

Журнал Квант 1977 №4

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 50
ББК 22
Ж92

Ж92 Журнал Квант 1977 №4 / – М.: Книга по Требованию, 2022. – 68 с.

ISBN 978-5-458-30346-0

Журнал Квант 1977 №4

ISBN 978-5-458-30346-0

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2022
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2022

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

самых малых объектов современной науки — элементарных частиц.

Привычный нам мир состоит из небольшого числа частиц. Протоны, нейтроны, электроны, фотоны — вот, собственно говоря, и весь их список. Исследование радиоактивного распада позволило, кроме того, обнаружить нейтрино. Все остальные известные нам частицы — а их мы знаем уже около двухсот — крайне недолговечны. Чтобы их изучать, надо изготавливать их неподалеку от физической лаборатории. Для этого-то и сталкивают друг с другом обычные частицы — протоны и атомные ядра или электроны, ускоренные до больших энергий.

Небольшие ускорители сейчас широко используются в медицине и в технике для производства радиоактивных изотопов, для улучшения свойств полимерных материалов, для стерилизации медицинского оборудования, для лечения раковых больных и для многих других целей. Однако самые крупные, поражающие человеческое воображение ускорители строятся с чисто научными целями — чтобы изготавливать и изучать новые частицы.

Если перейти к определениям, то ускорителями принято называть установки, в которых заряженным частицам сообщается энергия при помощи электрических или электромагнитных полей. Незаряженные частицы мы ускорять не умеем. Когда необходимо получить быстрые незаряженные частицы — даже самые обычные, например, нейтроны — это приходится делать при помощи ускоренных заряженных частиц.

В простейших ускорителях разгон частиц производится в постоянном электрическом поле (*ускорители прямого действия*). Ускорение электронов в рентгеновском поле происходит также в рентгеновских трубках и в кинескопах телевизионных установок. Эти давно нам знакомые и столь полезные приборы не принято называть гордым именем ускорителей, хотя они вполне того заслуживают. В особенности это относится к рентгеновским трубкам, где электроны разгоняют с той же целью, что и в самых крупных современных ускорителях — для

генерации новых частиц (фотонов рентгеновского диапазона) при соударении ускоренной частицы с материалом мишени. Кинетическая энергия K , которую приобретает ускоряемый электрон, равна

$$K = eV,$$

где e — заряд электрона, V — разность потенциалов, которую он проходит.

В ускорителях прямого действия не удастся достичь энергии большей, чем несколько миллионов электронвольт *). Это происходит потому, что между электродами, расположенными на обычных расстояниях — до нескольких метров, — не удастся создать разность потенциалов больше, чем несколько миллионов вольт. При больших напряжениях между электродами начинают происходить электрические пробой, с которыми никто не умеет бороться. Развитие всей современной ускорительной техники основано на преодолении этой трудности: заряженной частице нужно сообщить большую энергию, действуя на нее не очень сильными электрическими полями.

В небольшой — по необходимости — статье, конечно, не могут быть затронуты все вопросы ускорительной техники. Мы не будем, в частности, говорить о проблемах, связанных с получением вакуума. Читатель, однако, всегда должен помнить, что ускорение возможно только в высоком вакууме, иначе всю полученную энергию частицы в бесчисленных столкновениях будут передавать молекулам газа. В ускорителях обычных типов достаточно снизить давление на пути ускоряемых частиц до 10^{-9} атм. Такой вакуум давно освоен в технике.

Линейные ускорители

Линейные ускорители позволяют ускорять заряженные частицы до очень больших энергий, принципиально — до сколь угодно больших.

*) Электронвольт — это энергия, которую электрон (или другая частица с таким же зарядом) приобретает, пройдя разность потенциалов в 1 в; 1 эв = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

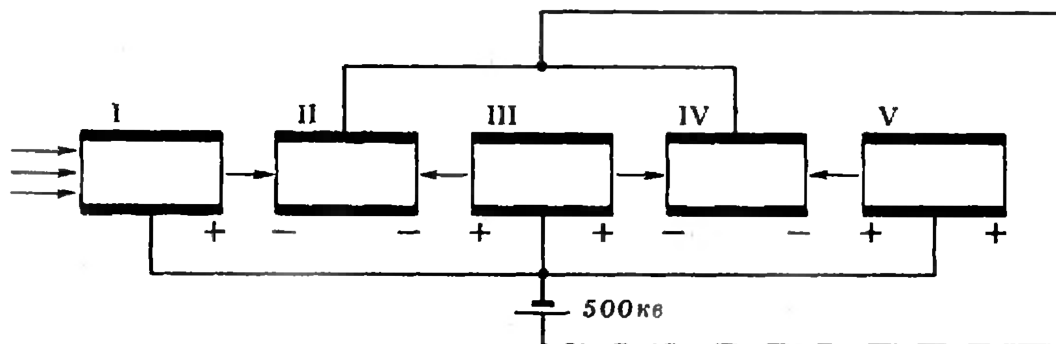


Рис. 1.

Пусть требуется ускорить протоны до энергии 30 Мэв*). В ускорителе прямого действия для этого потребовалось бы пропустить их между электродами, к которым приложена разность потенциалов 30 миллионов вольт. Как уже было выяснено, сделать этого нельзя из-за электрических пробоев. Однако ту же энергию протон приобретает, пройдя через 60 последовательно расположенных промежутков с напряжением 500 киловольт каждый. Такое напряжение к электродам приложить можно.

Попробуем нарисовать схему ускорителя с несколькими ускоряющими промежутками. Не удастся ли нам обойтись одним электрическим генератором? На рисунке 1 сделана такая попытка. Пучок протонов (или других ускоряемых частиц) проходит через систему расположенных друг за другом трубчатых электродов. Электроды попеременно присоединены к положительному и к отрицательному полюсам батарей. Внутри трубок частицы движутся с постоянной скоростью и их энергия не меняется (внутри проводящей трубки электрическое поле равно нулю). Проходя промежутки между трубками, они испытывают действие электрического поля, в результате чего их кинетическая энергия меняется.

Рассмотрим нашу схему более подробно. В промежутке между первой и второй трубкой направление электрического поля совпадает с направлением скорости протонов, и следовательно, поле их ускоряет. Однако в следующем промежутке поле направлено навстречу летящим части-

цам и замедляет их. В третьем промежутке частицы ускоряются, а в четвертом снова замедляются. Ускоритель, таким образом, у нас не получился. Чтобы заставить протоны непрерывно ускоряться, нужно сделать так, чтобы во всех промежутках между трубками электрическое поле было направлено в одну сторону. Если попытаться достичь этого при помощи батарей, потенциал трубок должен монотонно изменяться вдоль ускорителя. Разность потенциалов между первой и последней трубками должна достигать — в нашем случае — тех же 30 миллионов вольт, чего, как уже объяснялось, сделать нельзя. Этот путь оказывается, таким образом, закрытым.

Попробуем решить эту задачу, воспользовавшись источником переменного напряжения. Соберем схему так, как это показано на рисунке 2. Пусть протоны пересекают промежуток между первой и второй трубками в тот момент, когда знаки потенциалов на трубках соответствуют красным обозначениям. Проходя этот промежуток, протоны ускоряются. Как мы уже говорили, во время движения внутри трубки частицы не испытывают действия электрических сил. В это время можно изменить напряжение на трубках так, чтобы к моменту, когда протоны вылетят из второй трубки, знаки потенциалов соответствовали не красным, а синим обозначениям. В зазоре между второй и третьей трубками протоны снова приобретут энергию и затем «спрячутся» в третьей трубке. За то время, пока они летят сквозь нее, поменяем снова знаки потенциалов так, чтобы вернуться к красным обозначениям, и т.д. Таким образом, пролетая сквозь всю

*) 1 Мэв = 10^6 эв.

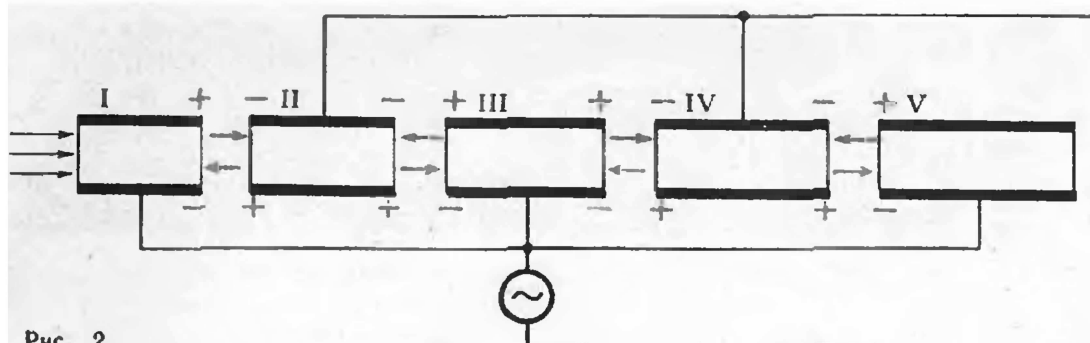


Рис. 2.

систему электродов, частицы непрерывно приобретают энергию.

Ускорители, построенные по рассмотренной схеме, называют *линейными ускорителями*, поскольку электроды в них располагаются вдоль прямой линии. Трубчатые электроды линейных ускорителей называют *трубками дрейфа* (вместо того чтобы говорить, что частицы внутри электродов движутся без ускорения, принято говорить, что они в них дрейфуют). Промежутки между трубками дрейфа называют *ускоряющими промежутками*.

В ускорителях прямого действия частицы летят непрерывной струей. В линейном ускорителе они движутся сгустками: ускоряются только те частицы, которые прошли ускоряющий промежуток в тот момент, когда электрическое поле имело нужное направление.

Легко видеть, что длина трубок дрейфа в линейном ускорителе должна постепенно возрастать. Частицы движутся вдоль ускорителя со все возрастающей скоростью. Они должны пролетать все трубки за одно и то же время, равное половине периода переменного напряжения. Длина n -й трубки равна, следовательно,

$$l_n = v_n \frac{T}{2}, \quad (1)$$

где v_n — скорость, с которой ускоряемые частицы ее пролетают, а T — период изменения переменного напряжения. Скорость v_n нетрудно рассчитать по кинетической энергии, которую имеет ускоряемая частица. Это особенно просто сделать в том случае, когда можно пользоваться обычной нерелятивистской формулой

$$K = \frac{m_0 v^2}{2}.$$

Массу частицы мы обозначили здесь через m_0 . Эта формула применима в тех случаях, когда кинетическая энергия много меньше энергии покоя частицы E_0 —

$$E_0 = m_0 c^2,$$

где c — скорость света. Энергия покоя E_0 для электрона равна 0,5 Мэв, а для протона — 938 Мэв. Мы видим, что в диапазоне энергий, в котором работают линейные ускорители, (до нескольких сот Мэв), пользоваться формулой $K = \frac{m_0 v^2}{2}$ для элект-

ронов нельзя, а для протонов — при не слишком больших ускорителях — можно.

Кинетическая энергия, которую имеет протон, проходящий n -ю трубку дрейфа, равна

$$K_n = \frac{m_0 v_n^2}{2}. \quad (2)$$

В n -ю трубку протон попадет, пройдя $(n-1)$ ускоряющий промежуток, то есть приобретя энергию $(n-1) \text{ eV}$ (эв). Если начальная энергия, с которой протон вводится, или, как обычно говорят, *инжектируется* в линейный ускоритель из какого-нибудь предварительного ускоряющего устройства, равна K_0 , то

$$K_n = K_0 + (n-1) \text{ eV}. \quad (3)$$

Найдя из (2) и (3) значение v_n и подставив его в (1), получим

$$l_n = \frac{T}{2} \sqrt{\frac{2}{m_0} [K_0 + (n-1) \text{ eV}]}. \quad (4)$$

Энергия инжекции K_0 обычно невелика, так что член K_0 играет роль поправки. Длина трубок дрейфа, грубо говоря, растет как корень из порядкового номера ускоряющего промежутка, за которым она расположена.

Рассчитаем для примера, какой должна быть длина трубки дрейфа, в которую попадает протон с энергией 10 Мэв. Напишем формулу (2) в виде

$$K_n = \frac{m_0 c^2}{2} \left(\frac{v_n}{c} \right)^2.$$

Из этой формулы найдем

$$v_n = c \sqrt{\frac{2K_n}{m_0 c^2}}.$$

Подставляя $K_n = 10 \text{ Мэв}$ и $m_0 c^2 = 938 \text{ Мэв}$, найдем $v_n = 0,146 c = 4,4 \times 10^7 \text{ м/сек}$. Мы видим, что при энергии 10 Мэв скорость протона всего в 7 раз меньше скорости света. При больших энергиях она еще выше.

Какую же длину должны иметь трубки дрейфа? С помощью формулы (4) найдем, что при частоте колебаний напряжения $f = 1/T = 100 \text{ гц}$ длина трубки дрейфа, которую пролетает протон с энергией 10 Мэв, должна составлять $2,2 \cdot 10^5 \text{ м} = 220 \text{ км}$, при частоте $1 \text{ Мгц} = 22 \text{ м}$, при частоте $10 \text{ Мгц} = 2,2 \text{ м}$. Все эти значения слишком велики. Чтобы понять это, достаточно вспомнить, что мы «конструировали» ускоритель на очень небольшую энергию 30 Мэв и речь все-таки шла о 60 трубках дрейфа! Чтобы получить линейный ускоритель разумных размеров, нужны существенно более высокие частоты.

В протонных ускорителях выбирают обычно частоты от 150 до 300 Мгц, а в электронных — еще выше. Для сравнения укажем, что длинноволновые радиостанции работают на частотах порядка 200 кГц, диапазон средних волн лежит при частотах $\sim 1 \text{ Мгц}$, а коротковолновые радиостанции работают при частотах $\sim 10 \text{ Мгц}$. Частота, с которой приходится менять потенциалы на трубках дрейфа линейного ускорителя, в 10–20 раз выше, чем высота, на которой работают коротковолновые радиостанции! При таких частотах волновые свойства полей оказываются очень существенными и даже выступают на первый план.

Заметим, что частотам 150–300 Мгц соответствуют длины волн $\lambda = c/T = c/f$ от 1 до 2 м. В этих условиях схема, изображенная на рисунке 2, оказывается очень наивной. Утверждая, что длина волны равна 1 м,

мы, тем самым, говорим, что направления вектора напряженности электрического поля в один и тот же момент времени противоположны в точках, разнесенных на 0,5 м. Это утверждение одинаково справедливо для точек, разделенных воздушным промежутком или соединенных между собой проводом, так что на протяжении проводника длиной в несколько метров напряжение несколько раз меняет свой знак. Поэтому нельзя считать, что, соединяя трубки I, III и V проводом, как это изображено на рисунке 2, мы обеспечиваем одновременную перемену знака напряжения на всех ускоряющих промежутках.

Поговорим подробнее о свойствах высокочастотных электромагнитных колебаний. Прежде всего, следует разъяснить, почему мы говорим об электромагнитных колебаниях, когда для ускорения достаточно одного только электрического поля. Связь электрических и магнитных явлений проявляется не только при высоких частотах. Даже при постоянных токах вокруг несущих ток проводников возникает магнитное поле. Однако, чем выше частота, тем теснее переплетаются электрические и магнитные поля, так что говорить о них порознь становится бессмысленно. Поэтому мы и ведем здесь речь об электромагнитных, а не об электрических колебаниях.

При низких частотах электрические и магнитные явления определяются зарядами и токами, то есть расположением и потенциалами близлежащих проводников. Электромагнитные колебания высоких частот хорошо распространяются и без проводников, как мы это знаем на примере радиоволн.

Электромагнитные колебания могут существовать не только в открытом пространстве, но и в замкнутых объемах (которые принято называть *резонаторами*). «Поведение» электромагнитных волн в резонаторах очень похоже на поведение звуковых волн. Вспомним (в качестве полезной аналогии), как происходят акустические колебания в трубах органа. Музыкант вызывает эти колебания, исполняя, например, фуги Баха. Воздух, проходящий через трубу, раскачива-

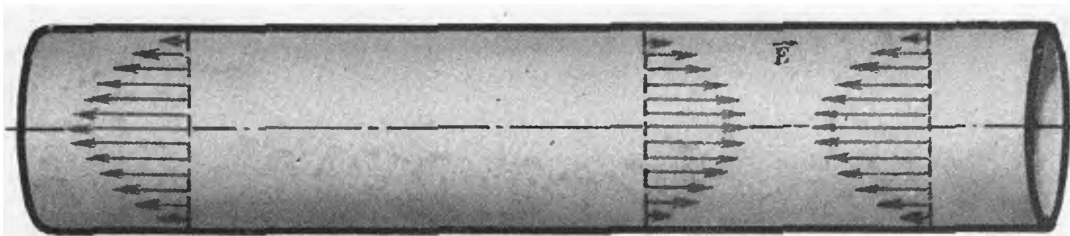


Рис. 3.

ет язычки, движение которых возбуждает в воздухе звуковые колебания.

В трубе можно возбудить не любые колебания, а только такие, на которые труба настроена. Настройка трубы определяется соотношением между ее длиной и длиной волны. В трубе, закрытой с обоих торцов, можно возбудить только такие волны (стоячие), для которых половина длины волны укладывается в трубе целое число раз. Чтобы исполнять на органе музыкальные произведения, нужно возбуждать в трубах самые разные звуки. Органы содержат поэтому тысячи труб.

Аналогичным образом устанавливаются электромагнитные колебания в замкнутых металлических трубах. Длина трубы должна быть хорошо согласована с частотой электромагнитных колебаний, на которых она должна работать. В эту тщательно сделанную полированную изнутри трубу — в резонатор линейного ускорителя — и помещают вдоль ее оси трубки дрейфа. Чтобы возбудить колебания, в трубу вводят излучатель — антенну или виток.

На рисунке 3 изображена картина силовых линий высокочастотного поля, которое создается в резонаторе в некоторый момент времени. Стрелками изображены силовые линии электрического поля. Силовые линии магнитного поля на рисунке не показаны. Они имеют вид колец, окружающих пучки линий электрического поля. Через половину периода электромагнитных колебаний силовые линии изменят свое направление на обратное.

Напряженность электрического поля, создаваемого в резонаторе, максимальна около его оси и падает почти до нуля у стенок. Если бы это было не так, то электрическое поле

создавало бы в стенках большие токи, которые приводили бы к нагреву стенок — к бесполезной затрате мощности. Поле такой конфигурации можно создать в трубе лишь в том случае, если ее диаметр согласован с длиной волны. Мы видим, что как длина, так и поперечные размеры резонатора должны подбираться очень тщательно.

Помещенные в резонатор трубки дрейфа несколько искажают картину электромагнитных колебаний. Внутри трубок возникает свободное от колебаний пространство, так как поле не может проникнуть сквозь их проводящие стенки. Поле вытесняется из трубок дрейфа в ускоряющие промежутки.

При ускорении частиц до очень больших энергий отпадает необходимость «прятать» частицы в трубки дрейфа. Через ускоритель можно пропускать обычные электромагнитные волны. Если скорость частицы близка к скорости света, то, попав на удачный участок волны, где вектор напряженности электрического поля достаточно велик и имеет нужное направление, частица все время будет ускоряться.

«Очень большие» энергии, о которых мы говорили, для разных частиц могут сильно отличаться друг от друга. Для протонов и других тяжелых частиц это энергии порядка многих тысяч Мэв. А для электронов энергия порядка нескольких Мэв является уже очень большой.

Ускорители, о которых мы сейчас говорили, называются *ускорителями с бегущей волной*. Большой линейный ускоритель с бегущей волной для ускорения электронов до энергии 2000 Мэв построен в физико-техническом институте АН УССР в Харькове.

Циклические ускорители

Линейные ускорители на большие энергии оказываются очень дорогими. Для примера укажем, что линейный ускоритель электронов в Стенфорде (США) на энергию 20 000 Мэв имеет длину более 3,5 км. На всем этом протяжении непрерывной чередой расположены уникальные по мощности и очень дорогие высокочастотные станции.

Более экономным оказывается свернуть траекторию ускоряемых частиц в спираль или в кольцо, непрерывно возвращая их к одним и тем же ускоряющим станциям. Такие ускорители называются *циклическими*. Для искривления траектории применяются магнитные поля. Как ни дороги магниты, как ни велики расходы на электроэнергию, необходимую для их питания, эти затраты с лихвой перекрываются экономией на высокочастотных устройствах.

Напишем несколько простых формул. Искривление траектории вызывается силой Лоренца, действующей на частицу со стороны магнитного поля. Эта сила, как известно, равна

$$F = evB, \quad (5)$$

где e — заряд частицы, v — ее скорость, а B — индукция магнитного поля (предполагается, что направление $\vec{v}$ перпендикулярно направлению $\vec{B}$). Сила Лоренца перпендикулярна как направлению магнитного поля, так и направлению скорости частицы. Она сообщает частице центростремительное ускорение $a = \frac{v^2}{R}$, так что движение происходит по кругу. Величина силы F и радиус окружности связаны, как известно, формулой

$$F = \frac{mv^2}{R}. \quad (6)$$

Приравняв правые части формул (5) и (6), найдем

$$evB = \frac{mv^2}{R},$$

или

$$p = mv = eBR, \quad (7)$$

где $p = mv$ — импульс частицы. Если понимать под массой релятивистскую массу частицы, определяемую

формулой

$$m = m_0 \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (8)$$

то соотношение (7) оказывается справедливым и при релятивистских энергиях.

Формула (7) показывает, что с индукцией магнитного поля и с размерами ускорителя простым соотношением связана не привычная нам энергия частицы, а ее импульс. Импульс и кинетическая энергия в релятивистской механике связаны довольно сложной формулой

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{K(K + 2m_0c^2)}.$$

Под корнем этого выражения стоит величина, имеющая размерность квадрата энергии. Если умножить это выражение на c , то получим

$$pc = \sqrt{K(K + 2m_0c^2)}.$$

Эта формула показывает, что вместо импульса p удобно рассматривать пропорциональную ему величину pc , имеющую размерность энергии (pc принято измерять в электрон-вольтах). При $K \ll m_0c^2$ (нерелятивистский случай) это выражение переходит в знакомую формулу $p = \sqrt{2m_0K}$, а при $K \gg m_0c^2$ (большие энергии) имеем просто $pc = K$. В этих единицах формула (7) принимает знакомый всем физикам вид

$$pc \text{ (эв)} = 3 \cdot 10^8 BR \text{ (мл} \cdot \text{м)}. \quad (9)$$

При помощи формулы (9) можно оценить размеры циклических ускорителей. Магнитные поля всегда стремятся выбирать сильнее, чтобы иметь ускоритель меньших размеров и веса. Но при индукции 2 *мл* железа, из которого делают электромагниты, насыщается. Поэтому получать более сильные поля в ускорителях с железными магнитопроводами не удастся. В вакуумной камере ускорителей индукция поля обычно не превосходит 1,6 *мл*. Обычно в ускорителях между магнитами приходится оставлять промежутки, необходимые для размещения ускоряющих станций, корректирующих устройств, аппаратуры для ввода и вывода частиц и т. д. В результате этого среднее значение $|\vec{B}|$ оказывается еще

ниже — около 1,2 тл. Подставляя в формулу (9) $B=1,2$ тл, найдем

$$R \approx 3 \cdot 10^{-9} \text{ pc.} \quad (10)$$

Приведем некоторые оценки для протонов. Для ускорения протонов до энергии 20 Мэв ($pc=200$ Мэв) необходим ускоритель с радиусом $R \approx 60$ см. При энергии 600 Мэв ($pc=1200$ Мэв) $R \approx 3,6$ м. При ускорении до 10 Гэв* ($pc=11$ Гэв) $R=30$ м (ускоритель Института теоретической и экспериментальной физики в Москве, ускоритель Лаборатории высоких энергий в Дубне). При энергии 70 Гэв (Серпуховский ускоритель) $R \approx 200$ м, а при энергии 500 Гэв (ускоритель Лаборатории имени Ферми, США) $R \approx 1,5$ км. Эти оценки определяют масштаб сооружений и ставят жесткие экономические преграды на пути повышения предельной энергии ускорителей. Размеры, а вместе с ними и стоимость циклических ускорителей в конце концов определяются просто магнитными свойствами железа.

Возможен ли здесь какой-либо прогресс? Предельные индукции, достижимые при использовании различных ферромагнетиков, очень близки друг к другу, так что надеяться на изобретение сплава с существенно большей индукцией насыщения не приходится. Единственным реальным путем является отказ от обычных магнитов и переход к магнитам на сверхпроводниках. При этом индукция может быть поднята в 2—3 раза. Как ни дороги сверхпроводники и как ни сложно работать с низкими температурами, ускорительная техника должна начать двигаться в эту сторону. Сооружение первого сверхпроводящего ускорителя уже осуществляется в Лаборатории имени Ферми.

Вернемся к формуле (9). По мере ускорения частиц их импульс p увеличивается, а значит, должны возрастать либо радиус траектории R , либо индукция поля B . Проще всего, конечно, работать в постоянном магнитном поле. Траектория ускоряемых частиц имеет в этом случае вид раскручивающейся спирали. Формула (10) определяет радиус ее наружного вит-

ка. Магнитные полюсы электромагнита имеют форму дисков, перекрывающих всю спираль. Так устроены *циклотроны*. Сделать сплошной магнитный полюс радиусом 60 см или 3,6 м еще можно. Однако для ускорения протонов до энергии 10 Гэв необходим полюс радиусом около 30 м. Делать такие сплошные полюсы невозможно. Именно это обстоятельство ограничивает предельные энергии, достигаемые при помощи циклотронов.

В ускорителях на большие энергии магнитное поле создается только на узкой кольцевой дорожке. Радиус R , по которому должны двигаться частицы, таким образом, задан, и траектория частиц в конце и в начале ускорения одна и та же. Увеличение импульса частиц должно при этом сопровождаться возрастанием магнитного поля. Ускорители с кольцевым возрастающим во времени полем носят название *синхротронов* (магнитное поле возрастает синхронно с импульсом).

Циклотроны, фазотроны и микротроны

Циклотроны применяются для ускорения протонов и тяжелых ионов. Они были придуманы Дж. Лоуренсом. Схема устройства циклотрона изображена на рисунке 4. Магнитное поле, «заворачивающее» частицы, создается в зазоре между полюсами электромагнита. В этот зазор помещается вакуумная камера, напоминающая по форме гигантскую консервную банку. В вакуумной камере расположены электроды, между которыми создается ускоряющее электрическое поле. Они тоже похожи на консервную банку. Чтобы получить электроды, эту банку надо разрезать по диаметру и слегка раздвинуть половинки так, чтобы между ними образовалась щель. Каждая из половинок и образует электрод. К ним подводится высокочастотное ускоряющее напряжение. Как видно из рисунка 4, б, электроды напоминают по форме латинскую букву *D*. Они называются *дуантами*. Щель между дуантами выполняет функцию ускоряющего промежутка.

Дуанты в циклотроне играют ту же роль, что и дрейфовые трубки в

*) 1 Гэв = 10^9 Мэв.

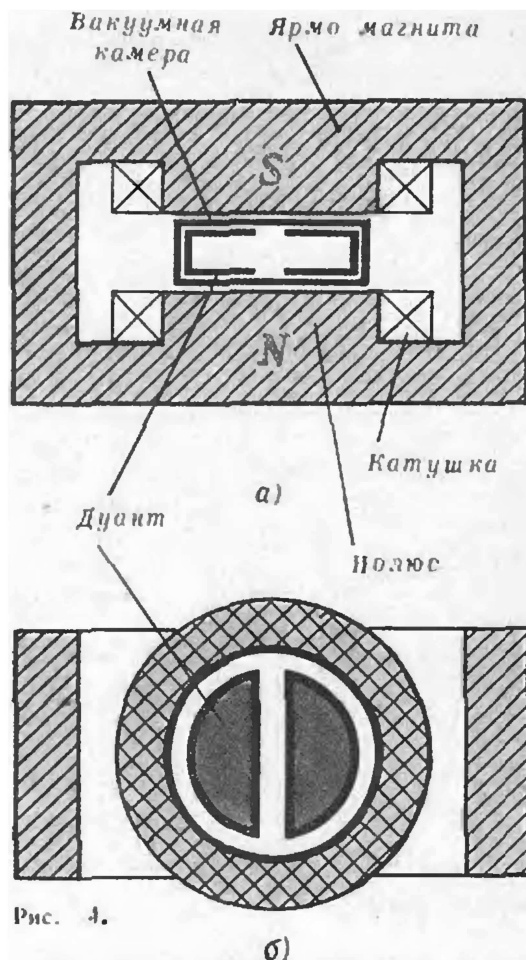


Рис. 4.

лнейном ускорителе. Пока траектория частиц проходит внутри дуантов, они защищены от действия электрического поля, а когда поле между дуантами приобретает нужное направление и величину, частицы вылетают в зазор, ускоряются в нем и вновь прячутся внутрь дуантов. Таким образом происходит ускорение.

От чего зависит период T обращения частицы в циклотроне? Частица, движущаяся со скоростью v , проходит окружность радиуса R за время $2\pi R/v$. Так как $v = \frac{eBR}{m}$ (см. (7)), то

$$T = 2\pi \frac{m}{eB}. \quad (11)$$

Период обращения определяется массой частицы и величиной индукции магнитного поля. При небольших энергиях вместо релятивистской массы m можно подставлять массу покоя m_0 . Если магнитное поле постоянно во всем промежутке между дуантами (плоские магнитные полюсы), правая часть равенства (11) превращается в

константу и период обращения оказывается постоянным. Этот результат имеет важнейшее значение. Частота питающего циклотрон высокочастотного напряжения неизменна, неизменен и период обращения частиц. Если частота выбрана правильно, то в течение всего цикла ускорения частицы вовремя попадают в ускоряющий промежуток между дуантами и вовремя прячутся внутрь дуантов.

Частицы непрерывно вводятся в камеру циклотрона вблизи от ее центра. Приобретая энергию, они раскручиваются по виткам спирали и покидают циклотрон. Пока одни частицы заканчивают цикл ускорения, другие находятся на середине пути, а третьи его еще только начинают. Вылетающая из циклотрона «струя» ускоренных частиц состоит из следующих друг за другом сгустков частиц, пролетающих ускоряющие промежутки в подходящие для ускорения моменты времени.

На странице 2 приведена фотография циклотрона для ускорения многозарядных ионов, который находится в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне.

Обратимся к подводным камням, которые пока ускользнули от нашего внимания. Главное затруднение связано с релятивистскими поправками. Заменять m на m_0 , как мы это делали до сих пор, можно только при небольших энергиях. Формула (8) показывает, что с увеличением скорости масса частицы постепенно растет. Как это сказывается на синхронности обращения частиц и колебаний ускоряющего поля?

Вернемся к формуле (11). Не первый взгляд не представляет труда обеспечить постоянство периода обращения и в этом случае. Масса частицы m постепенно возрастает. Вместе с тем возрастает радиус описываемого витка спирали. Казалось бы, нетрудно обеспечить постоянство отношения m/B , а значит, и постоянство T . Для этого достаточно создать между полюсами в циклотроне поле, индукция которого увеличивалась бы от центра к периферии. Однако этот путь закрыт. Оказывается, что при такой форме магнитного поля движение частиц становится неустойчивым:

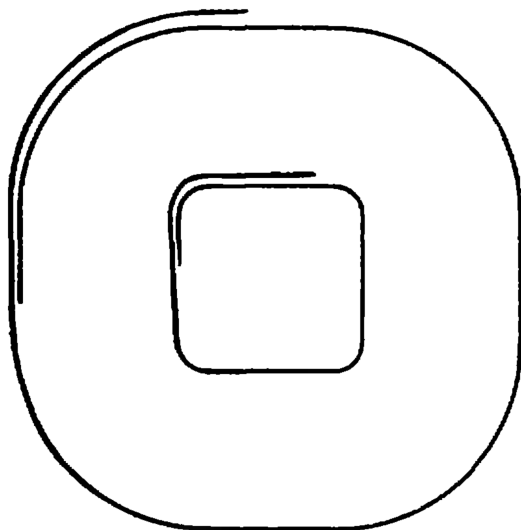


Рис. 5.

даже при небольших отклонениях от средней горизонтальной плоскости ускоряемые частицы быстро уходят вверх или вниз и ударяются о крышки дуантов. Поэтому обычные циклотроны, в которых не принимается мер для компенсации эффектов, связанных с релятивистским возрастанием массы, могут ускорять протоны только до небольших энергий — приблизительно до энергии 20 Мэв.

Второй путь заключается в том, чтобы примириться с тем, что период обращения частиц постепенно возрастает, и соответственно изменять период ускоряющего напряжения. Именно так чаще всего и поступают. При этом, однако, циклотрон уже не может работать непрерывно. В тот момент, когда период высокочастотного напряжения увеличился в соответствии с энергией ускоряемых частиц, впускать новые частицы не имеет смысла — их период обращения не равен периоду изменения высокочастотного поля. Когда цикл ускорения закончен, частоту можно снова поднять и инжектировать новые частицы. Циклотрон, таким образом, будет выдавать отдельные порции или, как часто говорят, «плевки» ускоренных частиц. Ускорители подобного типа строят до энергии порядка 1 Гэв (при ускорении до больших энергий применяют кольцевые машины). Такие ускорители называют *фазотронами*.

Есть и третий путь. Можно добиться того, чтобы период обращения не зависел от энергии частицы, услож-

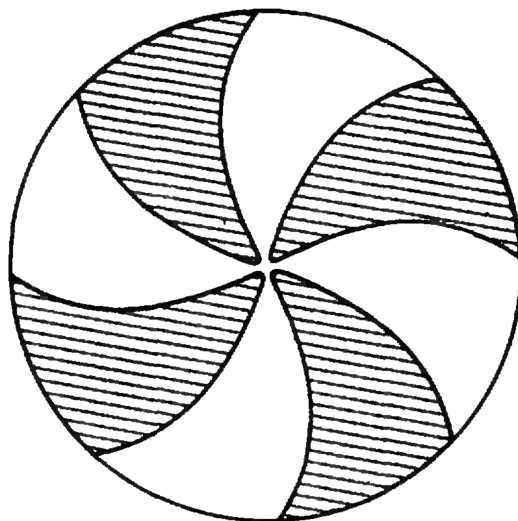


Рис. 6.

нив форму ее траектории. Так поступают в *изохронных циклотронах*. Как мы выяснили, при круговой (или, точнее говоря, спиральной) форме траектории период обращения частиц возрастает с радиусом. Чтобы избежать этого, искусственно увеличим время движения частицы при малых энергиях. Это можно сделать, удлинив траекторию, например, придав ей вместо окружности форму многоугольника со скругленными углами. Траектории такого вида изображены на рисунке 5. По мере увеличения энергии частицы углы многоугольника все более скругляются, и траектория частицы приближается к круговой.

Чтобы заставить частицу двигаться по такой траектории, надо создать магнитное поле сложной конфигурации. Для этого электромагнит изохронного циклотрона делают из нескольких отдельных магнитов, располагающихся на участках, где траектория должна скругляться. Полюсы электромагнита имеют сложную форму (см. рисунок 6).

Указанный путь — при кажущейся его привлекательности — очень сложен. Но по нему приходится идти, если нужны большие интенсивности, а значит, не отдельные «плевки», а добротная «струя» ускоренных частиц.

Заканчивая обзор ускорителей, используемых постоянно во времени магнитные поля, скажем несколько слов о *микротронах*. Так называются ускорители электронов, придуманные

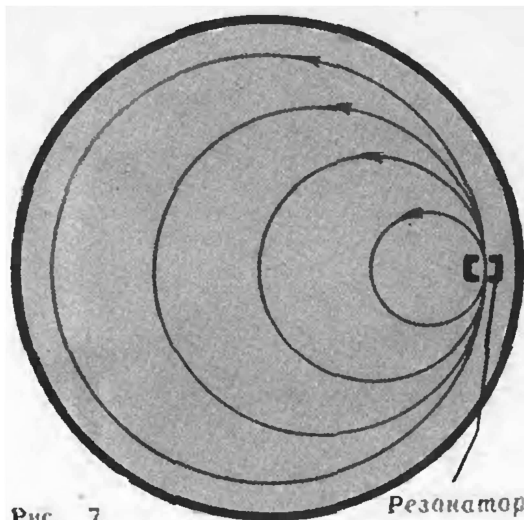


Рис. 7.

Резанатор

в свое время академиком В. И. Векслером, затем незаслуженно забытые и, наконец, недавно вновь возвращенные к жизни. Траектории электронов в таких ускорителях имеют вид окружностей, касающихся друг друга в одной точке, как это изображено на рисунке 7. В общей для всех окружностей точке помещен ускоряющий промежуток (резанатор). Пройдя через него очередной раз, частица ускоряется и переходит на следующую окружность. Другие электроны при этом движутся по предыдущим окружностям.

Для успешной работы микротрона необходимо, чтобы электроны приходили к ускоряющему промежутку в тот момент, когда поле имеет нужное направление. Можно показать, что это условие выполняется, если частица при прохождении ускоряющего промежутка приобретает энергию, равную (или кратную) ее энергии покоя m_0c^2 . (Этот расчет очень прост, и, пользуясь уже приведенными нами формулами, читатель может сделать

его самостоятельно.) Тогда каждый следующий виток траектории электроны будут проходить дольше, чем предыдущий, на время, равное одному или нескольким периодам колебаний ускоряющего поля. И каждый раз они будут попадать в резонатор в тот момент, когда ускоряющее поле будет направлено в нужную сторону.

Такие ускорители можно построить только для электронов, потому что для более тяжелых частиц необходимый прирост энергии оказывается фантастически большим. А для ускорения электронов микротроны с успехом применяются и позволяют получать почти непрерывные пучки большой интенсивности.

Упражнения

1. В технике линейных ускорителей длину трубок дрейфа выражают не через период электромагнитных колебаний, а через длину их волны. При этом вместо скорости частиц v вводят относительную скорость $\beta = v/c$, где c — скорость света. Получите соответствующую формулу.

2. Рассчитайте величину pc для протонов с кинетической энергией $K = 20, 200$ и 2000 Мэв при помощи соотношения Эйнштейна

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4.$$

В этой формуле E — полная энергия, равная $K + m_0c^2$. Покажите, что формула

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{K(K + 2m_0c^2)},$$

которой мы пользовались, эквивалентна этому соотношению. (Напомним, что для протонов $m_0c^2 = 938$ Мэв.)

3. Фазотрон в Дубне ускоряет протоны до энергии 680 Мэв. Во сколько раз должна измениться частота ускоряющего высокочастотного поля за время ускорения? Считать, что магнитное поле от радиуса не зависит.

4. Покажите, что для успешной работы микротрона нужно, чтобы при каждом прохождении ускоряющего промежутка частица приобретала энергию m_0c^2 (или несколько m_0c^2).

Задачи наших читателей

1. Даны две окружности с радиусами R и r . Их общие внутренние касательные взаимно перпендикулярны. Найти площадь треугольника, образованного этими касательными и общей внешней касательной к данным окружностям.

Ж. Лео (г. Черновцы)

2. Дана трапеция $ABCD$ с основаниями $|AD|=a$, $|BC|=b$. Прямая l параллельна основаниям и пересекает сторону AB в точке M , сторону CD в точке N , причем $(MC) \parallel (AN)$. Найти $S_{AMCN} : S_{ABCD}$.

В. Ленкарев
(г. Луковичи)

3. Решите следующие уравнения (xy — число, записанное цифрами x, y и т.п.):

а) $\overline{xy} \cdot \overline{0z} = 1$;

б) $\frac{1}{x} = 0,1 \overline{xxx \dots}$

в) $\overline{xx} \cdot \overline{yy} = (x-1) \overline{xx} (x-1)$.

И. Михалкович
(Минская обл.)

4. Найти все действительные корни уравнения $1 + 2x + 3x^2 + 4x^3 + \dots + 1977x^{1976} = 0$.

П. Парамонов
(г. Москва)