



Рис. 5. Схема устройства циклотрона.

магн. поле. Ускоряющий зазор образуется срезами двух расположенных в камере и обращённых друг к другу электродов, имеющих форму полых цилиндров, — дуант о в. Дуанты присоединяются к полюсам высоковольтного генератора через четвертьволновые линии.

На частицу, движущуюся по окружности, действует центростремительная сила Лоренца $F_L = Ze v B$, равная центробежной силе mv^2/ρ , где ρ — радиус кривизны траектории, Ze — заряд частицы. Т. о., $mv = Ze v B$. Переходя

к более удобным единицам, получим

$$pc = 300 Z B \rho, \quad (3)$$

где pc — произведение импульса частицы p на скорость света c — выражается в МэВ, индукция магн. поля B измеряется в теслах, а ρ — в м.

Предельная энергия, достижимая в обычных циклотронах, составляет для протонов ок. 20 МэВ, а частота ускоряющего поля (при $B = 2$ Тл) — ок. 30 МГц. При больших энергиях ускоряемые частицы выходят из синхронизма с ускоряющим напряжением из-за необходимого для поперечной устойчивости уменьшения B от центра к периферии и вследствие релятивистских эффектов.

Обычные циклотроны широко применяются для получения изотопов и во всех др. случаях, когда нужны протоны (или ионы) с энергией до 20 МэВ (или ~ 20 МэВ/нуклон). Если же нужны протоны с более высокой энергией (до неск. сотен МэВ), то применяются циклотроны с азимутальной вариацией магн. поля. Устойчивость поперечного движения в таких циклотронах обеспечивается благодаря отказу от азимутальной симметрии магн. поля и выбору такой его конфигурации, к-рая позволяет сохранить устойчивость движения и при нарастающих (в среднем) к периферии значениях магн. индукции.

Процесс ускорения в циклотронах происходит непрерывно: в одно и то же время одни частицы только покидают ионный источник, другие находятся на середине пути, а третьи заканчивают процесс ускорения. Типичный ток внутр. пучка в циклотронах составляет ок. 1 мА, ток выведенного пучка зависит от эффективности эжекции и от тепловой устойчивости выведенных фольг; обычно он составляет неск. десятков мкА.

Фазотроны. В фазотронах магн. поле постоянно во времени и сохраняется его цилиндрич. симметрия. Магн. поле уменьшается к периферии, частота обращения частиц с возрастанием их энергии уменьшается, и соответственно уменьшается частота ускоряющего поля. При этом отпадают ограничения на энергию ускоренных частиц, но резко (на неск. порядков) уменьшается интенсивность ускоренного пучка. Изменение частоты ускоряющего поля приводит к тому, что процесс ускорения разбивается на циклы: новая партия частиц может быть введена в фазотрон лишь после того, как ускорение предыдущей партии закончено и частота возвращена к исходному значению. Обычная рабочая область фазотронов от неск. сотен до тысячи МэВ. При дальнейшем увеличении энергии размеры магнитов становятся слишком большими, а их вес и стоимость чрезмерно возрастают. В последнее время (90-е гг.) новых фазотронов не строят. Для энергий до неск. сотен МэВ применяют циклотроны с азимутальной вари-

цией магн. поля, а для ускорения до больших энергий используют синхротроны.

Синхротроны применяют для ускорения частиц всех типов: собственно синхротроны — для электронов и синхротроны для протонов и др. ионов (старое назв. — синхрофазотроны, см. *Синхротрон протонный*). Энергия, до к-рой ускоряются частицы в синхротронах, ограничена для электронов мощностью синхротронного излучения, а для протонов и ионов только размерами и стоимостью $У$.

В синхротронах постоянной в процессе ускорения остаётся орбита, по к-рой обращаются частицы. Ведущее магн. поле создается только вдоль узкой дорожки, охватывающей кольцевую вакуумную камеру, в к-рой движутся частицы. Как ясно из (3), при пост. радиусе магн. индукция должна возрастать пропорц. импульсу ускоряемых частиц. Частота обращения ω (при пост. длине орбиты) связана с импульсом ф-лой

$$\omega = \omega_{\infty} p / \sqrt{p^2 + (mc)^2}, \quad (4)$$

где ω_{∞} — частота, с к-рой обращалась бы в синхротроне частица, движущаяся со скоростью света. Частота ускоряющего поля может совпадать с частотой обращения частиц или в целое число раз (оно наз. к р а т н о с т ь ю) превосходить её. Т. о., в электронных синхротронах (у к-рых всегда $p \gg mc$) частота ускоряющего поля постоянна, в то время как индукция магн. поля возрастает. В протонных синхротронах на протяжении ускоряющего цикла возрастает как индукция магн. поля, так и частота ускоряющего напряжения.

Микротроны — циклич. $У$. с пост. магн. полем и с приращением энергии на оборот, равным энергии покоя электрона (0,511 МэВ). Если всё приращение энергии происходит на одном коротком участке, то в пост. магн. поле частицы переходят с одной круговой орбиты на другую. Все эти орбиты касаются друг друга в точке расположения ускоряющего устройства. Энергия электронов в таких $У$. достигает неск. десятков МэВ.

Размеры ускорителей. Ускорительные комплексы. Длина линейного $У$. определяется энергией ускоряемых частиц и темпом ускорения, а радиус кривизны орбиты кольцевых ускорителей — энергией частиц и макс. индукцией ведущего магн. поля.

В совр. электронных линейных $У$. темп ускорения составляет 10—20 МэВ/м, в протонных — 2,5—5 МэВ/м. Увеличение темпа ускорения наталкивается на две осн. трудности: на увеличение резистивных потерь в стенках резонаторов и на опасность электрич. пробоев. Для снижения резистивных потерь можно использовать сверхпроводящие резонаторы (первые такие $У$. уже начали работать); для борьбы с пробоями тщательно выравнивают распределение электрич. поля в резонаторах, избегая местных неоднородностей. Возможно, темп ускорения в протонных линейных $У$. удастся увеличить со временем на порядок величины.

Размеры циклических $У$. связаны с индукцией ведущего магн. поля ф-лой (3). При ускорении однозарядных частиц и среднем по кольцу значении $\langle B \rangle \approx 1,2$ Тл (что соответствует $B_{\max} \approx 1,8$ Тл) эта ф-ла даёт pc (МэВ) $\approx 360\rho$ (м). В соответствии с этим $У$. на 1 ТэВ должен иметь периметр ~ 20 км. Такие $У$. в целях защиты от излучений строят под землёй. Огромные размеры $У$. на большие энергии приводят к капитальным затратам, выражаемым миллиардами долларов.

Приведённые оценки справедливы для $У$. магн. блоки к-рых содержат железное ядро. Увеличивать B_{\max} выше 1,8 Тл оказывается невозможным из-за насыщения железа, однако это можно сделать, переходя к сверхпроводящим магн. системам. Первый такой $У$. — тэватрон — уже работает в Лаборатории им. Ферми в США. Магн. поле в блоках, намотанных кабелем с жилами из NbTi в медной матрице, при темп-ре 4 К может быть поднято до 5—5,5 Тл, а при понижении темп-ры до 1,8 К или при переходе к NbSn — до 8—10 Тл. (Сплав NbSn при изготовлении ускорителей не применяют из-за его хрупкости.) Дальнейшее понижение темп-ры позволяет переходить к ещё боль-