно показать, что в азимутально-симметричном поле вертикальное движение оказывается устойчивым лишь в том случае, если индукция магн. поля не растёт, а убывает с радиусом. Обычно такое поле и создаётся. Складываясь с релятивистским увеличением массы, этот эффект накладывает дополнит. ограничение на макс. энергию ускоряемых частиц. У Ц., используемых для ускорения протонов, максимально достижимая энергия лежит в области 30 МэВ.

Увеличить энергию, к-рую могут достичь частицы, ускоряемые в Ц., возможно двумя способами. Можно отказаться от постоянства частоты ускоряющего напряжения, снижая её, по мере того как падает частота обращения частиц. Такие ускорители наз. *фазотронами*. При изменяющейся во времени частоте становится невозможным описанный выше режим ускорения, когда в ускорителе сосуществуют частицы, находящиеся на разных стадиях процесса ускорения. Частота ускоряющего поля при этом соответствует ускорению одного или группы близко расположенных банчей. Т. о., увеличение максимально достижимой энергии частиц в фазотроне происходит за счёт существенного снижения интенсивности.

Другой путь достижения макс. энергии заключается в отказе от азимутальной симметрии магн. поля. В таких ускорителях частицы попеременно пересекают области, в к-рых поле с увеличением радиуса растёт и уменьшается. При правильном выборе параметров в результате такого движения появляется вертикальная устойчивость даже при увеличивающейся с радиусом ср. индукции магн. поля. Ускорители, построенные по этому принципу, наз. *изохронными* и Ц. *Изохронные* Ц. работают при пост. частоте ускоряющего поля и поэтому способны выдавать большие токи ускоренных частиц. Азимутальное изменение магн. поля, совмещённое с радиальным, требует магн. полюсов сложной формы. Полюса *Изохронных* Ц. обычно состояются из неск. секторов или снабжаются спиралевидными гребнями.

Внеш. вид одного из современных Ц., работающего в Институте ядерных исследований, представлен на рис. 2. Он может ускорять как протоны, так и ионы (до неона включительно). На внеш. витке спирали энергия протонов

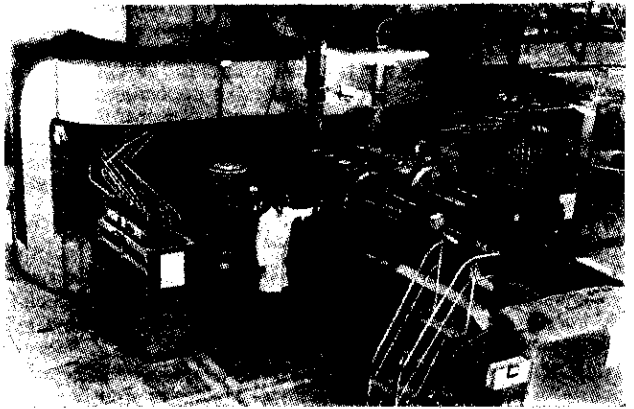


Рис. 2. Внешний вид циклотрона Института ядерных исследований на 35 МэВ по протонам.

составляет 35 МэВ. Ср. ток ускоренных протонов 30 тА. Мощность ускоренного пучка составляет ~1 кВт. Магн. ярмо Ц. весит 300 т, вес катушек возбуждения ~70 т, диаметр магн. полюсов 150 см, потребляемая от сети мощность ~180 кВт. Габаритные размеры Ц. 8 × 13 м<sup>2</sup> в плане и 4,5 м по высоте.

Лит. см. при ст. *Ускорители заряженных частиц*.

Л. Л. Гольдин.

**ЦИКЛОТРОННАЯ МАССА** — величина, играющая роль массы в выражении для частоты периодич. движения носителей заряда в пост. магн. поле *H* в импульсном пространстве; периодич. движение происходит по плоской кривой, образуемой пересечением изоэнергетич. поверхности  $\mathcal{E}(\mathbf{p}) = \text{const}$  с плоскостью  $p_H = \text{const}$ , где  $p_H$  — проекция квазиимпульса носителя на направление *H*. Угл. частота этого движения  $\omega_c$ , наз. *циклотронной*, определяется выражением

$$\omega_c = |e| H / m_c c, \quad (1)$$

где *e* — заряд носителя, *m<sub>c</sub>* — Ц. м., равная

$$m_c = \frac{\hbar^2 \partial S}{2\pi \partial \mathcal{E}}. \quad (2)$$

Здесь *S* — площадь сечения изоэнергетич. поверхности плоскостью  $p_H = \text{const}$ .

Если изоэнергетич. поверхность — сфера, то Ц. м. совпадает с *эффективной массой*. Для эллипсоидальных изоэнергетич. поверхностей *m<sub>c</sub>* зависит только от углов между направлением *H* и осями эллипсоида. Так, для двухосных эллипсоидов (сфероидов) *m<sub>c</sub>* определяется соотношением

$$m_c^{-2} = m_{\perp}^{-2} \cos^2 \theta + m_{\parallel}^{-2} \sin^2 \theta. \quad (3)$$

Здесь *m<sub>⊥</sub>* и *m<sub>∥</sub>* — гл. значения тензора эфф. масс («поперечная» и «продольная» массы),  $\theta$  — угол между *H* и осью сфероида. В более сложных случаях *m<sub>c</sub>* зависит от  $p_H$  (тяжёлые дырки в Ge и Si) и от  $\mathcal{E}$  и может быть рассчитана только численно. Ц. м. определяется экспериментально методом *циклотронного резонанса*.

Лит.: Цидильковский И. М., Электроны и дырки в полупроводниках, М., 1972.

Е. М. Гершензон.

**ЦИКЛОТРОННАЯ ЧАСТОТА** — частота  $\omega_c$  обращения заряж. частиц в пост. магн. поле *H* в плоскости, перпендикулярной *H*. Для свободной заряж. частицы Ц. ч. определяется из равенства *Лоренца* силы произведению массы частицы на центростремительное ускорение

$$\omega_c = |q| H / m_c, \quad (1)$$

где *q*, *m* — заряд и масса частицы. Ц. ч. определяется разностью энергий  $\Delta \mathcal{E}$  между уровнями энергии частицы в магн. поле:  $\Delta \mathcal{E} = \hbar \omega_c$  (см. *Ландау уровни*).

Ц. ч. играет существ. роль в вопросах распространения и генерации эл.-магн. волн в плазме, находящейся в пост.