

4.02.75
1975

Г. И. БАБАТ

УСКОРИТЕЛИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ЦК ВЛКСМ
„МОЛОДАЯ ГВАРДИЯ“

1977

Всего три десятилетия тому назад началось «освоение» атомного ядра: проникновение в структуру ядра, изучение ядерных реакций. На развитии ядерной физики и техники теперь сосредоточены главные научные силы всех стран. Здесь проходит передний край науки XX века.

Важнейшим инструментом для исследования атомного ядра являются ускорители заряженных частиц. Им посвящена эта книжка, где в популярной форме рассказывается о принципах ускорения частиц, о различных типах ускорителей и об устройстве самой большой установки — синхрофазотроне.

Автор — доктор технических наук профессор Георгий Ильич Бабат — известен своими научными трудами и изобретениями в различных областях электротехники. Он принимал участие в разработке первых ускорителей, которые строились у нас в СССР задолго до второй мировой войны. Г. И. Бабат написал ряд популярных статей и книг: «Страна ПЭЭФ», «Рассказы о токах высокой частоты», «Электричество работает».

Бабат Георгий Ильич
УСКОРИТЕЛИ

Редактор *В. Федченко*

Художники *Л. Вендров и М. Силаева*

Худож. редактор *А. Степанова*

Техн. редактор *И. Шувалов*

А06106 Подп. к печ. 19/VI 1957 г. Бумага 84 × 108^{1/2} = 1,25 бум. л. =
= 4,1 печ. л. Уч.-изд. л. 4,098 Тираж 50 000 экз. Цена 1 р. 25 к.

Заказ 709

Типография «Красное знамя» изд-ва «Молодая гвардия».

Москва, А-56, Сущеская, 21.

**«Значительно расширить в шестой
пятилетке применение атомной энергии
в мирных целях».**

Из Директив XX съезда
КПСС по шестому пятилетне-
му плану развития народного
хозяйства СССР на 1956 —
1960 годы.

ВВЕДЕНИЕ

В начале нашего века было установлено, что атом имеет сложное строение.

Вокруг центрального ядра, несущего положительный электрический заряд, движутся отрицательно заряженные частицы — электроны.

Поперечник атома равен примерно одной стомиллионной доли сантиметра. А поперечник ядра — еще в 100 тысяч раз меньше.

Но и это невообразимо малое атомное ядро, в свою очередь, является сложным образованием. Оно состоит у разных элементов из различных комбинаций ядерных частиц — нуклонов (от латинского слова «нуклеус» — ядро).

По современным воззрениям, ядра всех атомов складываются из частиц двух типов. Одни из них имеют массу, равную 1836 электронным массам ($1,6 \cdot 10^{-24}$ грамма), и положительный электрический заряд, равный по величине отрицательному заряду электрона. Эти частицы называют протонами. Ядро простейшего из атомов — обычного водорода — состоит из одного-единственного протона. Другие ядерные частицы имеют массу чуть больше массы протона (на 2,5 электронной массы), но не имеют заряда — это нейтроны.

Но этими двумя видами нуклонов ядро не исчерпывается. Иногда при соударениях атомных ядер из них вылетают позитроны — частицы с массой электрона, но, в отличие от него, с положительным зарядом. В других ядерных процессах удается обнаружить ча-

стицы с массой, промежуточной между массами электрона и протона, — так называемые мезоны (от латинского слова «мезос» — промежуточный). Эти частицы бывают с разными зарядами, и все они очень недолговечны. При одних процессах из ядер вылетают очень легкие частицы — нейтрино, при других — тяжелые — гипероны. Ядро неисчерпаемо. Физики выявляют все новые и новые детали в его структуре.

Чтобы исследовать сложное строение атомного ядра, ученые поступают подобно ребенку, который ломает игрушку, желая выяснить, что у нее внутри.

Ядро является исключительно прочной конструкцией, значительно более прочной, чем всякие другие более крупные образования материи. И его не так уж просто «разломать».

Два твердых тела, например два куска самой прочной стали, разбиваются, связь между их атомами нарушается, если скорость соударения этих тел равна всего лишь нескольким сотням метров в секунду. Снаряд, летящий со скоростью около тысячи метров в секунду, разрушает самую твердую и прочную стальную плиту.

Нарушить структуру атома, оторвать от атома один или несколько электронов (такой атом с недостатком электронов называют ионом), можно лишь в том случае, если скорость его соударения с другим атомом будет равна нескольким километрам в секунду.

Но чтобы разбить атомное ядро, разорвать связи между нуклонами, необходимо затратить работу, в сотни тысяч раз, а иногда и в миллионы раз большую, нежели та, которая необходима для нарушения структуры атома. Почему же так трудно разломать эту систему?

Все ядра несут положительный электрический заряд и при взаимном сближении до расстояний того же порядка, что и поперечник самого ядра, между ними возникают огромные силы отталкивания.

Чтобы преодолеть эти силы, заставить два ядра столкнуться друг с другом, необходимо сообщить соударяющимся ядрам скорость, близкую к скорости света.

Наука об атомном ядре является теперь одним из важнейших разделов физики. Эта наука открыла человечеству новые неисчерпаемые источники энергии, привела к стремительному развитию множество новых отраслей техники.

Для изучения структуры ядер и различных их превращений физики разработали приборы, при помощи которых можно сообщать высокие скорости и энергии мельчайшим заряженным атомным частицам — ионам и электронам. Эти приборы получили название ускорителей.

Первые ускорители заряженных частиц, при помощи которых в конце двадцатых годов был начат штурм атомного ядра, представляли собой небольшие стеклянные трубки. Они изготавливались кустарным способом в физических лабораториях. Но за каких-нибудь 20—25 лет ускорители заряженных частиц выросли в гигантские промышленные сооружения. Современный ускоритель занимает площадь большую, чем средний машиностроительный завод. На сооружение такого ускорителя расходуются десятки тысяч тонн металла. А электроэнергии он потребляет больше, чем средний районный город.

В средних школах изучаются принципы устройства и действия конструкций микроскопов и телескопов. Эти оптические приборы дали возможность человеку узнать о существовании мельчайших микробов и бактерий, открыть законы движения небесных тел.

Важнейшими орудиями исследования атомной физики являются ускорители заряженных частиц. В науке наших дней они занимают такое же место, какое занимали микроскопы и телескопы в науке прошлых веков. Расширение наших познаний и о микромире атомного ядра и о далеких звездных мирах возможно при помощи все новых и новых опытов с ускорителями заряженных частиц.

Успехи техники в области ускорителей сказываются и на различных других областях. Новые идеи, развивающиеся в связи с задачами ускорения заряженных частиц, оплодотворяют и электротехнику и радиотехнику.

Каждый, кто интересуется современной физикой, электротехникой, радиотехникой, должен быть знаком с принципами устройства ускорителей заряженных атомных частиц.

СНАРЯДЫ ДЛЯ ОБСТРЕЛА АТОМОВ

Движение заряженных частиц в электрических полях можно сравнить с движением тяжелых шаров в поле тяготения. Электрические силы ускоряют заряженные частицы — электроны и ионы — подобно тому, как силы тяжести влекут массивные шары с вершины горы к ее подножью. Скорость тела, летящего вниз к земле, растет как корень квадратный из высоты падения: она увеличится вдвое, если высоту падения увеличить вчетверо. Энергия же падающего тела равна его весу, помноженному на высоту падения.

В механике приходится встречаться с относительно небольшими скоростями. Однажды на строительстве мачты для радиопередатчика я видел, как верхолаз уронил молоток с высоты в 150 метров. Молоток летел со свистом. Ударившись о землю, он ушел в нее так глубоко, что не было видно рукоятки. Но скорость молотка в момент удара была всего около 55 метров в секунду. В первую мировую войну самолеты, атакуя пехоту, сбрасывали заостренные стальные спицы размером с карандаш. Падая с высоты, скажем, 2 километров, спицы приобретали скорость около 200 метров в секунду. Запаса энергии в них было достаточно для того, чтобы пронзить человека насквозь сверху донизу.

Когда заряженная частица движется под действием электрических сил, то аналогией высоты падения является электрическое напряжение — разность потенциалов, измеряемая обычно в вольтах. Аналогией же веса падающего тела является заряд частицы. Энергия, приобретаемая заряженной частицей, равна произведению ее заряда на напряжение.

Так как наименьший электрический заряд — это заряд электрона, а заряды других частиц могут быть только кратные ему, то единицей для измерения энергии заряженных частиц часто служит один электроно-

вольт (1 эв). Более крупная единица — это миллион электроновольт (1 Мэв).

В электроновольтах измеряют энергию различных молекулярных и ядерных реакций.

При всех химических реакциях освобожденная или поглощенная энергия, приходящаяся на каждый реагирующий атом, не превышает единиц электроновольт.

Когда, например, один атом углерода соединяется с двумя атомами кислорода и образуется молекула углекислого газа, то выделяется энергия, равная 4,2 электроновольта, то есть на один атом приходится 1,4 электроновольта.

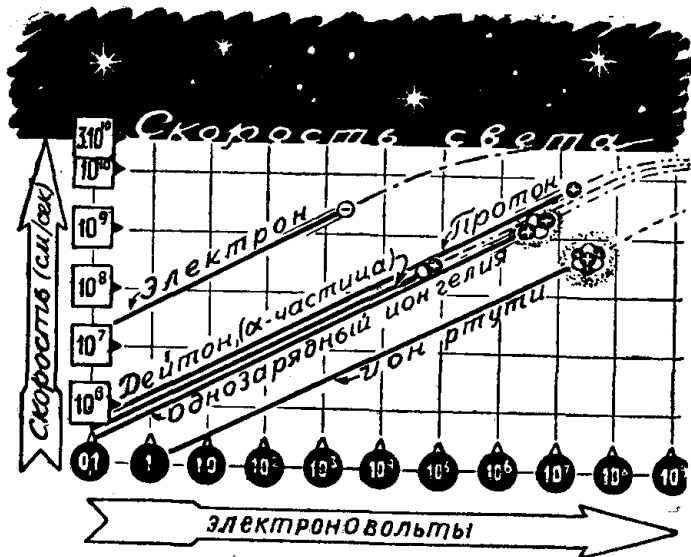
Электрон, разогнанный напряжением в несколько вольт, может толчком разрушить молекулу любого химического соединения: например, разбить молекулу воды на атомы водорода и кислорода.

При бомбардировке ядер атомов положительно заряженными водородными ионами (протонами) энергия бомбардирующей частицы должна быть равна нескольким миллионам электроновольт (от 1 до 10). Только такая «энергичная» частица может войти в контакт с ядром и вызвать ядерную реакцию. Чем выше атомный номер элемента, тем больше положительный электрический заряд его ядер и тем большую энергию должна иметь бомбардирующая частица, чтобы преодолеть энергетический барьер этого ядра и подойти вплотную к его «поверхности».

При всех ядерных реакциях поглощенная или освобожденная энергия, приходящаяся на одно ядро, измеряется уже не единицами, как в химических реакциях, а миллионами электроновольт. Как же связаны между собой энергия, масса и скорость бомбардирующих частиц?

На странице 8 показана зависимость скорости различных заряженных частиц от действующего на них электрического напряжения. Все кривые ограничены сверху скоростью света, равной 300 тысячам километров в секунду. И никакие волны или частицы не могут двигаться быстрее.

Пока заряженные частицы ускоряются сравнительно невысоким напряжением, движение их подчиняется



Зависимость скоростей электрона и некоторых ионов от пройденной разности потенциалов.

Под действием напряжения в 2600 вольт электрон приобретает скорость, равную одной десятой доли скорости света. При повышении напряжения до нескольких десятков тысяч вольт масса электрона не изменяется, а скорость его растет, как корень квадратный из напряжения. При более высоких напряжениях масса электрона начинает заметно расти, а скорость увеличивается уже медленнее, чем корень квадратный из напряжения. При 3 миллионах вольт скорость электрона достигает 99 процентов от скорости света. А при еще более высоких напряжениях скорость электрона практически не повышается, а увеличивается только его масса.

При напряжениях в десятки тысяч вольт ион обычного водорода (протон) движется в 40 раз медленнее, а ион ртути — в 600 раз медленнее электрона. При очень высоких напряжениях скорости любых ионов и электронов приближаются к скорости света.

законам классической механики: скорость растет, как корень квадратный из пройденной разности потенциалов. Но при значительном увеличении напряжения вступают в силу законы теории относительности Эйнштейна — законы так называемой «релятивистской механики». Согласно этой теории скорость дви-

жущегося тела не может превысить скорости света, и, кроме того, с возрастанием пройденной разности потенциалов масса ускоряемой частицы начинает нарастать.

Самая легкая заряженная частица, которая может быть ускорена — это электрон. У него наибольшее из всех атомных частиц отношение электрического заряда e к массе m . В электрическом поле он приобретает большую скорость, чем всякая другая частица. Пройдя разность потенциалов в один вольт, электрон приобретает скорость 600 километров в секунду. В телевизионных приемниках на электронно-лучевые трубки подается около 10 тысяч вольт. При таком напряжении электроны летят со скоростью почти в 60 тысяч километров в секунду, что составляет одну пятую скорости света.

Испускаются электроны и при естественном распаде некоторых радиоактивных ядер. Потoki таких электронов получили в свое время* название бета-лучей. И в настоящее время быстрые электроны часто называют бета-частицами.

Электрон не только самая легкая атомная частица, но по сравнению с нуклонами она, если можно так выразиться, еще и «рыхлая». Плотность материи в электроне меньше, нежели в протоне. Если нуклон сравнить со свинцовой дробинкой, то электрон можно представить, как комок ваты.

Когда электрон летит через вещество, то он «цепляется» за электронные оболочки атомов, рассеивается ими и растрчивает при этом свой запас энергии. Для многих опытов необходимо вести обстрел исследуемого вещества не электронами, а более плотными и тяжелыми частицами — атомными ядрами.

Самое легкое из всех атомных ядер — это ядро обычного водорода — протон. Его электрический заряд по величине такой же, как у электрона. Но масса почти в 2 тысячи раз больше, чем у электрона. Поэтому под действием одних и тех же электрических сил протон

* В начале нашего века, вскоре после того как был открыт радий.

движется медленнее, чем электрон. При низких ускоряющих потенциалах протоны движутся примерно в 42 раза медленнее электрона*. При высоких потенциалах скорости протонов, так же как и скорости электронов, приближаются к скорости света.

Помимо обычного легкого водорода, у которого ядра состоят из одного-единственного протона, существует еще тяжелый водород — дейтерий. Его ядра (дейтоны, или дейтроны) состоят из одного протона и одного нейтрона и также очень часто применяются для ядерной бомбардировки.

Следующий за водородом элемент в периодической системе Менделеева — это гелий. Его ядра состоят из двух протонов и двух нейтронов. Это самое устойчивое образование из нуклонов.

При распаде ядер многих радиоактивных элементов из них вылетают ядра гелия — гелионы. В свое время, когда одновременно с бета-излучением было обнаружено и это излучение, и не было еще установлено, что это ядра гелия, они получили название альфа-частиц. Такое название сохранилось за ними и поныне. Альфа-частицы, так же как электроны, протоны и дейтоны, могут быть ускорены до высоких энергий и использованы для разрушения ядер.

Кроме названных ионов водорода и гелия, для бомбардировки ядер иногда применяются и другие, более тяжелые ионы.

Необходимо заметить, что любая движущаяся элементарная частица сопровождается волной. Можно даже выразиться так: любая движущаяся частица обладает одновременно и свойствами частицы и свойствами волны. Волновая механика дает уравнение для определения длины этой волны: $\lambda = h/mv$, где h — это некоторая постоянная величина, называемая «постоянной Планка».

Чем больше скорость частицы v и ее масса m , тем короче длина волны, соответствующая этой частице.

На странице 12 показано, как меняются масса ча-

* При всех прочих равных условиях скорости электронов и протонов относятся обратно пропорционально корню квадрату из их масс.

стицы и длина волны, соответствующая этой частице, с увеличением энергии.

В микромире электронов и атомных ядер многие привычные, казалось бы очевидные, понятия нуждаются в пересмотре или могут быть применены только с оговорками. Мы можем точно указать размер мяча или дробинки, так как эти предметы имеют четко обозначенную поверхность, на которой плотность материи резко изменяется. А в комке ваты или в клубах пара, например, нет такой четко обозначенной поверхности. Здесь надо условливаться, что именно следует считать «размером» (например, расстояние, на котором плотность упадет до некоторой заданной величины). В атомной частице при удалении от центра плотность материи падает плавно, постепенно: четко обозначенной «поверхности» у этой частицы нет. В этом отношении ее можно сравнить скорее с клубом пара, чем с дробинкой.

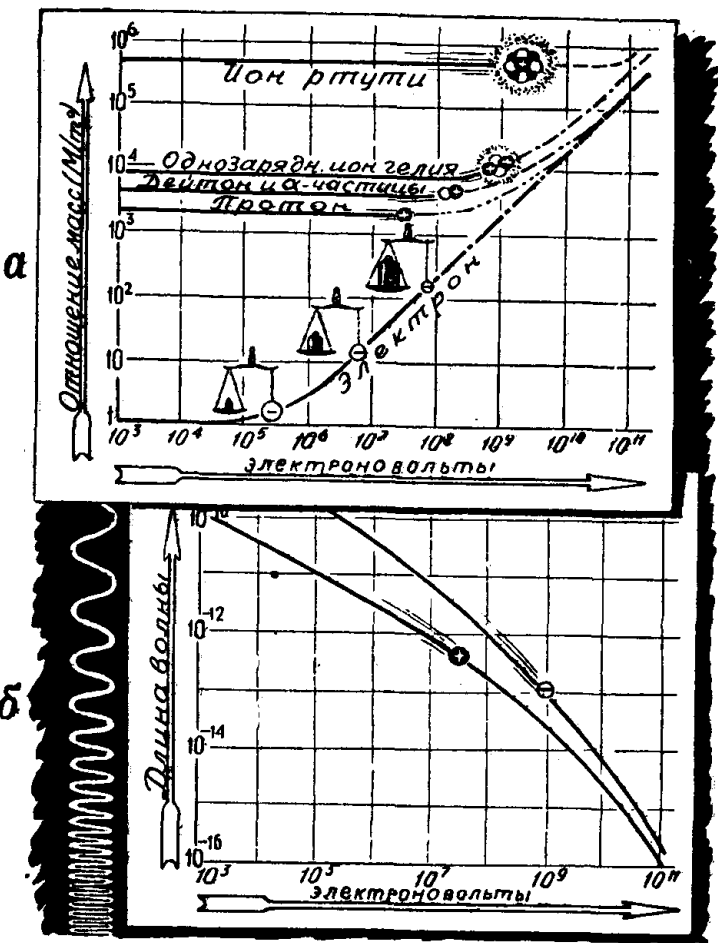
Сделав это разъяснение понятия «размер атомной частицы», укажем на замечательную особенность микромира: с приобретением энергии атомная частица становится тяжелее и вместе с тем все компактнее, все меньшего «размера». С повышением энергии частица как бы сжимается. Электрон с высокой энергией становится таким же плотным, как и протон.

У всех атомных частиц, обладающих большими энергиями, скорость достигает скорости света, масса увеличивается, а длина волны становится малой по сравнению не только с размерами сложного ядра, но и единичного «малоэнергичного», то есть имеющего небольшую скорость, нуклона.

Чем выше энергия частицы, тем более тонким зондом она является и ею можно «прощупывать» внутреннюю структуру нуклона. Вот почему физики стремятся получать частицы со все большими энергиями.

Для протона с энергией в один миллиард электронвольт (1000 Мэв) длина волны $\lambda \approx 10^{-14}$ сантиметра. Протон с такой или еще большей энергией, пронизывая атомное ядро, взаимодействует уже не со всем ядром, а с одним отдельным нуклоном.

Используя частицы таких высоких энергий, уда-



а — зависимость массы электрона и некоторых ионов от их энергии (в электронвольтах);
 б — зависимость длины волны, сопровождающей электрон и некоторые ионы, от энергии этих частиц.

дось установить, что и в нуклонах материя распределена неравномерно, что нуклон по своему строению несколько напоминает вишню: более плотная сердцевина (косточка) окружена менее плотной оболочкой (мезонными облаками).

ГОНКИ В БЕЗВОЗДУШНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Когда проводят соревнования по бегу, то постороннюю публику на беговую дорожку не допускают. Чтобы дать возможность спортсмену показать хороший результат, прежде всего надо освободить пространство для бега. В толпе невозможно развить большую скорость.

Подобным образом поступают и при ускорении элементарных частиц. В каждом кубическом сантиметре воздуха при атмосферном давлении и комнатной температуре находится $2 \cdot 10^{19}$ молекул. Если через воздушное пространство пропустить поток электронов, то свободный пробег каждого электрона от одного соударения с молекулой воздуха до другого не будет превышать стотысячных долей миллиметра. Свободный пробег крупных ионов еще короче. При каждом столкновении с молекулой электрон или ион теряет часть энергии. Поэтому заряженные частицы ускоряют в камерах, из которых тщательно выкачивают воздух. Пространство с разреженным газом называют «вакуумом». Если разрежение так велико, что свободный пробег электронов или ионов становится больше размеров камеры, то такое разрежение называют «высокий вакуум».

Например, при обычном для ускорительных камер давлении в одну миллиардную долю атмосферного (10^{-6} миллиметров ртутного столба) свободный пробег электрона от одного столкновения до другого составляет около 300 метров. Но надо заметить, что и при таком высоком вакууме в каждом кубическом сантиметре ускорительной камеры еще остается около 10^{10} молекул газа.

Приборы с высоким вакуумом широко распространены в современной технике. К ним относятся все

радиолампы, имеющие вакуумнепроницаемую (стеклянную, керамическую, металлическую) оболочку. Высокое разрежение, созданное в них на заводе, сохраняется затем после запайки в продолжение всего времени их работы, часто в течение многих лет.

Ускорительные камеры имеют значительно большие размеры. Их объем иногда достигает десятков кубических метров. Кроме того, для ввода в вакуумное пространство различных деталей (мишеней, вспомогательных электродов) в стенках камер предусматриваются люки и шлюзы. В подобных конструкциях трудно создать длительный вакуум и избежать натекания газов извне. Поэтому они снабжаются мощными насосами, которые непрерывно работают, удаляя посторонние газы. Иногда стенки ускорительных камер делаются двойными, и из промежуточного пространства между стенками также непрерывно откачивают просачивающиеся туда газы.

* * *

Однако убрать посторонние газы из пространства, где ускоряются ионы или электроны, это еще не все. Необходимо к тому же так организовать движение заряженных частиц внутри ускорительной камеры, чтобы они нигде не ударились о ее стенки и не выбыли из дальнейшего процесса ускорения.

Заряженные частицы должны двигаться узким потоком внутри камеры, не касаясь ее стенок. Чтобы организовать такое движение, нужно внутри ускорительной камеры создать электрические и магнитные силы соответствующей величины и направления.

МАГНИТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Электрические силы либо притягивают, либо отталкивают заряженную частицу. Электроны, например, летят от отрицательного полюса к положительному; положительно заряженные ионы, наоборот, — от положительного к отрицательному. Но всегда электрические силы направлены «в лоб» заряженным частицам. Иначе действуют на них магнитные силы.

Когда ионы или электроны движутся вдоль линий магнитных сил, то они вообще не испытывают никакого воздействия. Если же их движение совершается поперек направления магнитных силовых линий, то они испытывают боковое давление. Магнитные силы отклоняют заряженную частицу от ее начального направления, не меняя при этом, однако, ни ее скорости, ни ее запаса энергии. Чем сильнее магнитное поле, тем круче заворачивается, искривляется путь заряженной частицы. Электроны или ионы могут описывать дуги, петли и спирали.

Если соблюдены условия: магнитное поле совершенно однородно, заряженная частица влетает в это поле строго перпендикулярно магнитным силовым линиям, и в пределах магнитного поля электрическое поле не действует, то при этих условиях заряженная частица опишет точную окружность. Радиус R этой окружности прямо пропорционален массе m и скорости частицы v и обратно пропорционален напряженности магнитного поля H и электрическому заряду частицы e : $R = \frac{mv}{He}$. Пути легких частиц (не очень быстрых электронов) круче изгибаются в магнитных полях, чем пути тяжелых ионов.

Время, в течение которого частица совершает полный оборот по своему круговому пути, определяется формулой: $T = \frac{2\pi R}{v} = 2\pi \frac{m}{He}$.

При данном радиусе орбиты R время обращения тем меньше, чем выше скорость частицы v . Если же частицы движутся в магнитном поле неизменной напряженности H , то радиус орбиты растет с ростом энергии частицы, а время обращения увеличивается соответственно увеличению массы m .

Магнитное управление потоками заряженных частиц применяется во многих электровакуумных приборах: в электронно-лучевых трубках телевизионных приемников, в электронных микроскопах, в электронных генераторах сантиметровых волн — магнетронах, широко используемых в радиолокационных установках, а также в ряде других типов радиоламп.

При помощи различных проводников, витков и катушек с током можно создавать магнитные поля различной структуры. Эти поля, воздействуя на поток заряженных частиц подобно тому, как действуют линзы, призмы и зеркала на световые лучи, могут изменять направление потока заряженных частиц и поворачивать этот поток в любом требуемом направлении. Соответственно подобранные поля фокусируют поток электронов или ионов, уменьшают его поперечные размеры, стягивают этот поток в тонкую нить.

Внутри ускорительной камеры магнитные поля могут создать как бы незримые стены. Электроны или ионы, «отбившиеся от стада», налетая на эти магнитные преграды, заворачивают обратно, присоединяются к общему потоку.

«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГОРЫ»

Электрическое напряжение между электродами ускорителя соответствует высоте горы в механической аналогии. Чем выше напряжение — «электрическая гора», тем большую энергию приобретает слетевший с нее «электрический снаряд».

Однако трудности, возникающие при сооружении искусственных электрических гор — высоковольтных установок, иные, чем те, которые приходится преодолевать строителям мачт, башен или других высотных сооружений. Предел повышению электрического напряжения устанавливает пробой изоляционных материалов, которые применяются при сооружении высоковольтных установок.

Естественнее всего воспользоваться в качестве изолирующей среды воздухом. Но как электроизолирующий материал он сравнительно непрочен. Так, при нормальном атмосферном давлении и обычной температуре воздушный зазор в один сантиметр пробивается при напряжении в 30 тысяч вольт; во многих же конструкциях пробой начинается уже при 3—5 тысячах вольт на сантиметр.

Понятие «высокое электрическое напряжение» относительно. В конце прошлого века очень «высоким»

считалось напряжение в несколько тысяч вольт. Первые ядерные реакции были получены при бомбардировке ядер протонами, ускоренными до сотен тысяч электроновольт. С этого времени начинается интенсивное строительство сверхвысоковольтных электрических установок для ядерных исследований. Конструкторы столкнулись с многими трудностями. При напряжении в несколько миллионов вольт электрические заряды стекают с любого острия, выступа, неровности; и чем выше напряжение, тем интенсивнее происходит утечка. Чтобы ее предотвратить, надо делать радиусы закруглений высоковольтных электродов тем большими, чем выше напряжение хотят получить на этих электродах. Проводник, находящийся в воздухе под напряжением 3—4 миллионов вольт, должен иметь радиусы закруглений не меньше 5 метров. Если это шар, то его диаметр будет равен 10 метрам, и он должен быть удален от земли на расстояние не менее 10 метров. Для размещения такой высоковольтной установки необходим зал площадью около тысячи квадратных метров и высотой не менее 30 метров. Подобные установки размещались, например, в ангарах для дирижаблей.

Известно, что электрическая прочность газа растет по мере повышения его давления. При 20 атмосферах высоковольтные установки могут работать с напряженностью электрического поля до 50 тысяч вольт на сантиметр.

В тридцатых годах высоковольтные установки вместе с вакуумными ускорительными трубками стали заключать в прочные стальные резервуары, куда накачивался под давлением сухой воздух, азот или специальные газы, обладающие повышенной электрической прочностью. Но и этот прием не позволяет далеко идти по пути повышения рабочего напряжения ускорительных установок.

Размеры высоковольтных установок с изоляцией из сжатого газа растут с повышением напряжения так же, как размеры установок, работающих на воздухе без давления. А чем больше диаметр стального резервуара и чем больше давление газа в нем, тем большую

толщину должны иметь его стенки и тем больше высококачественной стали необходимо затратить на изготовление этого резервуара.

На современном уровне техники несколько миллионов вольт — это предел для высоковольтных установок с изоляцией из сжатого газа.

Несколько миллионов вольт — вот предельная высота тех искусственных «электрических гор», с которых можно скатывать снаряды для бомбардировки ядер атомов.

* * *

Но вот «электрическая гора» сооружена. Как же втаскивать на нее заряды, которые должны затем развернуться по ускорительным трубкам?

Начиная с двадцатых годов, для получения высоких напряжений предлагались различные электрические схемы и разнообразные конструкции. Строились высоковольтные трансформаторы низкой частоты, трансформаторы высокой частоты (трансформаторы Тесла), различные конденсаторные схемы, разнообразные электростатические генераторы. Много из того, что усаждало самые радужные надежды, сейчас безнадежно устарело и не применяется. Рассмотрим современные высоковольтные установки, которые используются при ядерных исследованиях. Но перед этим расскажем об одной попытке воспользоваться, так сказать, природной электроэнергией для атаки ядра.

МОЛНИЯ

С 1928 по 1933 год производились попытки приручить молнию, заставить ее вести атаку ядра.

На горе Дженерозо в Швейцарских Альпах физики Браш, Ланге и Урбан подвесили между скалами на высоте 80 метров длинную антенну — проволочную сетку-гамак, изолированную при помощи гирлянд изоляторов. По мысли авторов проекта, на антенне должны были собираться огромные заряды атмосферного электричества и создавать высокое напряжение. Это напряжение они думали приложить к вакуумной трубке для ускорения протонов.

При некоторых опытах на антенне-гамаке скапливалось достаточно зарядов, чтобы вызвать искры длиной в 4,5 метра. Предполагалось, что при этом возникает напряжение до 10 миллионов вольт.

Но высокое напряжение на огромной антенне получалось нерегулярно. Приходилось подолгу ждать соответствующего состояния атмосферы. Один из ученых (Курт Урбан) был убит при этих опасных опытах. Ловля молний — это был романтический, но, увы, мало давший науке эпизод из истории штурма атомного ядра.

ПЕРЕНОС ЗАРЯДОВ НА РЕМНЯХ

Известно множество разнообразных технических способов получения сверхвысоких напряжений. Старейший из них — это механическое перетаскивание зарядов. Электрические заряды поднимаются при помощи ремней к высоковольтному электроду подобно тому, как на механизированных лыжных трамплинах поднимают спортсменов на его вершину.

Еще в прошлом веке, до того как возникла промышленная электротехника, существовали конструкции высоковольтных генераторов, в которых заряды переносились вращающимися изоляционными дисками.

В 1925 году профессор В. И. Угримов опубликовал данные о высоковольтном генераторе с движущейся лентой, который он построил и исследовал в лаборатории Московского высшего технического училища.

Американский физик Ван-де-Грааф один из первых оценил возможности этих генераторов для питания ускорительных трубок. По его почину такие генераторы широко распространились в лабораториях для ядерных исследований. На странице 20 показана принципиальная схема подобного генератора.

У заземленного полюса генератора на непрерывно движущийся ремень наносятся электрические заряды. Эти заряды доставляются ремнем к высоковольтному электроду — полюсу шару, внутри которого они снимаются с ремня. Иногда здесь не только снимаются те заряды, что пришли от заземленного полюса, но еще

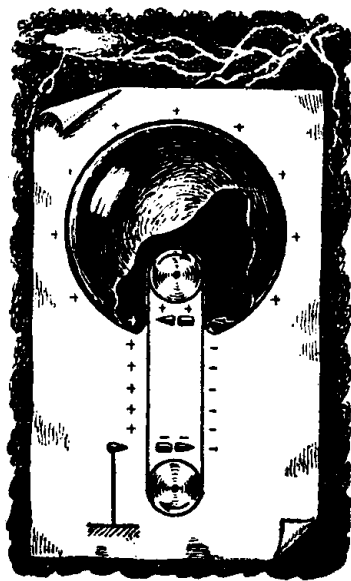


Схема электростатического генератора сверхвысокого напряжения. Электрические заряды переносятся при помощи ремня из изоляционного материала.

и насаживаются на ремень заряды противоположного знака. Последние затем переносятся к заземленному полюсу. Такая перезарядка ремня при прочих равных условиях позволяет несколько увеличить силу тока генератора.

Величина тока, который можно получить от генераторов типа Ван-де-Граафа, зависит от скорости движения ремня и от его ширины. В некоторых конструкциях применяют не один, а несколько параллельно работающих ремней. И все же сила тока подобных генераторов не превышает обычно одного миллиампера — тысячной доли ампера.

При работе установки быстро движущийся ремень трется о воздух или другой газ, в котором ра-

ботает электростатический генератор. На преодоление сил этого трения затрачивается значительная часть мощности приводного двигателя. Кроме того, мощность тратится также на преодоление трения в подшипниках и направляющих валиках. Вследствие всех этих потерь коэффициент полезного действия генераторов с переносом зарядов ремнями не превышает 20 процентов.

Вместо ремней из изоляционного материала предлагалось применять для переноса электрических зарядов струи запыленного газа, в котором заряды насаживались бы на пылинки и вместе с ними перемещались бы к собирающему электроду; предлагалось применять для этой цели струи мокрого пара, увле-

кающие ионы и заряженные капельки. В тридцатых годах автор данной брошюры проводил опыты с парортутными (ионо-конвекционными) и пылевыми генераторами. Подобные генераторы исследовались и в других странах. Однако практического применения эти генераторы не получили.

Помимо механических способов переноса зарядов для получения сверхвысоких напряжений, применяются различные электрические методы, основанные на использовании так называемых каскадных схем преобразования тока.

КАСКАДЫ

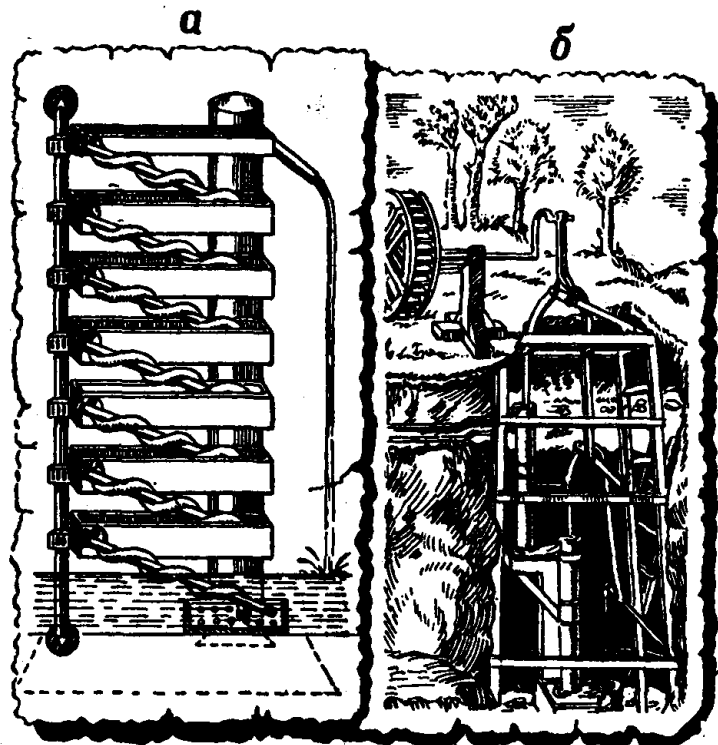
В технике каскадными устройствами называют такие системы машин, аппаратов, приборов, в которых осуществляется последовательный ход каких-либо физических и технологических процессов. С давних пор известно, например, каскадное включение насосов. При небольшом сравнительно давлении в каждой ступени можно поднимать воду на большую высоту.

Источники высокого напряжения (и постоянного и переменного тока), состоящие из низковольтных каскадов, применяются в электротехнике уже с конца прошлого века. Есть много вариантов каскадных выпрямительных схем (каскадных генераторов, как их иногда называют) для превращения переменного тока в постоянный высокого напряжения.

В каждой ступени многокаскадной выпрямительной схемы можно применять относительно низкое напряжение и, следовательно, использовать для выпрямления этого напряжения слабые (сравнительно низковольтные) электрические клапаны (вентили). Электрические заряды в многокаскадных схемах передаются с каскада на каскад подобно тому, как перекачивается вода в показанных на странице 22 многокаскадных насосах. Включая достаточно большое количество электрических каскадов, можно получать любое высокое электрическое напряжение, какое только способна выдержать изоляция высоковольтной установки.

Первая ядерная реакция с протонами, ускоренными в вакуумной трубке, была получена в лаборатории Резерфорда в Англии на установке, в которой к ускорительной трубке прикладывалось высокое напряжение, полученное от каскадного выпрямителя.

Для всех каскадных устройств характерно то, что в них всегда имеется какое-либо приспособление для



Старинные многокаскадные устройства:

а — машина для поднятия воды. Из сочинения Джеронимо Кардано (1501 — 1576 г.);

б — машина для выкачивания воды из шахт. Из сочинения М. В. Ломоносова (1711—1765 гг.) «Первые основания металлургии» (1763 г.).

подвода энергии к отдельным каскадам — имеется «энергоподвод» вдоль всей цепочки каскадов.

В водоподъемных каскадных насосах системы Кардана таким энергоподводом является вращающийся вал. В насосах, показанных в книге Ломоносова «Первые основания металлургии», энергия к отдельным каскадам подводится от штока, который движется возвратно-поступательно.

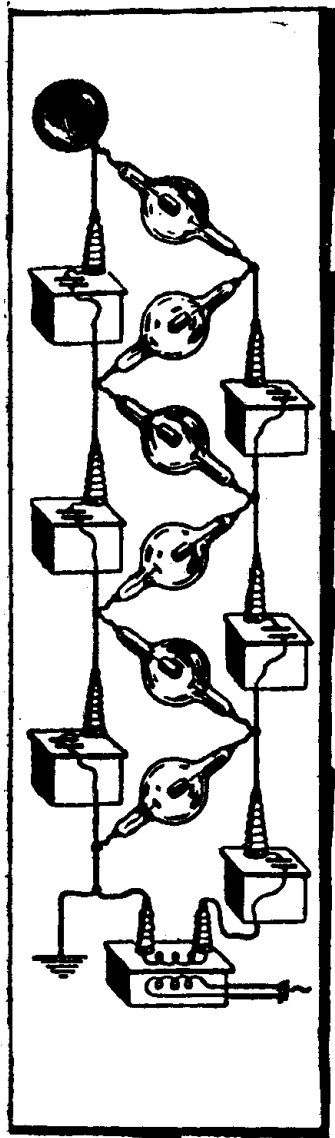
И в электрических каскадных источниках высокого напряжения также применялся иногда механический способ подвода энергии к отдельным каскадам. Была, например, сооружена установка, в которой длинным валом, изготовленным из изоляционного материала, соединялся ряд электрических машинных генераторов. Во избежание пробоев каждый последующий генератор изолировался до более высокого напряжения, чем предыдущий. И каждый из них питал ток только свое звено каскада.

Более совершенными являются не механические, а электрические способы питания каскадов.

Можно, например, передавать энергию с помощью переменного электрического поля через цепочку конденсаторов. Конденсаторы являются изоляторами для постоянного напряжения, но хорошо пропускают через себя переменное, которым питаются каскады.

Конденсаторные каскадные преобразователи были применены в лаборатории Резерфорда и продолжают широко применяться в настоящее время.

Изолированные друг от друга каскады можно связать не только электрическим, но и магнитным переменным потоком. Автором разрабатывался ряд конструкций такого типа. Строились устройства, в которые включались последовательно сотни отдельных каскадов. На странице 25 показана упрощенная принципиальная схема многокаскадного выпрямителя с электромагнитной связью отдельных каскадов. Здесь представлена колонна из плоских катушек. Все катушки пронизываются общим переменным высокочастотным электромагнитным потоком. Этот поток и накачивает энергию в изолированные одна от другой катушки. Электрические вентили, присоединенные



к катушкам, выпрямляют переменное напряжение. Выпрямленные напряжения отдельных каскадов складываются, образуя суммарное высокое напряжение.

Катушки обычно занимают меньший объем и стоят дешевле, нежели

конденсаторы такой же мощности. В многокаскадном высоковольтном выпрямителе с электромагнитной связью хорошо используется рабочий объем. Такой высоковольтный источник имеет высокий коэффициент полезного действия и может быть построен на какую угодно большую мощность.

И конденсаторные и катушечные многокаскадные установки можно рассматривать как фильтры высоких частот, которые пропускают переменные токи, но являются изоляторами для постоянного напряжения. Многокаскадные установки бывают различной конструкции. Они часто выполняются с обычной воздушной изо-

Схема выпрямительного конденсатора каскада. Две колонны последовательно соединенных конденсаторов соответствуют расположенным друг над другом промежуточным резервуарам в многокаскадных водяных насосах. Между конденсаторами включены электрические вентили, через которые электрические заряды передаются из конденсатора в конденсатор.

Во время одного полупериода питающего переменного тока электрические заряды перетекают от правых конденсаторов к левым; в другой полупериод заряды перетекают от левых конденсаторов к правым. В итоге каждый из конденсаторов оказывается заряженным до напряжения, равного амплитуде питающего переменного напряжения V . Если в каждой из колонн последовательно включено n конденсаторов, то результирующее напряжение между землей и высоковольтным электродом (верхним шаром) будет равно nV .

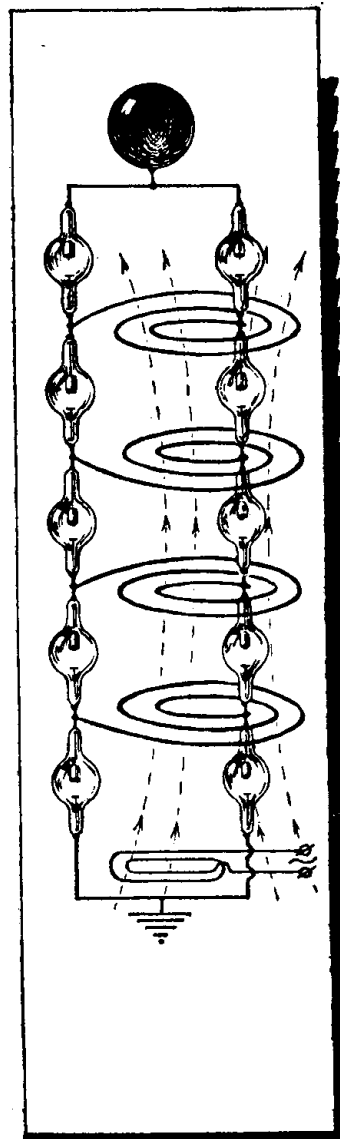
Например, при напряжении питания 100 киловольт и при 20 каскадах результирующее напряжение будет равно 2 миллионам вольт.

конденсаторы такой же мощности. В многокаскадном высоковольтном выпрямителе с электромагнитной связью хорошо используется рабочий объем. Такой высоковольтный источник имеет высокий коэффициент полезного действия и может быть построен на какую угодно большую мощность.

И конденсаторные и катушечные многокаскадные установки можно рассматривать как фильтры высоких частот, которые пропускают переменные токи, но являются изоляторами для постоянного напряжения. Многокаскадные установки бывают различной конструкции. Они часто выполняются с обычной воздушной изо-

Схема многокаскадного высокочастотного высоковольтного преобразователя с индуктивной связью между каскадами.

Переменный магнитный поток пронизывает систему расположенных одна над другой и изолированных друг от друга катушек. Напряжение каждой катушки выпрямляется при помощи вентилей. Выпрямленные напряжения складываются. Результирующее напряжение равно напряжению одиночной катушки, помноженному на число катушек.



ляцией. Но могут быть также заключены в прочную стальную оболочку, заполненную средой с более высокой электрической прочностью, нежели воздух при атмосферном давлении: например, сжатым газом, маслом и т. д.

УДАР РАБОТАЕТ

Чтобы ускорить высоким напряжением порцию заряженных частиц и «дать залп по атомному ядру», достаточно несколько миллионных долей секунды. Можно ускорять электроны или ионы не постоянным высоким напряжением, а таким, которое создается лишь на короткий миг.

Во многих отраслях техники применяются кратковременно действующие силы — используется явление удара. Пробить отверстие или забить гвоздь лучше резким ударом, а не плавным давлением. Электрические генераторы, которые развивают сверхвысокие напряжения лишь на несколько микросекунд, имеют ряд преимуществ перед теми генераторами, которые создают длительно действующее высокое напряжение.

В 1914 году профессор В. К. Аркадьев в Москве придумал новую электрическую схему. В этой схеме группа конденсаторов заряжается параллельно, а затем при помощи искровых разрядников на миг все эти конденсаторы соединяются последовательно и дают «высоковольтный удар».

В настоящее время такие импульсные источники высокого напряжения применяются на электротехнических заводах и в лабораториях для испытания изоляторов и всевозможных высоковольтных аппаратов: выключателей, трансформаторов и т. д. Импульсные конденсаторные источники (импульсные генераторы) строятся на напряжения до нескольких миллионов вольт. Схема импульсного источника высокого напряжения показана на странице 28.

В тридцатых годах импульсные генераторы высокого напряжения наряду с другими высоковольтными источниками стали применяться для ускорения заряженных частиц. Были созданы компактные и эконо-

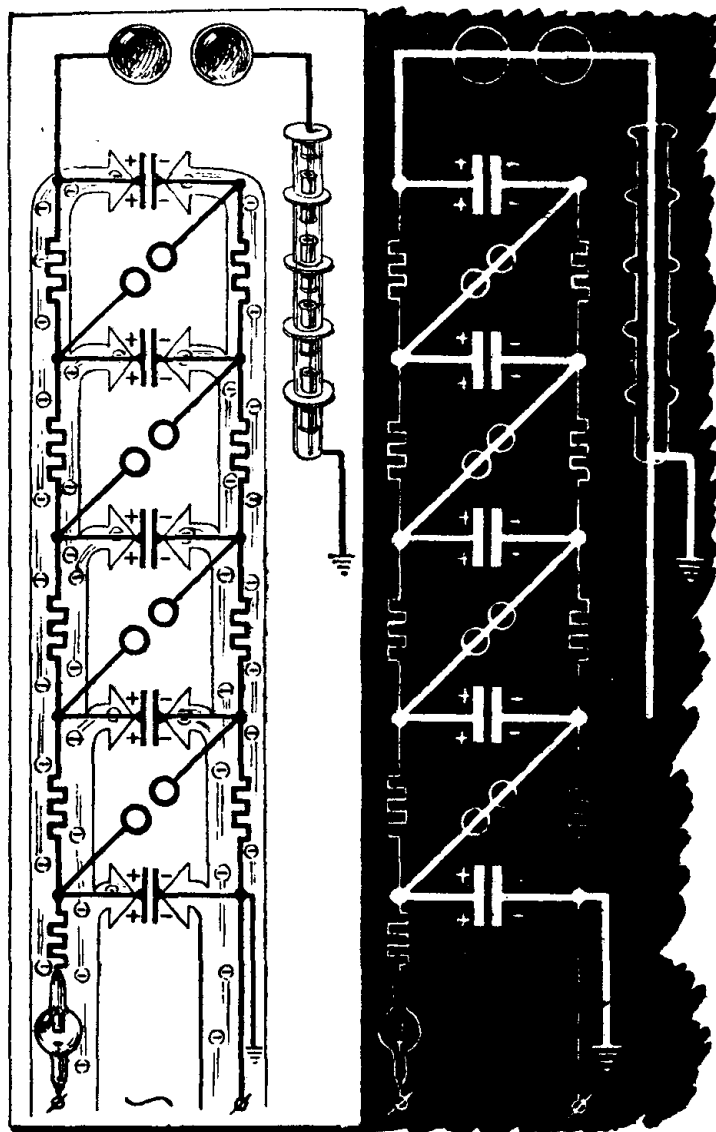
мичные установки, значительно обогатившие ускорительную технику.

Очень ценной особенностью импульсных генераторов является то, что они могут на короткое время, в импульсе, развивать колоссальные мощности — в сотни тысяч и в миллионы киловатт. Средняя же мощность питания этих генераторов может быть относительно малой — в тысячи раз меньше импульсной. Это свойство импульсных схем весьма ценно не только для метода прямого ускорения заряженных частиц высоким напряжением, но и в устройствах, где высокие энергии заряженным частицам сообщаются косвенным путем без применения высоких напряжений. В частности, импульсные генераторы применяются для питания так называемых линейных ускорителей, которые будут описаны ниже.

ВЫСОКИЕ ЭНЕРГИИ БЕЗ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Высоковольтная установка любого типа, любой конструкции не может дать напряжение больше нескольких миллионов вольт. А этого едва достаточно, чтобы вызвать некоторые наиболее легко осуществимые ядерные реакции. Для детального же изучения структуры атомного ядра необходимо бомбардировать его заряженными частицами с энергиями, в тысячи раз большими, чем те, которые можно получать на высоковольтных установках.

Атака атомного ядра при помощи снарядов, ускоренных на высоковольтных установках, может вестись только до определенного рубежа. Дальнейшее продвижение в глубь структуры ядра требует во много крат более «энергичных» снарядов. Это стало ясно уже в двадцатых годах, когда высоковольтные установки еще далеко не достигли своего предела и продолжали интенсивно развиваться. Уже тогда прозорливые исследователи видели предел роста напряжений в высоковольтных установках и предлагали обходные пути для дальнейшей атаки атомного ядра. Были, в частности, предложены методы получения заряженных частиц высоких энергий без применения



высоких напряжений для их ускорения. Сущность этих методов заключалась в многократном воздействии на заряженные частицы относительно низким ускоряющим напряжением.

Высоковольтные установки продолжают строиться и сейчас на все большие мощности и на все большие токи. Эти установки широко используются для различных исследований в области ядерной физики, а также для создания новых технологических процессов в промышленности (радиационная химия, стерилизация и т. д.).

Но важнейшим инструментом современной ядерной экспериментальной физики являются ускорители, в которых нет сверхвысоких электрических напряжений, а тем не менее в них заряженные частицы приобретают энергии уже не в миллионы, а в миллиарды электронвольт. В вакуумных камерах этих ускорителей действуют электромагнитные вихри и высокочастотные электромагнитные поля. В игре с электромагнитными волнами заряженные частицы приобретают колоссальные энергии.

На странице 28 показана схема импульсного источника напряжения. Слева показан процесс зарядки: конденсаторы включены параллельно. От источника переменного напряжения через выпрямитель (электрический вентиль) и зарядные сопротивления протекает зарядный ток. Во всех конденсаторах на левых обкладках скапливаются положительные заряды, а на правых обкладках — отрицательные. Когда напряжение на конденсаторах достигает заданной величины, искровые промежутки пробиваются и все конденсаторы оказываются соединенными последовательно: положительная обкладка первого конденсатора через пробитый (закороченный искрой) разрядник соединена с отрицательной обкладкой второго конденсатора, положительная обкладка второго конденсатора соединена с отрицательной обкладкой третьего конденсатора и т. д.

Напряжение всех конденсаторов суммируется. Если на каждый конденсатор подавалось напряжение V , а число конденсаторов n , то в момент импульсного разряда напряжение, действующее на ускоряющую трубку, будет равно nV .

В СССР был построен ряд крупнейших импульсных генераторов на напряжение до 8 миллионов вольт. Запас энергии в применяемых там конденсаторах достигает сотен киловатт-секунд. Так как эта энергия разряжается в течение миллионных долей секунды, то мгновенная мощность импульсного разряда равна десяткам миллионов киловатт.

ВИХРЬ ВМЕСТО ГОРЫ

Помешайте чай в стакане. Образуется воронка — вихрь. Вихрь увлекает, ускоряет чайники, крупинки сахара. Но это ускорение происходит иначе, чем ускорение под действием силы тяжести — при падении, например, тела с вершины горы.

У вихря нет ни вершины, ни подножья. У него нет ни начальных, ни конечных точек. Вихрь подхватывает предмет, который в него попадает, и все кружит и кружит его по замкнутому пути.

Всякое изменение магнитного поля во времени создает (индуцирует) электрический вихрь. В ускорительной камере в безвоздушном пространстве также можно создать электрический вихрь — электрические силы, которые не будут иметь ни начала, ни конца на электродах, а будут действовать по замкнутому пути. И этот электрический вихрь будет кружить, ускорять попавшую в него заряженную частицу.

Если через катушку из проволоки пропускать постоянный ток, то внутри катушки возникнет постоянный магнитный поток. Но если силу тока изменять, то будет меняться и магнитный поток. Внутри катушки и вокруг нее возникнут электрические вихри. Такие вихри существуют во всех трансформаторах переменных токов: и в тех, что снабжены сердечниками из магнитных материалов (низкочастотные трансформаторы), и в тех, что не имеют сердечников (высокочастотные трансформаторы).

Электрические вихри успешно применяются для ускорения электронов.

Из изоляционного материала (керамики, стекла) делают кольцевую трубку, попросту говоря, большой бублик, из которого тщательно выкачивают воздух. Над этой вакуумной камерой и под ней расположены катушки, витки которых параллельны кольцевой ускорительной камере. Через катушки пропускают сильный переменный ток. Он возбуждает электрический вихрь внутри вакуумного бублика. В этом же бублике находится раскаленный катод, испускающий электроны. Электрический вихрь (взаимодействие элек-

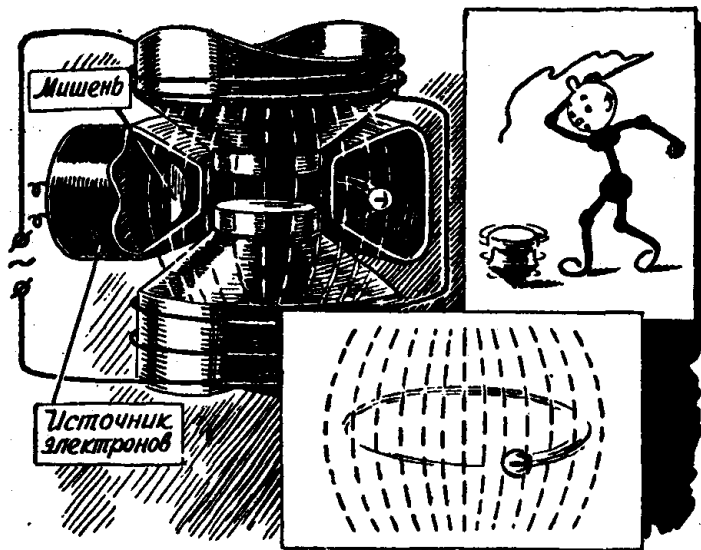


Схема вихревого ускорителя электронов — бетатрона.

В торондальной вакуумной камере помещается источник электронов (раскаленный катод) и мишень, о которую электроны должны удариться после цикла ускорения. Вакуумная ускорительная камера помещена между полюсами магнита переменного тока. Полюсным наконечникам магнита придана коническая форма, благодаря чему с увеличением радиуса плотность магнитного потока слабеет и магнитные силовые линии имеют выпуклость наружу. Такая форма магнитных силовых линий обеспечивает вертикальную устойчивость ускоряемого сгустка электронов. Для обеспечения радиальной устойчивости электронов на орбите необходимо, чтобы напряженность магнитного потока спадала не слишком быстро с увеличением радиуса.

трических и магнитных сил) увлекает их и заставляет двигаться по круговым путям. Как волчок, подстигаемый хлыстом, крутится все быстрее и быстрее, так и электроны, увлекаемые нарастающим электромагнитным полем, с каждым оборотом увеличивают свою скорость. При каждом обороте сгусток электронов получает небольшую порцию энергии — всего несколько единиц электроновольт. Но электро-

ны летят со скоростью, близкой к скорости света. И за короткое время одного полупериода переменного тока, питающего катушки этого ускорителя, они успевают сделать много тысяч оборотов и набрать большую энергию. Электроны проходят за один полупериод переменного тока огромный путь и разгоняются так, словно скатились с «электрической горы» высотой в несколько десятков миллионов вольт.

Электрический вихрь увлекает электроны в одну сторону только в течение одного полупериода переменного тока, пока изменение тока идет в одну сторону: скажем, от максимального отрицательного значения к максимальному положительному. Затем в следующий полупериод, когда ток начинает изменяться в другую сторону, возникает вихрь противоположного направления. Он будет тормозить электроны, которые были ускорены в предыдущем полупериоде. Поэтому в конце каждого полупериода ускорения электроны надо убирать с их круговой орбиты. Для этого в вихревом ускорителе имеется вспомогательная электрическая цепь. В конце каждого цикла ускорения при помощи этой цепи дается боковой толчок уже ускоренным электронам. Они срываются с круговой орбиты и летят в сторону, где ударяются о мишень, изготовленную из вещества, ядра которого подвергаются бомбардировке электронами.

Если вихревой ускоритель питается током с частотой, скажем, 50 герц, то 50 раз в секунду в мишень ударяет порция ускоренных электронов.

БЕТАТРОН

Вихревые (индукционные) ускорители обычно называются бетатронами, так как в них получают быстрые электроны — бета-частицы. Иногда их зовут реотронами (от греческого слова «рео» — вращать). Можно еще назвать эти ускорители трансформаторами без вторичной обмотки. Вращающийся сгусток электронов приобретает в них такую же энергию, какую получил бы он, двигаясь между полюсами трансформаторной катушки, у которой число витков равно чис-

лу оборотов, сделанных электронным сгустком в вакуумной камере за один цикл ускорения.

Чтобы добиться хорошей работы вихревого ускорителя, надо соблюсти условия устойчивого движения электронов. Вопрос об устойчивости движения электронов и ионов — один из важнейших разделов теории ускорителей заряженных частиц. Мы еще вернемся к рассмотрению этих условий. Пока же приведем только такой простейший пример.

На мототреках дорожки для мотоциклетных гонок должны иметь на поворотах определенный наклон. Если этот наклон сделан неправильно, то мотоциклист может вместе с машиной сорваться с дорожки. Круговое движение электронов в бетатроне направляется магнитными силами. Если форма и густота магнитных силовых линий, пронизывающих ускорительную вакуумную камеру, подобраны правильно, то электронный сгусток будет удерживаться на оси камеры. При неправильной структуре магнитного поля электроны станут срывать с круговой орбиты после немногих оборотов и, не набрав требуемой скорости, будут ударяться о стенки камеры и выходить из игры.

Описанный вихревой индукционный ускоритель непригоден для ускорения положительных ионов (протонов, дейтронов, альфа-частиц и т. д.). В этом ускорителе электромагнитный вихрь существует относительно короткое время, и такая тяжелая инертная частица, как протон, не говоря уже о еще более тяжелых дейтонах и альфа-частицах, за это время не успеет набрать сколько-нибудь значительной скорости.

И электроны также не могут быть ускорены в бетатроне до очень больших энергий. Предел наращиванию энергии кладет то обстоятельство, что электроны, движущиеся по кругу, сами излучают электромагнитные волны и растрчивают свою энергию.

Подобно тому, как корабль должен затрачивать тем большую мощность на преодоление порожденных им самим волн (так называемых спутных волн), чем больше скорость его хода, так и к сгустку электронов, чтобы поддержать их движение по кругу, надо при-

кладывать тем больше электрические силы, чем выше энергия этих электронов. Когда энергия, теряемая на излучение сгустком электронов за один оборот, становится равной энергии, приобретаемой этим сгустком, дальнейшее ускорение электронов прекращается. Практически предел энергии электронов в бетатроне — около 100 миллионов электроновольт.

Когда ускоренные в бетатроне электроны ударяются о мишень, то возникает электромагнитное излучение с очень короткой длиной волны — «жесткое» рентгеновское излучение или, как его еще называют, гамма-излучение. Такое излучение способно проникать через слой стали толщиной в десятки сантиметров и применяется в промышленности для обнаружения скрытых дефектов в стальных изделиях.

В исследовательских лабораториях, в промышленных установках применяются различные типы бетатронов на энергии от 5 до 100 миллионов электроновольт.

Значительно большие энергии, чем в бетатроне, можно сообщать как электронам, так и положительным ионам с помощью ускорителей, в которых применяются токи высокой частоты. В них используется принцип резонанса — отзывчивости.

ПРИНЦИП ОТЗЫВЧИВОСТИ

Слабыми, но много раз повторяемыми толчками можно раскачать тяжелые качели. Надо только, чтобы все отдельные толчки действовали согласованно, в такт. Такое согласование между собственными колебаниями какой-либо системы (в нашем примере — качели) и воздействующей на нее силой принято называть резонансом. В переводе с латинского оно обозначает — отзывчивость. Это явление обнаружили впервые музыканты. Они заметили, что струна отзывается на колебания другой, соответствующим образом настроенной.

В прошлом веке открыли явление резонанса и в радиотехнике. Благодаря резонансу радиоволны могут раскачать, заставить отзываться надлежаще настроенные колебательные контуры радиоприемников.

Суммирование многих слабых, но согласованных толчков может дать огромный эффект. Естественно, с развитием ускорителей заряженных частиц возникли мысли применить в этих приборах явление резонанса. Вместо того чтобы скатить один раз заряженную частицу с высокой «электрической горы», можно многократно подгонять, подталкивать ее относительно небольшим электрическим напряжением. В конечном счете частица приобретает такой запас энергии, который соответствует электрическому напряжению — «электрической горе» во много миллионов вольт.

Многokратное резонансное ускорение заряженных частиц можно осуществлять различными приемами. Идеи носились в воздухе начиная с двадцатых годов, еще с того времени, как были проведены первые работы по бомбардировке атомных ядер естественными альфа-частицами от радиоактивных веществ. В тридцатых годах уже появились технические проекты и описания лабораторных разработок различных систем резонансных многократных ускорителей.

История развития резонансных ускорителей заряженных частиц — это одна из увлекательнейших глав истории физики и высокочастотной электротехники. Многие физики и электрики заслужили на этом поприще «золотые рыцарские шпоры».

Изобретения различных ученых перекрещивались и наслаивались самым причудливым образом.

В 1922 году американский исследователь Слепян — научный консультант фирмы «Вестингауз» — предложил рентгеновскую трубку с вихревым электрическим полем. Независимо от него в 1927 году немецкий ученый Видероэ предложил ускорять электроны индуктированными электрическими вихрями. Такое же предложение было сделано сотрудником Московского рентгеновского завода профессором Ясинским. Но только в 1940 году американский физик Керст построил работающую модель подобного ускорителя. В 1924 году шведский ученый Изинг сделал предложение увлекать заряженные частицы бегущей электромагнитной волной. Но технических предпосылок для осуществления подобного предложения в те годы еще не было.

В годы второй мировой войны для радиолокации были разработаны мощные генераторы коротких электромагнитных волн и изучены закономерности движения этих волн по волноводам.

Для нужд электронной микроскопии были разработаны законы оптики заряженных частиц. Вновь были выдвинуты предложения ускорять электроны и ионы короткими электромагнитными волнами, и построены первые работающие модели.

Для целей секретной телефонии разрабатывались различные методы так называемой фазовой и частотной модуляции радиосигналов. Эти методы были использованы в циклических ускорителях, появившихся в послевоенные годы.

И, наконец, в современных мощных ускорителях, созданных в последние годы, — фазотронах, синхротронах (о них будет подробнее рассказано в дальнейшем) — были применены и методы ускорения частиц вихревым полем, и коротковолновые импульсные радиопередатчики, и методы частотной модуляции, и различные приемы электронной оптики, и еще сотни различных предложений и усовершенствований.

Приоритет трудно установить. Публикации имеют одну хронологическую последовательность; патенты и авторские свидетельства (если они выдавались) — другую; а предварительные расчеты и опыты следовали в совершенно ином порядке. Трудно отделить «технический приоритет», который основывается на степени пригодности данного предложения для немедленного практического применения, от того «морального приоритета», который основывается на глубине проникновения в суть проблемы.

Большое количество названий и терминов, часто применяемых для описания одних и тех же устройств и явлений, является лишь отражением интересов отдельных лиц, лабораторий, стран.

* * *

Резонансные явления при ускорении электронов и ионов до огромных энергий сложнее явлений раскачивания качелей или явлений резонанса в обычных ра-

диотехнических колебательных контурах. В ускорителях приходится учитывать множество тонкостей, чтобы правильно организовать взаимодействие электромагнитных волн и ускоряемых частиц.

Идея резонансного ускорения может быть воплощена в различные конструктивные формы. На странице 38 показана одна из первых по времени конструкций, называемая линейным резонансным ускорителем. На странице 40 дана механическая аналогия принципа действия такого ускорителя.

ОКЕАН И ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ

В линейном ускорителе заряженные частицы движутся по прямолинейному пути, отсюда и его название. Проект линейного ускорителя предлагал уже упомянутыми физиками: Изингом, Видероз и американским исследователем Слоаном в 1931 году.

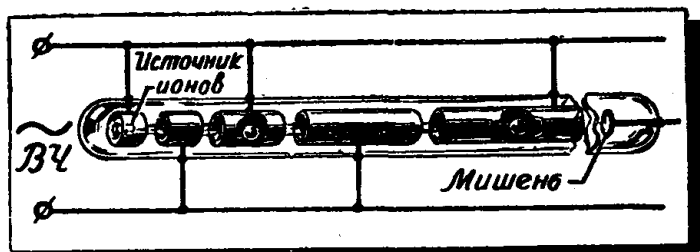
В 1932 году автор этой брошюры совместно с инженером И. П. Полевым строили линейный резонансный ускоритель в лаборатории ленинградского электровакуумного завода «Светлана».

Мы взяли медную трубу длиной около 2 метров, выкачали из нее воздух и попытались пустить внутри этой трубы от одного ее конца к другому электромагнитную волну. Совместно с волной предполагалось пустить порцию электронов. Электромагнитная волна должна была увлекать за собой электроны, ускорять их движение.

Нас воодушевляли описания океанского прибора из рассказов Джека Лондона. В этих рассказах очень красочно изложено, как у берегов островов Тихого океана смелые люди, бросив доску на гребень волны, поднимались на ней во весь рост и мчались среди брызг и пены, непрерывно скатываясь с водяной горы, а волна все бежала вперед и несла человека все быстрее и быстрее*.

Другие исследователи, работавшие над линейными

* Такое катание на океанском приборе является и теперь одним из распространенных видов спорта на побережье Австралии и называется «сюрфэс».



Первоначальная конструкция линейного резонансного ускорителя.

Система цилиндрических электродов питается от высокочастотного генератора. По оси электродов движутся сгустки заряженных частиц.

Таким методом можно ускорять как положительно, так и отрицательно заряженные частицы. Частота ускоряющего напряжения и длина электродов так согласованы со скоростью движения заряженных частиц, что, пока они пролетают электрод, который притягивал их к себе, полярность всех электродов изменяется; перед сгустком частиц снова оказывается увлекающий их вперед электрод, и частицы еще больше ускоряются.

ускорителями, сравнивали их с электромагнитными пушками, предлагавшимися еще в прошлом веке. В такой пушке вдоль ствола размещены катушки, в которые поочередно посылаются в надлежащие моменты кратковременные импульсы тока. Каждая катушка втягивает (или, наоборот, выталкивает) летящий по стволу снаряд и ускоряет его.

Но заставить электроны лететь на скате волны электрического напряжения не так просто. Первая трудность заключается в том, что не всякую электромагнитную волну можно заставить бежать внутри трубы. В трубу «полезет» лишь такая волна, длина которой или меньше внутреннего диаметра трубы, или только незначительно превышает его.

Более длинная электромагнитная волна не может распространяться внутри трубы: она очень быстро затухнет. Наша медная труба имела внутренний диаметр 5 сантиметров; в такой трубе могла распространяться электромагнитная волна короче 10 сантиметров.

Еще в 1895 году профессор П. Н. Лебедев в Моск-

ве получал при помощи искрового разряда волны короче 1 сантиметра. Мы наделись, что таким же искровым разрядом создадим требуемую для нашего ускорителя электромагнитную волну.

Нам повезло. Наш искровой разрядник заработал сразу. Мощная электромагнитная волна побежала по медной трубе. Но увы... Получилась она слишком длинной и бежала по внешней поверхности. Внутри трубы ее загнать не удавалось. Когда же мы добились сантиметровой волны, то мощность ее была столь ничтожна, что нечего было даже мечтать об ее использовании для ускорения.

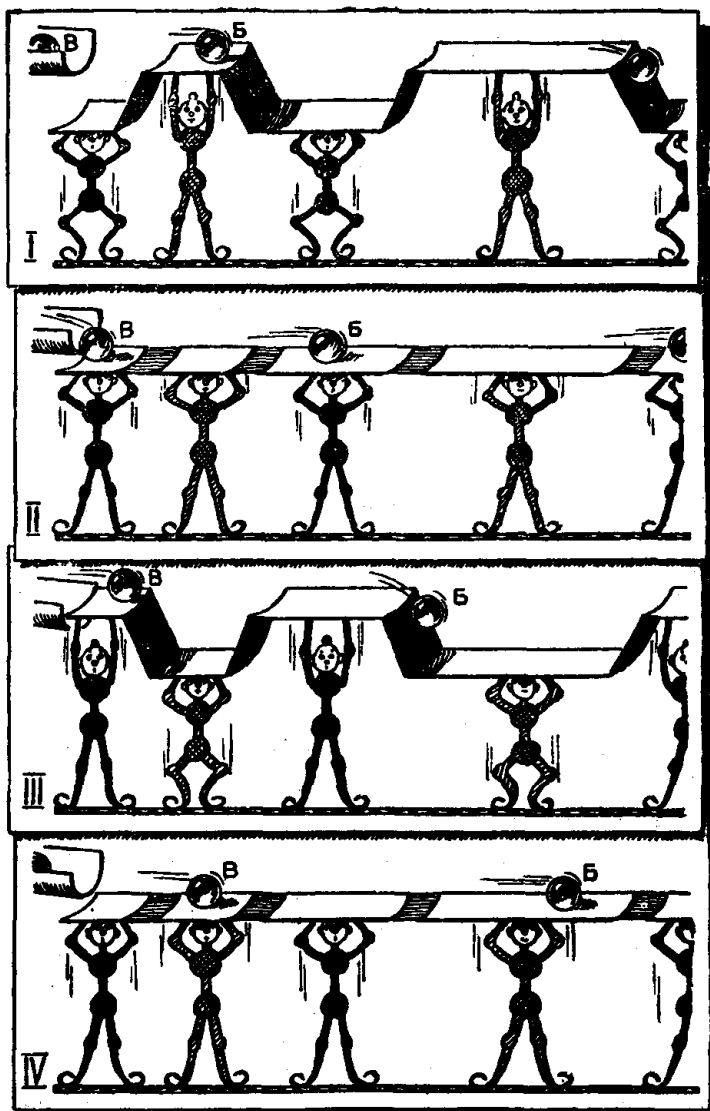
Наша электронная пушка 1932 года не дала ни одного залпа по атомному ядру.

Только в годы второй мировой войны были созданы для нужд радиолокационной техники мощные генераторы сантиметровых волн — магнетроны и клистроны. Теперь физики вооружились более совершенной аппаратурой. После войны появились первые практические конструкции линейных ускорителей.

ЕЩЕ О РАБОТЕ УДАРА

Сильное электрическое поле, ускоряющее частицы вдоль оси трубы-волновода линейного ускорителя, одновременно создает сильные токи в стенках волновода. Благодаря высокой частоте эти токи сосредотачиваются в тончайшем (толщиной порядка микрона) поверхностном слое металла. В нем получают огромные плотности тока в тысячи ампер на каждый квадратный миллиметр сечения поверхностного слоя.

В медном волноводе происходят большие потери энергии. Эти потери могут достигать многих тысяч киловатт на метр длины трубы. Мощность же пучка ускоренных частиц обычно не превышает нескольких киловатт. Если включить ускорительную трубу-волновод на непрерывную работу, то коэффициент полезного действия ее составит лишь ничтожные доли процента. Кроме того, до сих пор нет еще генераторов коротких волн, которые могли бы давать мощность в тысячи киловатт при непрерывной работе.



Выход из этого положения был найден в импульсном методе работы. Мощную электромагнитную волну заставляют циркулировать в ускорителе-волноводе не непрерывно, а лишь в течение нескольких миллионных долей секунды (микросекунд). Затем дается пауза, длительность которой в несколько тысяч раз превышает длительность времени циркуляции волны, потом — новый высокочастотный импульс и снова пауза и т. д. Мгновенная, так называемая пиковая, мощность во время импульса измеряется многими тысячами киловатт, средняя же мощность, потребляемая ускорителем, оказывается небольшой, и коэффициент полезного действия его получается высоким.

Один из самых мощных современных линейных ускорителей построен в США. Он состоит из медной трубы-волновода длиной в 66 метров и диаметром 7,5 сантиметра. В волноводе бежит волна длиной 10 сантиметров (частота тока 3 миллиарда колебаний в секунду, 3 тысячи мегагерц). Эта волна возбуждается комплектом генераторных приборов (кэстронов), которые развивают в толчке (импульсе) мощности почти в полмиллиона киловатт. При этом

На странице 40 представлена механическая аналогия многократного ускорения заряженных частиц стоячей электромагнитной волной.

По платформам катятся слева направо тяжелые шары. Платформы совершают колебательные движения, все время перемещаясь вверх-вниз-вверх. Между платформами натянуты гибкие перепонки, по которым скатываются шары.

Показаны четыре последовательных положения платформ: I, II, III и IV.

На верхнем рисунке шар В из желоба вступает на первую платформу, другой — Б катится по второй.

Во время движения шаров по платформам последние поднимаются вверх вместе с шарами. Скорость каждого шара при этом не меняется; она остается такой же, с какой шар вступил на платформу.

Шары доходят до края платформ, когда те находятся в самом верхнем положении, а пустые — в самом нижнем. Скатываясь с верхних на нижние, шары ускоряются.

Затем опустевшие платформы опускаются вниз, а те, по которым теперь катятся шары, поднимаются вверх.

Скатываясь с платформы на платформу, шары все увеличивают и увеличивают свою скорость.

напряженность электрического поля внутри волновода составляет более 100 тысяч вольт на каждый сантиметр пути.

В линейных ускорителях заряженные частицы лишь один раз проходят от начала ускорителя к его концу. При этом они пробегают мимо всех электродов. И каждым из них подталкиваются, подгоняются. За этот один-единственный рейс частицы-снаряды должны приобрести свою полную энергию. Если понадобится энергию частицы увеличить еще больше, то необходимо увеличивать длину ускорителя.

С линейными ускорителями успешно состязаются циклические ускорители, в которых заряженные частицы движутся не по прямой, а по криволинейным (спиральным или круговым) путям. Полная длина пути частиц в этих ускорителях во много раз превышает размеры самого ускорителя. Мимо одних и тех же ускоряющих электродов частицы проходят по многу раз.

При помощи циклических ускорителей можно более дешево, более экономно получать частицы, ускоренные до сверхвысоких энергий.

Первый резонансный циклический ускоритель был предложен в начале тридцатых годов американским ученым профессором физики Калифорнийского университета Э. Лоуренсом. За создание этого прибора, получившего название циклотрон, Лоуренс был удостоен Нобелевской премии по физике.

«ЯДЕРНАЯ ДРОБИЛКА» ТРИДЦАТЫХ ГОДОВ

С этим резонансным ускорителем были проведены ценнейшие работы в области ядерной физики. При помощи «ядерной дробилки», как называли циклотрон в тридцатых годах, были впервые получены ядерные реакции с ядрами тяжелых элементов. В циклотроне можно ускорять ядра водорода, дейтерия, гелия (альфа-частицы) и более тяжелые ядра, осуществлять множество ядерных реакций, изготавливать различные, не встречающиеся в природе изотопы элементов.

Не описав подробно принципа действия циклотронов, нельзя перейти к рассмотрению более сложных

современных циклических ускорителей. Ниже показана схема циклотрона и его механическая аналогия. Самой громоздкой и дорогой частью циклотрона является электромагнит с плоскими полюсами. Диа-

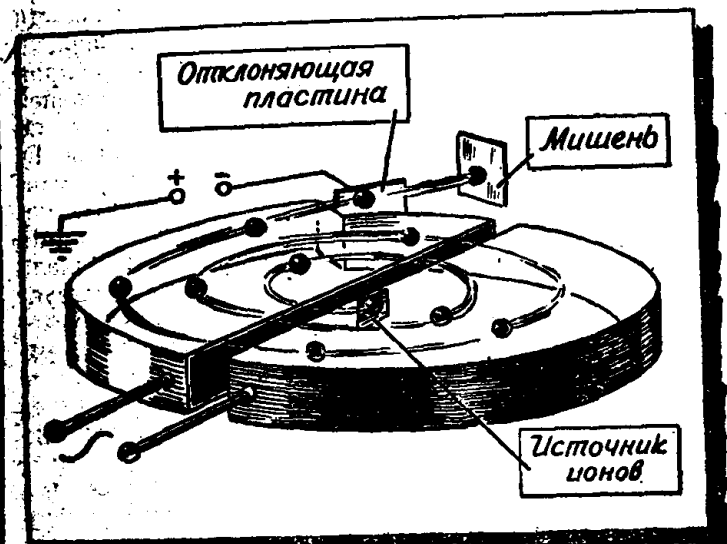


Схема циклотрона

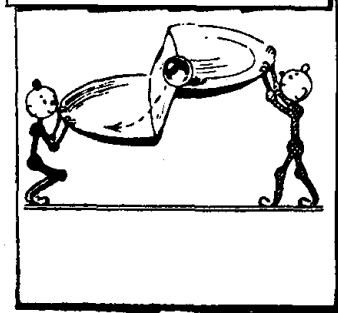
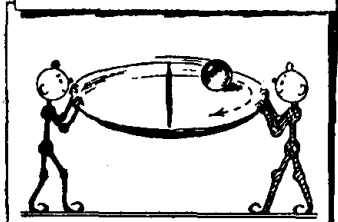
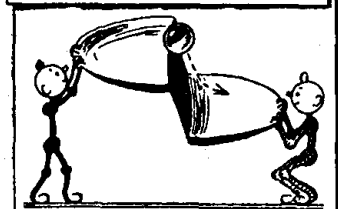
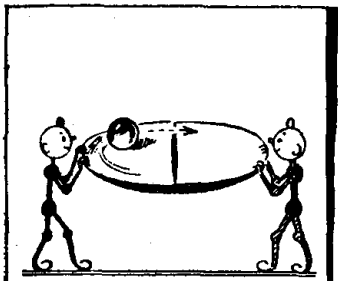
метр полюсов электромагнита достигает нескольких метров. На сооружение такого магнита затрачивается несколько тысяч тонн стали, сотни тонн меди — для обмотки. В США был построен циклотрон с серебряной обмоткой электромагнита*.

Между полюсами электромагнита циклотрона лежит плоская коробочка, пронизываемая магнитным силовым полем. Это рабочая ускорительная вакуумная камера циклотрона. К ней присоединены мощные паромасляные насосы. Они создают в огромной ускорительной камере вакуум.

* Циклотрон этот предназначался для лаборатории, занимавшейся разработкой атомной бомбы и охранявшейся, пожалуй, тщательнее складов казначейства. Поэтому было решено превратить хранившиеся в казначействе без движения слитки серебра в шины и сделать из этих шин катушки циклотрона.

тельной камере разрежение более высокое, чем в маленькой радиолампе.

В рабочей камере циклотрона помещена еще одна плоская круглая коробка, разрезанная по диаметру на



две части. Между обеими половинками оставлена небольшая щель. Каждая из половинок внутренней коробки напоминает по форме латинскую букву D. Поэтому их назвали дуантами. Эти дуанты и являются ускоряющими электродами. В щели между ними действует электрическое поле, увлекающее заряженные частицы (ионы). От дуантов сделаны выводы через изоляторы в стенках вакуумной камеры. К выводам прикладывается напряжение высокой частоты. Обычно выбирается частота порядка нескольких десятков мегагерц, что

Механическая аналогия циклотрона — высокочастотного резонансного ускорителя с движением ионов по спиральному пути.

Две половинки круглой, горизонтально расположенной чаши находятся в непрерывном колебательном движении: вверх-вниз-вверх. Шары скатываются по перепонке, соединяющей половинки чаши, под действием силы тяжести подобно тому, как положительные ионы движутся в электрическом поле от анода к катоду.

соответствует длине волны в несколько метров. Максимальное напряжение между ускоряющими электродами достигает нескольких десятков киловольт.

Ток высокой частоты подводится к циклотрону, от обычного радиопередатчика с электронными лампами. Этот передатчик примерно такого же типа, как те, что применяются в телевидении и радиовещании.

В щели между электронами, вблизи центра камеры помещается источник тех ионов, которые будут ускоряться.

Ускорение происходит следующим образом. Положительно заряженные ионы, выходя из источника, движутся к дуанту, на котором в данный момент отрицательное напряжение. Пройдя щель между дуантами, ионы приобретают некоторый запас энергии, соответствующий разности потенциалов между дуантами и равный нескольким десяткам киловольт.

Внутри дуантов нет электрических сил, и там ионы движутся по инерции. Но поперек их пути действуют силовые линии магнитного постоянного поля, которые, не изменяя запаса энергии ионов, искривляют их траектории и заставляют описывать окружности. Чем больше скорость частицы, тем больше радиус окружности, которую она описывает.

Пока ионы движутся внутри одного дуанта, напряжение между дуантами меняет свой знак. И когда эти ионы, описав полукруг, снова подойдут к щели, то уже второй дуант будет более отрицательным, нежели первый. Положительные ионы, пересекая щель, устремляются к этому отрицательному дуанту и снова ускоряются. Внутри второго дуанта ионы снова летят по инерции, но описывают там полуокружность несколько большего радиуса, так как скорость их теперь больше. Ионы должны снова выйти к щели тогда, когда на дуантах полярность изменится и на пути ионов опять будет действовать ускоряющее напряжение.

Это и есть условие резонанса. Время полета порции ионов внутри каждого дуанта должно быть в точности равно полупериоду высокочастотного напряже-

ния. И как качели нельзя раскачать беспорядочными толчками, так и ионы надо подталкивать в такт.

Траектория ионов в циклотроне имеет вид расходящейся спирали. С каждым новым оборотом ионы описывают окружность все большего радиуса. Как же поддерживается синхронизм, то есть совпадение прибытия к щели ионов и соответствующее изменение полярности дуантов? В циклотроне используется тот замечательный факт, что период обращения заряженных частиц зависит только от трех величин: от заряда частицы, ее массы и напряженности магнитного поля. Период обращения частицы не зависит ни от того, какую перед этим разность напряжений прошла эта частица, ни от скорости ее движения. Медленные ионы описывают маленькие окружности, быстрые — большие окружности. Но на один оборот затрачивается одно и то же время. После сотни последовательных оборотов порция ионов, получив значительную скорость и накопив, следовательно, значительную кинетическую энергию, приближается к боковым стенкам дуантов. В одном из них помещается отклоняющий электрод — дефлектор. К нему приложено постоянное отрицательное напряжение порядка нескольких десятков тысяч вольт. Это напряжение отклоняет пучок ускоренных ионов и выводит его из дуанта в камеру, где расположена мишень.

Циклотрон работает с относительно высоким коэффициентом полезного действия. Вот данные установки средней мощности. Максимальная сила тока в ионном пучке — 1 миллиампер. Энергия ионов — 12 миллионов электроновольт. Следовательно, мощность пучка — 12 киловатт. Высокочастотный генератор подводит к дуантам мощность в 50 киловатт, для питания магнита необходимо 25 киловатт постоянного тока, 15 киловатт — для насосов и прочего вспомогательного оборудования. Таким образом, окончательный коэффициент полезного действия равен 13,3 процента.

Поток ионов, выпущенный из такого циклотрона, проходит в воздухе путь больше метра. От него исходит нежное фиолетовое сияние. Это свечение объясняется тем, что быстрые ионы, встречая на своем пути

нейтральные молекулы воздуха, возбуждают их, и последние, возвращаясь в нормальное состояние, испускают свет. Это смертоносный луч. Металлическая пластинка, поставленная на его пути, плавится. Она тормозит поток ионов, и вся их энергия идет на нагревание металла.

На пути луча зарождается не только видимый свет, но и очень коротковолновые электромагнитные колебания — гамма-излучение. Это излучение проникает через большие толщи материалов и смертельно действует на живые клетки. Экспериментаторы, работающие с циклотроном, должны находиться подальше от самого прибора, а их рабочие места защищены от вредных излучений толстыми стенами.

На циклотронах можно получить протоны и дейтроны с энергией до 20 миллионов электроновольт.

Однако необходимо подчеркнуть, что максимальные энергии частиц, ускоряемых циклотроном, в сущности, немногим превышают максимальные энергии, достижимые на высоковольтных установках, и сообщить частицам энергии большие, чем полтора-два десятка миллионов электроновольт, циклотрон не может. Дело в том, что во всем пространстве рабочей камеры циклотрона действует магнитное поле одинаковой интенсивности, а между дуантами — переменное напряжение постоянной частоты. В таких условиях для соблюдения резонанса необходимо, чтобы масса ускоряемых ионов сохранялась неизменной в течение всего процесса ускорения. При этом период обращения частиц внутри дуантов будет постоянным.

Но масса ионов не меняется лишь до тех пор, пока скорость их значительно меньше скорости света. При достижении десятых долей скорости света возрастание массы ионов становится настолько ощутимым, что нарушаются условия резонанса. Ведь период обращения частиц увеличивается, а период ускоряющего электрического поля остается постоянным. Происходит нарушение согласования.

Как же поддержать резонанс для частиц с меняющейся массой?

СНОВА ОБ ОТЗЫВЧИВОСТИ

Кому не доводилось раскачиваться на ветке дерева или на гибкой доске? Гибкая опора и груз на ней образуют колебательную систему. Чтобы раскачаться, надо давать толчки в такт. Как говорят физики, частота возмущающей силы должна соответствовать частоте собственных колебаний системы. В этом случае получается резонанс.

Но как быть, если данные колебательной системы меняются: скажем, груз становится все тяжелее (еще кто-то прыгнул на доску, на которой вы раскачиваетесь)? Как при этом поддержать резонанс? Чем тяжелее груз, чем податливее опора, тем длительнее период колебаний механической колебательной системы.

Сходные задачи возникают при ускорении заряженных частиц, у которых масса возрастает по мере наращивания энергии. Когда эти частицы вращаются по круговым орбитам в циклических ускорителях, то увеличение массы вызывает увеличение времени обращения частицы.

Чтобы поддержать резонанс в приведенной для примера механической колебательной системе с изменяющейся массой, можно поступать по-разному.

При увеличении массы колебательной системы надо соответственно уменьшать гибкость этой системы: например, уменьшать расстояние между грузом и опорой и, таким образом, поддерживать неизменной собственную частоту колебаний, несмотря на изменение массы.

Можно пойти и по другому пути. Не заботиться о сохранении неизменной собственной частоты колебательной системы, но менять частоту возмущающей силы так, чтобы всегда сохранять резонанс.

В циклических ускорителях также можно разными приемами поддержать резонанс между движением заряженных частиц и переменными электрическими силами. Например, напряженность магнитного поля, в котором движутся частицы, держать неизменной, но по мере нарастания массы частиц, а значит, их замед-

ления, увеличивать период ускоряющего переменного электрического поля, то есть понижать его частоту.

Или держать неизменной частоту ускоряющего электрического поля, но с нарастанием массы частиц постепенно повышать напряженность магнитного поля.

Или по мере ускорения частиц изменять частоту электрического поля и напряженность магнитного поля.

Первый метод применен в ускорителе ионов, который является видоизменением и дальнейшим развитием простого циклотрона. У этого ускорителя такой же электромагнит с массивными полюсами, как и у циклотрона, и такая же ускорительная камера в виде плоской коробки. Но он и существенно отличается от циклотрона. Дело в том, что частота ускоряющего напряжения на его электродах не остается постоянной, а изменяется. Такой ускоритель у нас в СССР называют фазотроном.

ЦИКЛОТРОН С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ — ФАЗОТРОН

Иногда этот прибор называют синхроциклотроном или циклотроном с переменной частотой.

Как уже было показано выше, время, в течение которого заряженная частица совершает один полный оборот по окружности в магнитном поле, пропорционально отношению массы частицы к напряженности магнитного поля. Если при постоянной напряженности магнитного поля H масса частицы m растет, то и длительность одного оборота ее увеличивается. Чтобы вести по спирали порцию заряженных частиц, подталкивать ее в такт, необходимо понижать частоту ускоряющего напряжения по мере наращивания энергии частиц. Начальная частота в фазотроне берется обычно от 10 до 30 миллионов колебаний в секунду (мегагерц), и к концу каждого цикла ускорения эта частота понижается примерно на 30 процентов. Изменение частоты производится при помощи быстро вращающихся переменных конденсаторов. Чтобы упрос-

тить всю установку и облегчить процесс изменения частоты, в фазотронах применяют не два ускоряющих электрода (дуанта), а только один.

В простом циклотроне одновременно ускоряется много порций заряженных частиц, то есть одновременно на каждом витке спирального пути может двигаться самостоятельная порция ионов. В фазотроне (синхроциклотроне) можно ускорить только одну порцию, для которой выполняется условие синхронизма, — условие резонанса в течение всего времени ускорения. Когда эта порция ионов начинает свой спиральный

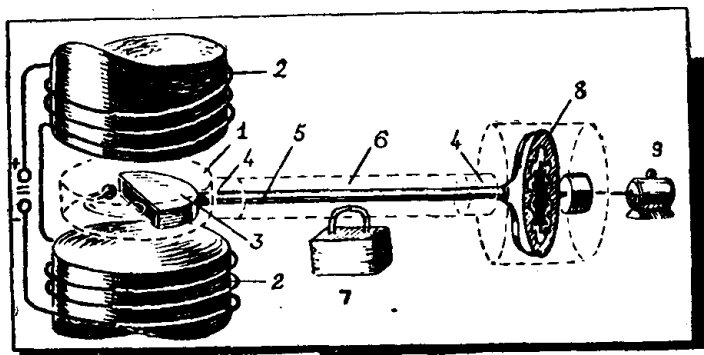


Схема устройства синхроциклотрона (фазотрона).

В вакуумной камере 1, расположенной между полюсами магнита 2, находится ускоряющий электрод (дуант) 3. Этот электрод укреплен на стержне 5, поддерживаемом изоляторами 4 из высококачественного фарфора. Стержень 5 и окружающая его трубка 6 составляют высокочастотную передающую линию (коаксиальную линию). Эта линия питается от высокочастотного генератора 7. Конец линии замкнут на переменный конденсатор 8. Неподвижная часть этого конденсатора (статор) представляет из себя зубчатый обод, укрепленный на проводнике 5. Подвижная часть (ротор) — зубчатый диск, укрепленный на валу быстроходного электродвигателя 9.

При вращении конденсатора 8 емкость его периодически меняется, и соответственно меняется частота электрических колебаний на электроде 3. В момент, когда эта частота наивысшая, начинается каждый цикл ускорения порции ионов. По мере движения по спиральному пути нарастает их масса и замедляется движение, согласованно понижается и частота ускоряющего электрического напряжения. Когда частота наименьшая, цикл ускорения заканчивается, ионы ударяют о мишень. Затем частота вновь повышается, и начинается новый цикл ускорения.

путь из центра вакуумной камеры, то частота напряжения на ускоряющем электроде имеет наивысшее значение; затем по мере того как порция ионов движется по орбитам все большего радиуса, частота ускоряющего напряжения все понижается. Когда цикл ускорения заканчивается и порция ионов выведена на мишень, необходимо еще некоторое время, чтобы вернуть частоту ускоряющего напряжения к ее начальному значению — вновь повысить ее. Затем начинается цикл ускорения новой порции ионов.

Ток в этом ускорителе во много раз меньше, чем у простого циклотрона. Но для исследовательских целей с этим недостатком можно примириться.

Самый большой в мире фазотрон (синхроциклотрон) построен в Советском Союзе в Институте ядерных проблем под руководством Д. В. Ефремова, М. Г. Мещерякова, А. Л. Минца. Магнит этого прибора весит 7 тысяч тонн, напряженность магнитного поля в зазоре между полюсами — 17 тысяч эрстедт, диаметр полюсов — 6 метров. Этот прибор ускоряет протоны до энергии в 680 миллионов электроновольт и дает средний ток ускоренных протонов 0,3 микроампера.

Диаметр полюсов электромагнита фазотрона растет прямо пропорционально энергии, которую мы собираемся сообщить ускоряемым протонам. А вес электромагнита растет, как куб его линейных размеров. Следовательно, вес электромагнита растет пропорционально кубу максимальной энергии тех частиц, которые ускоряются между его полюсами. Например, чтобы увеличить энергию протонов в 10 раз, необходимо было бы увеличить вес магнита в тысячу раз. Если бы потребовалось получить на фазотроне протоны с энергией в несколько миллиардов электроновольт, то необходим был бы электромагнит весом чуть ли не в миллион тонн.

КОЛЬЦЕВОЙ МАГНИТ

Более экономичную конструкцию имеют те циклические ускорители, в которых заряженные частицы движутся не по спирали, разворачивающейся из цент-

ра, а по кругу неизменного радиуса. Ускорительная камера при этом имеет форму не коробки, как в циклотроне и фазотроне, а знакомой уже нам кольцевой трубки — баранки. По оси этой баранки и движется

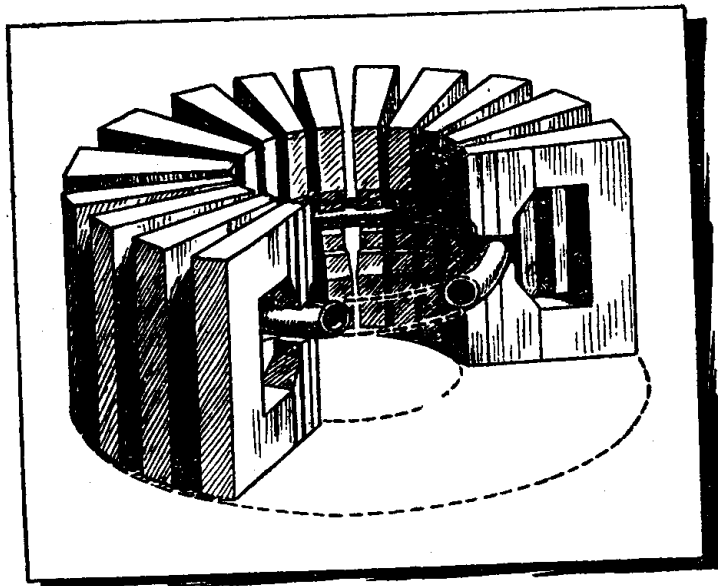


Схема синхротрона — циклического ускорителя электронов. Кольцевой магнит синхротрона собирается из С-образных пакетов электротехнической стали. Между полюсами магнита расположена вакуумная камера, имеющая форму баранки. На одном из участков этой камеры действует высокочастотное ускоряющее напряжение неизменной частоты. Катушка, возбуждающая магнитное поле, имеет форму тора (бублика), подобно ускорительной камере. Витки катушки возбуждения лежат в плоскостях, параллельных плоскости орбиты электронов. (Высокочастотный ускоряющий контур и катушка возбуждения на рисунке не показаны.)

порция ускоряемых заряженных частиц. Для такой кольцевой камеры и электромагнит может быть сделан в виде узкого кольца. Вес кольцевого электромагнита и мощность его питания будут значительно меньше, нежели у магнита со сплошными полюсами.

Но чтобы заряженные частицы двигались по кольцевому пути неизменного радиуса, необходимо по мере нарастания их энергии и массы увеличивать напряженность магнитного поля. Питая магнит надо не постоянным током, как это делается в циклотроне и фазотроне, а посылать в обмотку электромагнита отдельные мощные импульсы. Тогда в кольцевом магнитном поле, на кольцевых орбитах, можно ускорять и легкие частицы — электроны, и тяжелые — ионы.

В разных странах было проведено большое количество как теоретических, так и экспериментальных исследований с целью выявления наиболее экономичных конструкций кольцевых магнитов и наиболее выгодных схем их питания.

Электроны обладают тем свойством, что уже при энергии в несколько миллионов электроновольт их скорость лишь немного меньше скорости света. При дальнейшем наращивании энергии скорость электронов остается практически неизменной, а растет лишь их масса (это показано на графиках рисунков на страницах 8 и 12). Поэтому при движении такого энергичного электрона по кольцевой орбите постоянного радиуса период обращения его не будет зависеть от сообщаемой ему энергии. Это позволяет применить для ускорения электронов электрическое переменное поле с неизменной частотой, а напряженность магнитного поля менять — усиливать его по мере наращивания энергии (массы) электронов, чтобы удерживать их на неизменной орбите.

Ускорители электронов, работающие с неизменной частотой ускоряющего электрического поля и с нарастающим магнитным полем, появились в первые годы после окончания второй мировой войны. Этот тип ускорителя получил название — «синхротрон».

ЦИКЛИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ — СИНХРОТРОН

Принципиальное устройство синхротрона показано на странице 52. Вакуумная камера этого прибора, как и у всех ускорителей с кольцевым магнитом, имеет

форму баранки (тора). Ее делают из фарфора или из прочного кварцевого стекла и укладывают в межполюсном зазоре кольцевого электромагнита.

Сердечник электромагнита выполняется из тонких листов электротехнической стали, подобно сердечникам обычных трансформаторов переменного тока. Обмотка кольцевого электромагнита соединяется с конденсаторной батареей. В обмотке циркулирует переменный ток большой силы и создает переменное магнитное поле между полюсами электромагнита. Поле заворачивает пути электронов и управляет их движением в вакуумной ускорительной камере.

Помимо управляющего магнитного поля, в ускорительной камере синхротрона существует и вихревое электрическое поле, так же как и в бетатроне. Но, в отличие от бетатрона, в синхротроне для ускорения электронов на одном из участков вакуумной камеры действует еще и высокочастотное ускоряющее напряжение, равное нескольким киловольтам. Оно образуется между двумя электродами, соединенными с обычным колебательным контуром, которые встречаются во всех радиотехнических устройствах. Период высокочастотного напряжения на контуре подбирается в точности равным времени обращения электрона по кольцевой орбите внутри камеры. Таким образом, пролетев между высокочастотными электродами и получив ускоряющий толчок, электрон успеет совершить свой путь по кольцевой орбите и вновь подойти к ускоряющим электродам как раз к тому моменту, когда на этих электродах будет вновь ускоряющее напряжение.

Длина электромагнитной волны, возбуждаемой высокочастотным колебательным контуром, равна периоду колебаний, помноженному на скорость света.

Ускоряемые электроны в камере также летят со скоростью, близкой к скорости света. Следовательно, за время одного периода они успевают пролететь расстояние, равное одной длине волны. Поэтому можно сказать, что резонансная длина волны ускоряющего

колебательного контура в точности равна длине кольцевой орбиты, по которой вращаются электроны.

Процесс ускорения начинается в момент, когда в обмотку электромагнита начинает поступать ток, и длится все время, в течение которого ток нарастает. За это же время сгусток электронов успевает сделать несколько сотен тысяч оборотов по кольцевой орбите и набрать энергию до миллиарда электроновольт. В принципе ускорять частицы можно и до больших энергий, однако не беспредельно. В синхротроне, так же как и в бетатроне (и вообще во всех циклических ускорителях), заряженные частицы движутся по криволинейному пути (в частности, по кольцевой орбите), порождают в окружающем пространстве электромагнитные волны, расходуя на это часть своей энергии. Чем выше энергия частицы и чем меньше радиус ее орбиты*, тем больше энергии уходит на излучение.

В ускорителе с диаметром орбиты в 2 метра электрон, ускоренный до 300 миллионов электроновольт, теряет на электромагнитное излучение за один оборот энергию, равную одной тысяче электроновольт. Ускоренный же до одного миллиарда электроновольт и при диаметре орбиты в 9 метров, он уже будет терять за один оборот 20 тысяч электроновольт.

Длина электромагнитной волны, излучаемой сгустком электронов, вращающихся по круговой орбите, зависит от энергии этих электронов. При энергии электронов в 60 миллионов электроновольт начинается темно-красное свечение. При 200 миллионах электроновольт излучение становится белым и более интенсивным.

Эти «светящиеся электроны» можно рассматривать только при помощи системы зеркал. Находиться в непосредственной близости от синхротрона опасно. Экспериментатор может получить смертельную дозу ионизирующего излучения, которое всегда возникает при столкновениях быстрых электронов со стенками ускорительной камеры, с мишенями и т. д.

* Потери энергии на излучение пропорциональны четвертой степени отношения энергии ускоренной частицы к ее энергии покоя и обратно пропорциональны радиусу орбиты частиц.

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ИОНЫ НА КОЛЬЦЕВЫХ ОРБИТАХ

Кольцевой магнит с высокочастотным контуром, помещенным на орбите заряженных частиц, может быть использован для ускорения не только электронов, но и тяжелых частиц — ионов. Однако при этом необходимо некоторое усложнение системы. Даже при энергиях в миллиарды электроновольт скорость ионов еще не достигает скорости света, и в процессе ускорения не остается постоянной, а продолжает расти.

Поэтому при ускорении ионов по круговой орбите постоянного радиуса необходимо повышать частоту ускоряющего напряжения по мере увеличения энергии, а следовательно, и скорости ионов. Напомним, что при ускорении ионов на спиральных орбитах в фазотроне (орбитах с нарастающим радиусом) необходимо было, наоборот, понижать частоту ускоряющего напряжения, чтобы поддерживать резонанс по мере наращивания энергии (массы и скорости) ионов. Проекты ускорителей ионов с кольцевыми орбитами и с растущей частотой ускоряющего напряжения предлагались еще в годы войны (проект «протонного синхротрона» профессора Бирмингемского университета Маркуса Олифанта).

Два ускорителя такого типа были пущены в работу в США. Один из них в Калифорнии получил название «беватрона» (приставка «бева» обозначает миллиард, подобно тому, как приставка «мега» — миллион), другой в Брукхавенской национальной лаборатории был назван «космотрон». Ускоренные этим прибором частицы имеют такие же энергии, как и частицы в космических лучах, приходящих на Землю из мирового пространства. В СССР этот тип ускорителя получил название синхрофазотрон.

В лаборатории ядерных исследований под Москвой сооружен самый большой в мире синхрофазотрон. В лекции советского ученого члена-корреспондента Академии наук СССР В. И. Векслера на Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии летом 1955 года были впервые приведены данные об этом грандиознейшем физическом приборе.

«Магнит ускорителя состоит из четырех квадрантов со средним радиусом 28 метров, разделенных прямолинейными промежутками, длиной 8 метров каждый. Вес магнита около 36 тысяч тонн*. Мощность питания электромагнита достигает в импульсе 140 тысяч киловольтампер. Для облегчения от качки камера сделана двойной, с разделенным вакуумом».

Этот ускоритель дает протоны с энергией в 10 миллиардов электроновольт.

Цифра 10 миллиардов электроновольт звучит несколько отвлеченно. Чтобы представить более наглядно, о каких энергиях идет речь, приведем такой пример. Если бы до такой скорости разогнать не отдельные ядра водорода, а снаряд размером с булавочную головку (весом в сотую долю грамма), то при ударе этого снаряда о мишень выделилось бы столько же энергии, сколько дает сжигание одной тысячи тонн угля (целого железнодорожного состава).

ЗАВОД КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ,

или современный циклический ускоритель протонов — синхрофазотрон (см. на страницах 60 и 61)

Когда прежде говорили «физический прибор», то подразумевали нечто такое, что можно разместить на обычном столе.

В современной же ядерной физике применяются установки, в которых одна только деталь — стальной сердечник электромагнита — весит десятки тысяч тонн. Сами они занимают огромные площади, на которых разместились бы промышленные предприятия.

Каждую минуту этот «завод» выпускает несколько партий готовой продукции, по 10 тысяч миллионов (10^{10}) единиц изделий в каждой. Вес всей продукции, вырабатываемой в течение целого года при круглосу-

* Для сравнения можно указать, что на сооружение Крымского моста через Москву-реку, близ Парка культуры и отдыха имени Горького, пошло 10 тысяч тонн стали.

точной работе ускорителя, едва достигает одной миллионной доли грамма. А за миллион лет работы такого завода она могла бы уместиться в наперстке. Изделия эти — ядра водорода, ускоренные до высоких энергий, таких же, как энергия частиц в космических лучах.

Таковы современные ускорители заряженных частиц на энергии в миллиарды электроновольт — синхрофазотроны.

Подобно большому заводу, синхрофазотрон состоит из нескольких «цехов».

Кольцевой электромагнит — самая тяжелая и громоздкая часть циклического ускорителя. Здесь создаются те незримые «магнитные стены» кольцевого пути, по которому движутся заряженные частицы.

Магнитный поток в сердечнике электромагнита (Э. М.) не постоянен. Он нарастает в каждый рабочий цикл от нуля до максимума, а затем снова падает до нуля. Если бы выполнить сердечник в виде сплошного стального куска, то пульсирующий магнитный поток возбуждал бы в нем вредные вихревые токи. Для ослабления этих токов сердечник выполнен из отдельных пластин мягкой стали, толщиной не более нескольких миллиметров каждая. Пластины изолированы одна от другой бумажными прокладками. В кольцевом зазоре Э. М. помещена ускорительная вакуумная камера.

На рисунке представлен ускоритель, у которого магнит состоит из четырех квадрантов. Между квадрантами находятся прямолинейные промежутки. В одном из них расположено устройство для ввода в камеру ускоряемых частиц (5). В другом промежутке производится вывод готовой продукции — ускоренных частиц. В третьем промежутке показан ускоряющий высокочастотный контур (6).

Обмотка электромагнита (8) выполнена так, что магнитное поле сосредоточено в кольцевом зазоре между полюсами магнита — в ускорительной камере.

Питание электромагнита. Ток в обмотки электромагнита подается от электрических машин, показанных в верхнем правом углу схемы. В быстро вращающихся роторах генераторов переменного тока накапливается кинетическая энергия. Она в несколько раз превышает

возможный максимальный запас электромагнитной энергии в поле магнита. За счет кинетической энергии роторов питается электромагнитное поле в течение периода ускорения.

Ток от генераторов подается к электрическим вентилям — игнитронам (9). На рисунке показана одна группа из 6 вентилялей, но в действительности в установке может быть несколько таких групп.

В начале каждого рабочего цикла вентили работают как выпрямители — превращают переменный ток генераторов в постоянный, который затем посылают в обмотку (8) кольцевого электромагнита (Э. М.). Энергия перекачивается из генераторов в магнитное поле электромагнита, скорость вращения роторов генераторов падает.

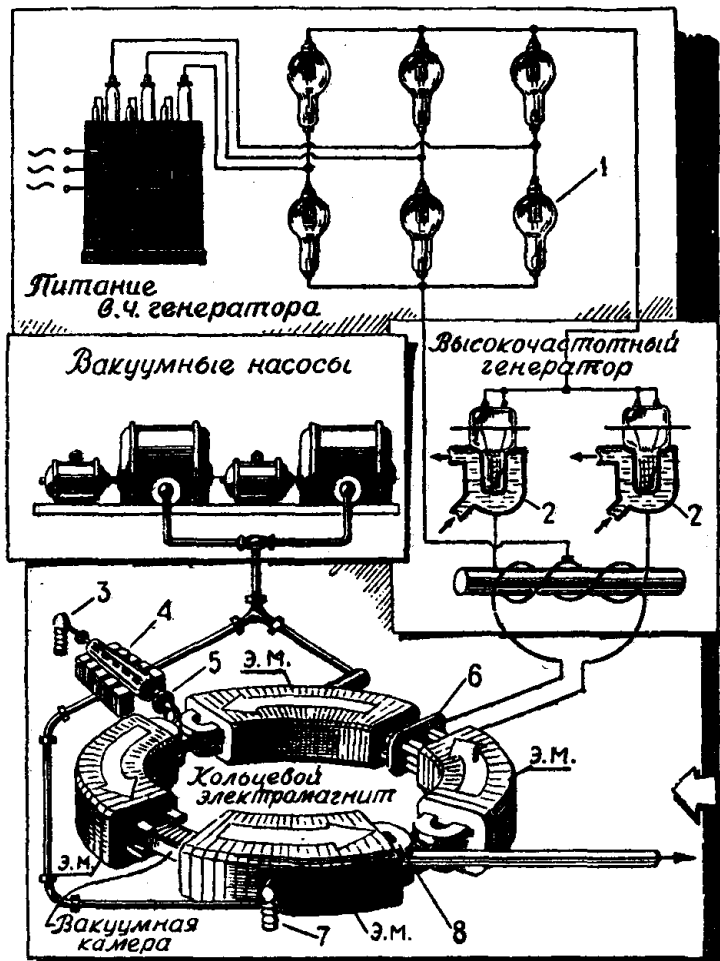
Обмотка электромагнита обладает большой самоиндукцией — электромагнитной инерцией. Поэтому в начале цикла ускорения ток, идущий через обмотку электромагнита, невелик. К концу же он достигает максимального значения. Магнитодвижущая сила при этом равна миллионам ампервитков.

В этот момент производится переключение схемы управления вентилями (9), и энергия перекачивается из электромагнита обратно в генераторы переменного тока. Ток в обмотке электромагнита падает, а скорость вращения роторов генераторов нарастает. В это время они работают как электродвигатели.

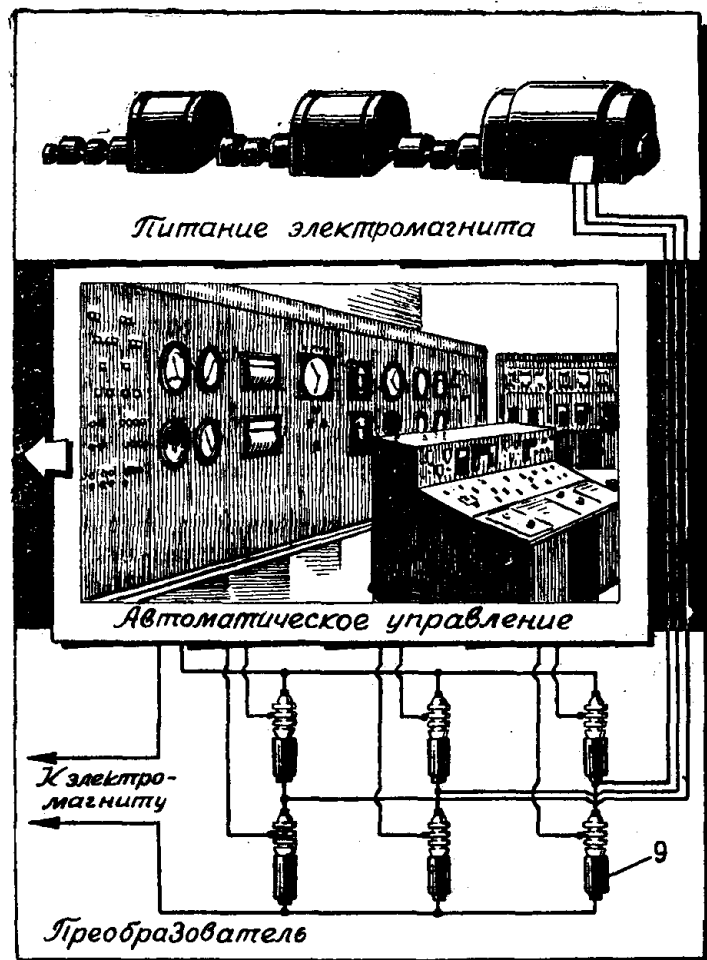
Когда вся энергия из электромагнита перейдет в роторы генераторов (за исключением, понятно, неизбежных потерь), ток магнита снизится до нуля.

Несколько секунд ускоритель «отдыхает»: магнит обесточен, генераторы продолжают увеличивать скорость и накапливают энергию. Затем начинается новый рабочий цикл. Вентили (9) вновь работают как выпрямители, вновь нарастает магнитное поле электромагнита ускорителя. По трубам (5) в кольцевую камеру поступает новая порция водородных ядер. Они движутся по кольцевым орбитам, как это показано стрелками, с каждым оборотом наращивая скорость и энергию.

Ускорительная камера имеет форму огромной банки прямоугольного сечения. Две вертикальные



Завод космических частиц — современный



циклический ускоритель протонов (синхрофазотрон).

стены этой камеры сделаны из сплошных листов немагнитной нержавеющей стали. Дно и потолок выполнены из того же материала, но в виде отдельных узких полос. Сквозь пол и потолок камеры проходит пульсирующий магнитный поток — то нарастающий, то спадающий. Чтобы предотвратить возникновение вредных вихревых токов, которые могли бы отразить переменный магнитный поток, не допустить его в камеру, стальные полосы, составляющие пол и потолок вакуумной камеры, отделены друг от друга, а также от стен камеры слоем изоляции из особой, высококачественной пластмассы. Сотни изоляционных прослоек между отдельными полосами стали выполняются с большой тщательностью. И все же натекание посторонних газов в вакуумную камеру неизбежно. А для нормальной работы ускорителя в камере должно поддерживаться высокое разрежение — высокий вакуум: давление газов в камере не должно превышать миллиардной доли атмосферного давления.

«Цех пустоты». В нескольких местах к ускорительной камере подключены высоковакуумные, так называемые диффузионные насосы (7). В них кипит особое масло (силиконовое — кремнийорганическое). Потоки масляных паров захватывают и уносят газы из ускорительной камеры. Между каждым насосом и ускорительной камерой есть ловушка, которая не допускает масляные пары от насоса в камеру. Помимо ловушек, в вакуумпроводах имеются манометры и высоковакуумные запорные клапаны. Клапаны позволяют отключать и сменять вышедшие из строя насосы, не нарушая вакуума самой ускорительной камеры.

Паромасляные высоковакуумные насосы не могут выбрасывать захваченный ими газ прямо в атмосферу. Выход высоковакуумных насосов подключается к механическим насосам предварительного разрежения (форвакуумным).

Источник протонов. Протоны, подлежащие ускорению, поступают из разрядной трубки (3). Здесь в дуговом разряде с атомов водорода сдираются электронные оболочки. Оголенные ядра собираются в узкий поток, который, прежде чем попасть в кольцевую камеру,

должен пройти предварительное ускорение. Оно может выполняться по-разному. Иногда применяют постоянное напряжение в несколько миллионов вольт. В советском синхрофазотроне протоны, прежде чем попасть в кольцевую камеру, предварительно ускоряются до 9 миллионов электроновольт в высокочастотном линейном ускорителе, обозначенном цифрой (4).

По вводу устройству — криволинейной трубе (5), снабженной системой отклоняющих электродов, протоны, прошедшие предварительное ускорение, впрыскиваются в кольцевую камеру. Направление впуска и момент впуска должны быть точно подогнаны, чтобы ступок протонов попал на устойчивую, так называемую равновесную орбиту.

Высокочастотный генератор вырабатывает напряжение, ускоряющее протоны при каждом их обороте. Этот генератор на лампах (2) получает питание от группы вентиля (1). Ускорительный генератор в течение одного цикла ускорения должен изменить свою частоту более чем в 10 раз.

Когда ионы только входят в кольцевую камеру, их скорость мала и частота ускоряющего напряжения обычно меньше одного мегагерца. К концу периода ускорения частота должна быть несколько мегагерц.

За время ускорения до максимальной энергии каждый протон успевает сделать несколько миллионов оборотов по орбите длиной в несколько сотен метров. За каждый оборот протоны наращивают свою энергию примерно на тысячу вольт. Полный путь, проходимый протонами в камере за каждый цикл ускорения, достигает несколько сотен тысяч километров.

Ряд автоматических и сигнальных устройств помогает устойчиво поддерживать нормальный режим работы. Десятки километров проводов соединяют отдельные агрегаты ускорителя с пунктом управления.

Описанный физический прибор занимает площадь не меньшую, чем территория крупного машиностроительного завода. Десятки физиков, а также рабочих и инженеров различных специальностей обслуживают этот физический прибор.

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ

Можно установить карандаш вертикально, но достаточно на него подуть, и он опрокинется. Поставленный карандаш опрокидывается при малейшем отклонении от начального положения. Такие предметы, как, например, стул, шкаф, опрокидываются уже только при значительных отклонениях. При малых же отклонениях они, будучи предоставлены самим себе, возвращаются в исходное положение.

Способность возвращаться к исходному положению называется устойчивостью. Это понятие применимо к различным физическим процессам. Можно говорить не только об устойчивости положения, но и об устойчивости движения. Если, например, скатывать с горы шары по желобу, то, чтобы движение шаров было устойчивым, чтобы шары следовали за всеми изгибами и поворотами желоба, он должен иметь достаточно высокие борты.

Ряд важных задач из области устойчивости был разработан применительно к движению небесных тел. Одни орбиты (например, орбиты планет в солнечной системе) являются устойчивыми, по другим движение не может происходить. Вопросами устойчивости, или, как прежде иногда говорили, «прочности движения», в «небесной механике» занимался великий русский математик Ляпунов. Многие методы расчета, созданные им в прошлом веке для анализа движения планет, метеоритов, звезд в просторах вселенной, применяются теперь для расчета движения мельчайших атомных частиц в вакуумных камерах ускорителей.

Движение заряженных частиц в ускорителях направляется электрическими и магнитными силами. Если эти силы подобраны правильно, то заряженные частицы будут двигаться подобно шарам, катящимся в желобе с высокими стенками. При неправильном же подборе электромагнитных полей электроны или ионы станут срываться с намеченных для них путей и, не набрав требуемой скорости, ударяться о стенки камеры и выходить из игры.

Заряженная частица, летящая в высоком вакууме,

может во многих случаях сбиться с правильного пути, потерять устойчивость движения. Она может не только отклониться в разные стороны от намеченной орбиты, но и опередить или отстать от ускоряющей электромагнитной волны. Заряженная частица в ускорительной камере имеет, как говорят физики, много степеней свободы, и ее движение должно быть устойчивым относительно любой из этих степеней свободы.

УСТОЙЧИВОСТЬ НА ВОЛНЕ

В резонансных ускорителях сгусток заряженных частиц увлекается электромагнитной волной. Положение сгустка относительно волны устойчиво только при определенных условиях.

В линейных ускорителях, например, сгусток электронов или ионов устойчив на переднем скате волны — на том участке волны, где электрическое напряжение возрастает. Если какая-либо заряженная частица отстанет в своем движении, то она сдвинется к той части волны, где напряжение выше, и это более высокое электрическое напряжение подгонит частицу. Если же, наоборот, какая-либо частица в линейном ускорителе забежит вперед, то она попадет в ту часть волны, где электрическое напряжение меньше: эта частица затормозится в своем движении. Таким образом, когда в линейных ускорителях электроны или ионы летят на переднем скате волны электрического напряжения, то и на отстающую частицу и на такую, что забегаet вперед, действуют силы, стремящиеся вернуть их в «стадо».

В циклических ускорителях сгусток заряженных частиц будет устойчиво ускоряться не на переднем, а на заднем скате электрической волны — на том, на котором электрическое напряжение спадает. Если энергия какой-либо заряженной частицы становится больше средней энергии частиц в сгустке, то эта частица будет двигаться по орбите большего радиуса. И время, за которое она совершит полный оборот по этой орбите, будет несколько больше времени обращения всего сгустка. Эта запоздавшая частица попадет на тот

участок электрической волны, где напряжение будет ниже, и скорость ее уравнивается со средней скоростью сгустка. Другая заряженная частица, у которой энергия окажется почему-либо меньше средней, будет двигаться по орбите меньшего радиуса. Время обращения этой «менее энергичной» частицы будет меньше, и она передвинется на тот участок электрической волны, где напряжение выше. Там она подгонится и подровняется со всеми остальными частицами.

И в линейном и в циклическом ускорителе можно добиться того, чтобы электромагнитная волна собирала заряженные частицы в сгустки и ускоряла бы их в течение многих миллионов периодов.

Это свойство заряженных частиц группироваться в сгустки на определенных участках, или, как выражаются физики, в определенных фазах ускоряющей электромагнитной волны, называется «автофазировкой». Исследованием условий автофазировки занимались советский физик В. И. Векслер, американский ученый Мак-Миллан и другие специалисты. Их работы способствовали быстрейшему развитию ускорительной техники.

Перемещение ускоряемых частиц вперед и назад по орбите — это только одна из степеней свободы движения заряженных частиц. Помимо этого, частицы должны еще устойчиво двигаться по орбите и возвращаться на нее при любых отклонениях в стороны.

УСТОЙЧИВОСТЬ НА ОРБИТЕ

Рассматривая бетатрон, мы говорили об устойчивости движения частиц и сравнивали это движение с движением мотоциклиста на вираже. Но, в отличие от мотоцикла, частица, летящая по круговому пути внутри вакуумной камеры — баранки, может отклоняться и по радиусу и по оси (по двум степеням свободы).

Чтобы частицы были устойчивы от осевых (вертикальных) отклонений, магнитное поле должно ослабевать по мере увеличения радиуса. Силовые линии при этом обращены выпуклостью наружу.

Но, для того чтобы движение частиц было устойчивым и против отклонений по радиусу (внутрь или наружу), поле не должно спадать слишком быстро (не быстрее изменения центробежной силы, действующей на частицы).

Мы видим, что условия устойчивости по различным степеням свободы вступают между собой в конфликт. Если сделать резко спадающее по радиусу магнитное поле (сильно выпуклые наружу силовые линии), то будет высока вертикальная устойчивость. Магнитные пол и потолок как бы зажмут путь частиц сверху и снизу. При этом пропадет радиальная устойчивость: частицы будут врезываться в стенки вакуумной камеры (во внутреннюю или во внешнюю). Если же магнитное поле совсем не будет ослабевать или даже будет возрастать с радиусом, то станет велика радиальная устойчивость. «Магнитные стены» будут стоять с внутренней и внешней сторон орбиты. При этом пропадет вертикальная устойчивость: частицы будут ударяться о дно и крышку ускорительной камеры. Поистине получается: хвост вытацишь — нос увязнет, нос вытацишь — хвост увязнет. Точный расчет показывает, что заряженные частицы будут удерживаться на орбите по оси ускорительной трубки-баранки только в том случае, если напряженность магнитного поля от внутренней части баранки к внешней будет слегка ослабляться. Важно подчеркнуть, что магнитное поле ослабляется именно слегка*.

При соблюдении этих условий заряженные частицы будут подобно «ваньке-встаньке» стремиться к устойчивому состоянию, совершая затухающие колебания из

* Закон изменения напряженности магнитного поля H с изменением радиуса R может быть выражен формулой: $H = \frac{\text{Const.}}{R^n}$

В этой формуле n так называемый показатель спада магнитного поля. Если n равно нулю, то $R^n = 1$, и магнитное поле вообще не изменяется с радиусом. Чтобы обеспечить вертикальную устойчивость (вертикальную фокусировку), необходимо, чтобы $n > 0$. Для горизонтальной же устойчивости (радиальной фокусировки) необходимо, чтобы $n < 1$. Устойчивость на орбите и от боковых и от вертикальных отклонений будет получена при условии: $0 < n < 1$. Обычно n может быть от 0,4 до 0,7.

стороны в сторону от устойчивой (так называемой равновесной) орбиты, а также взад и вперед по ней.

Вакуумная камера должна быть достаточно большого сечения, чтобы дать свободу этим колебаниям. В синхрофазотронах ширина камеры достигает почти одного метра, а высота ее около 20 сантиметров. Нужен огромный электромагнит, чтобы пронизать лесом магнитных силовых линий всю такую камеру.

Заметим, что в линейных резонансных ускорителях очень трудно увязать устойчивость от боковых отклонений (фокусировку) с устойчивостью на волне (автофазировкой). Это одна из причин, почему преимущественное развитие получили циклические ускорители.

Когда были запущены первые синхрофазотроны, позволившие сообщать частицам энергии больше миллиарда электровольт, физики стали размышлять о том, как создать для штурма атомного ядра частицы с еще большими энергиями. Один из путей — это уменьшить размеры ускорительной камеры.

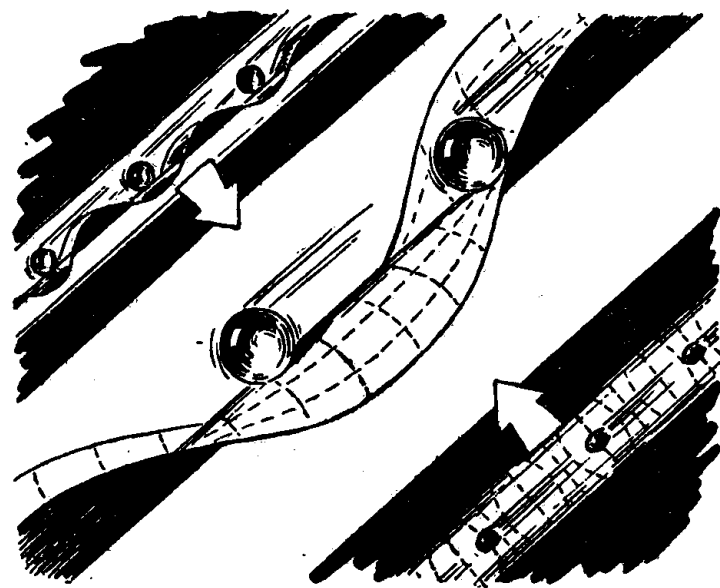
СИЛЬНАЯ ФОКУСИРОВКА

Чем устойчивее движение ускоряемых заряженных частиц, тем меньше могут быть поперечные размеры ускорительной вакуумной камеры. Тем дешевле будут стоить и эта камера и кольцевой электромагнит.

Многие ученые задумывались над тем, как увеличить магнитные силы, обеспечивающие устойчивость движения заряженных частиц. Когда «магнитные стены» с двух сторон сжимают — фокусируют — поток заряженных частиц, то этот поток неизбежно расширяется, разбегается в вертикальном направлении (вверх и вниз). А при сжатии потока по вертикали — «магнитными полом и потолком» — происходит расползание заряженных частиц в стороны.

Первый, кто обратил внимание на возможность всестороннего обжатия потока заряженных частиц, был, видимо, инженер-электротехник из Афин Николай Кристофилос. Он частным образом, за свой счет, издал в 1950 году работу — «Система фокусировки ионов и электронов и ее применение в магнитных ре-

зонансных ускорителях». В 1952 году, независимо от греческого инженера, решение проблемы сильного обжатия — сильной фокусировки — потока заряженных частиц было дано группой американских ученых. Интересный вклад внесли в решение этой проблемы и советские ученые: Петухов, Рабинович, Коломенский.



Желоб с переменной кривизной — механическая аналогия системы сильной фокусировки потока заряженных частиц при помощи магнитного поля переменной интенсивности.

Суть сильной, или, как ее еще называют, жесткой, острой, строгой фокусировки заключается в применении ряда магнитов, которые своим полем попеременно сжимают поток заряженных частиц то по вертикали, то по горизонтали. В этих магнитах делают очень большой коэффициент спадения магнитного поля n^* .

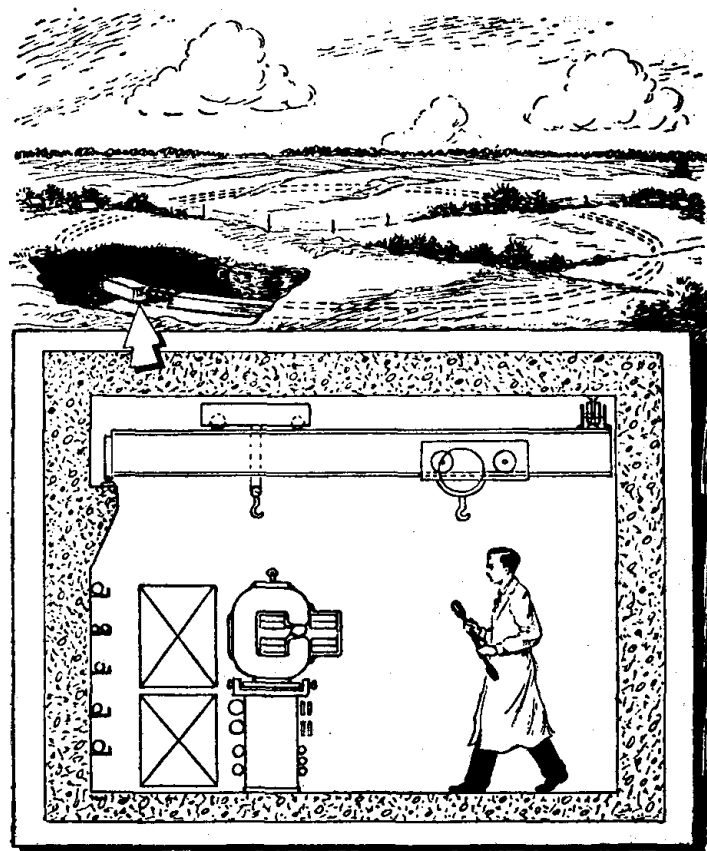
* Выбирают n не меньше 1, как в обычных синхрофазотронах со слабой (мягкой) фокусировкой, а порядка 100.

На одних участках магнита n положительно: магнитное поле резко падает с увеличением радиуса. На этих участках происходит резкая горизонтальная фокусировка, но зато поток частиц расплывается вверх и вниз. На других участках магнита n отрицательно — напряженность магнитного поля резко возрастает с увеличением радиуса. Здесь поток фокусируется по вертикали и несколько расплывается в стороны. Оказывается, что при такой форме магнитного поля расплывание заряженных частиц по всем направлениям будет меньше, чем их сжатие. Заряженные частицы совершают при этом колебания с большей частотой и меньшими отклонениями от намеченного пути, чем в слабо неоднородных полях обычных синхротронов.

Можно представить механическую аналогию системы сильной фокусировки в виде желоба с переменной кривизной. (Это будет аналогия только для одной степени свободы движения заряженной частицы.) Такой желоб состоит из последовательных участков, обращенных вверх то выпуклостью, то вогнутостью. По такому желобу можно скатывать шары так, что движение их будет устойчивым. При достаточной скорости шары пролетают по гребням выпуклых участков желоба, не успевая свалиться с них ни вправо, ни влево.

Принцип сильной фокусировки позволяет в несколько раз уменьшить сечение кольцевого магнита циклического ускорителя. В обычных синхрофазотронах с мягкой (слабой) фокусировкой ширина вакуумной камеры достигает 10 процентов радиуса орбиты. Предполагают, что в ускорителях с жесткой фокусировкой размеры камеры удастся уменьшить до 0,1 процента радиуса орбиты. Это значительно снизит вес магнита и позволит уменьшить мощность, потребную для его питания. Ожидается, что по сравнению с обычными конструкциями электронных и протонных циклических ускорителей ускоритель с сильной фокусировкой позволит при одних и тех же затратах получить частицы с энергией, в несколько раз большей.

Но ничто даром не дается. Сужение «беговой до-



Синхрофазотрон с сильной фокусировкой. Вверху — кольцевой тоннель. Внизу — сечение тоннеля. Между полюсами С-образного электромагнита расположена ускоряющая вакуумная камера небольшого сечения. Электромагнит составлен из отдельных пластин, концы которых скошены попеременно то к внутренней, то к внешней стороне.

рожки» требует повышения точности ее изготовления. Вакуумная камера-баранка должна лежать строго в одной плоскости. Точность должна быть такова, что необходимо уже принимать в расчет кривизну Земли.

Артиллеристы иногда измеряют дальность стрельбы

в тысячных долях дистанции. Точность в одну тысячную означает, что при стрельбе, скажем, на расстояние в 10 километров отклонение от намеченной точки не будет превышать 10 метров. В ускорителях с острой фокусировкой заряженные частицы должны пробежать путь до миллиона километров и не отклониться от намеченной орбиты более чем на один сантиметр.

Во многих лабораториях уже построены модели ускорителей с сильной фокусировкой. Еще более грандиозные ускорители проектируются и строятся. На странице 71 показан один из проектов.

В СССР разработан проект ускорителя на 50—60 миллиардов электроновольт. Длина окружности вакуумной камеры этого ускорителя будет достигать 1,5 километра. Кольцевой электромагнит будет состоять из 120 отдельных секций.

Вблизи Женевы идут работы по сооружению синхрофазотрона на 25 миллиардов электроновольт. В кольцевой траншее длиной свыше 600 метров будет расположен электромагнит и ускорительная трубка. Фундамент тоннеля женевского ускорителя ионов пронизан целой системой труб, по которым должна непрерывно циркулировать вода, чтобы поддерживать с точностью до одного градуса постоянную температуру всего сооружения. Строительство этого ускорителя предполагается закончить в 1960 году.

СВЕРХВЫСОКИЕ ЭНЕРГИИ

Несколько миллиардов электроновольт — такова достигнутая в современных ускорителях энергия заряженных частиц. Но в космических лучах встречаются частицы с энергией, в миллионы раз более высокой. Возможно ли будет когда-либо получить такие «сверхэнергичные» частицы при помощи ускорителей?

В современных циклических ускорителях с кольцевым магнитом радиус магнита и лежащей между его полюсами вакуумной ускорительной камеры растут пропорционально энергии частиц (при данной напряженности H поля магнита). Если при энергии в 10^{10} электроновольт радиус магнита может быть порядка,

скажем, 6 метров, то при энергии 10^{16} электроновольт радиус магнита должен быть равен 6 тысячам километров, то есть радиусу земного шара. Вакуумная камера такого ускорителя должна опоясать Землю по большому кругу.

Можно уменьшить размеры циклического ускорителя, если увеличить напряженность магнитного потока, пронизывающего ускорительную камеру. Стальные сердечники хорошо ведут себя при магнитной индукции до 15 тысяч гаусс. Дальше наступает насыщение. Существуют проекты бессердечниковых магнитов, позволяющих получить более высокие индукции. Упомянутый выше профессор Олифант, работающий в настоящее время в Австралии, предложил конструкцию безжелезного ускорителя, в котором индукция должна достигать 100 тысяч гаусс. Максимальное значение токов в обмотке магнита этого ускорителя около 1,5 миллиона ампер! Между проводниками обмотки возникают электродинамические усилия порядка 18 т на каждый погонный сантиметр длины обмотки. Обмотка должна питаться от специальных генераторов постоянного тока (униполярных генераторов), роторы которых для уменьшения потерь на трение вращаются в атмосфере водорода.

Ускоритель Олифанта будет иметь радиус 3,6 метра и сможет давать импульс не чаще, чем раз в 10 минут. Максимальная же энергия частиц будет не выше, чем в проектах ускорителей с сильной фокусировкой.

Пока не видно путей к тому, как получить еще большие напряженности магнитных полей при помощи обмоток, сделанных из медных, алюминиевых или серебряных проводников.

ПУСТОТА СЛУЖИТ ОБМОТКОЙ

Осенью 1941 года вокруг Ленинграда сомкнулось кольцо блокады. На заводе «Светлана» (об этом заводе уже упоминалось выше в связи с опытами по линейным резонансным ускорителям) оказалось много незагруженного высокочастотного оборудования. Я воспользовался им, чтобы провести давно задуманные

опыты с токами, индуктированными в газовой среде. Удалось создать высокочастотные трансформаторы, вторичной обмоткой которых служили не витки проволоки, а кольцо ионизованного газа. В это кольцо, свободно парящее в воздухе, подобно кольцу дыма, какие любят пускать опытные курильщики, удавалось вводить токи в сотни ампер и мощности в сотни киловатт. До этого никто не работал с такими мощными безэлектродными электрическими разрядами. Наше кольцо ионизованного газа испускало столько света, что в ясный день давало тень против солнца. При некоторых условиях кольцо стягивалось в огненный комочек, подобный шаровой молнии. В этом безэлектродном электрическом пламени «горел воздух», то есть кислород и азот энергично соединялись, образуя бурные удушливые газы. Возникли идеи: применить такой электрический разряд для различных электрохимических производств, в частности для получения азотной кислоты.

Но тем временем положение в Ленинграде становилось все более тяжелым. Усилился обстрел города, прекратилась подача электроэнергии, на заводе перестало действовать отопление, и опыты с высокочастотными установками, естественно, прекратились. Некоторые данные об этих работах были опубликованы в 1942 году.

После окончания войны результаты наших опытов оказались полезными при проектировании и расчете новых типов высокочастотных устройств для промышленного нагрева. Нам удалось построить трансформаторы со вторичной обмоткой из стекла, которое, как известно, в обычном состоянии является изолятором. Высокочастотные трансформаторы со «стеклянными обмотками» были использованы в качестве печей. Такие печи, в которых стекло плавится индуктированными вихревыми токами, сейчас работают на отечественных заводах. В них получают особо чистое, высококачественное стекло.

В связи с развитием циклических ускорителей у советского ученого Г. И. Будкера возникла идея применить кольцевой безэлектродный разряд в пустоте

для создания сверхмощных магнитных полей, которые могли бы направлять сгусток ускоряемых заряженных частиц. Г. И. Будкером был проведен ряд интересных опытов и расчетов.

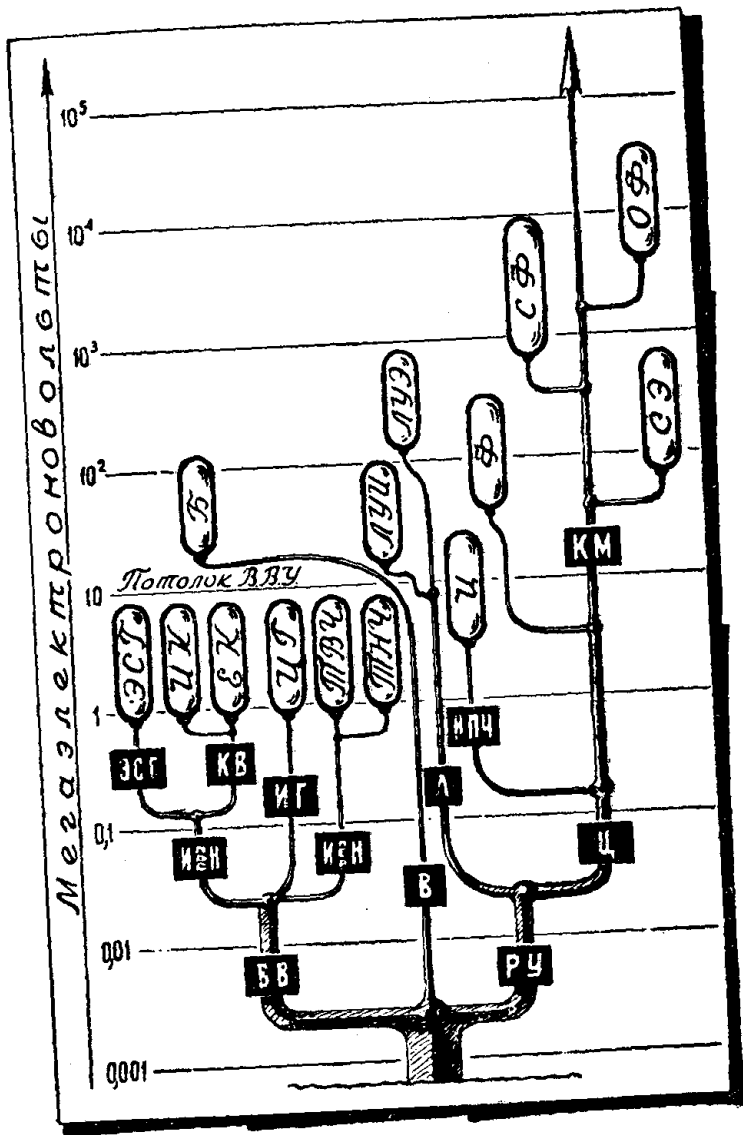
Известно, что вокруг замкнутого электронного луча возникает магнитное поле, которое стремится стянуть этот луч в возможно более тонкую нить. При некоторых условиях плотность тока в луче может достигнуть сотен тысяч ампер на квадратный миллиметр поперечного сечения луча. Напряженность магнитного поля вблизи поверхности электронного луча будет в несколько раз больше, нежели в гигантских катушках Олифанта. Многие здесь все же еще неясно. Есть опасения, что такой луч может начать изгибаться, змеиться. Во всяком случае, до сих пор еще неизвестны разработанные конструкции ускорителей с таким замкнутым электронным лучом.

«ДУЭЛЬ» УСКОРИТЕЛЕЙ

Американский физик Керст, который построил первый работающий бетатрон, высказал идею: устроить «дуэль» двух ускорителей и столкнуть встречные потоки заряженных частиц. Если это два ускорителя на энергии в десятки миллиардов электроновольт, то эффект встречного столкновения будет такой же, как при ударе о неподвижную мишень потока заряженных частиц, ускоренных до энергий в тысячу миллиардов электроновольт. Но можно ли практически осуществить такое столкновение? Какова его вероятность?

Высказывались идеи о переносе опытов по ускорению заряженных частиц в космические просторы. Предполагалось создавать в высоком вакууме мирового пространства потоки заряженных частиц, управлять этими потоками при помощи искусственных спутников, которые, в свою очередь, должны получать управляющие команды с наземных станций и передавать на эти станции данные об опытах.

Множество остроумных специальных деталей привлекает внимание во все новых проектах ускорителей, публикуемых в печати.



Ускорители заряженных атомных частиц.
Разнообразные типы ускорителей показаны в виде ответвления.

ний от общего ствола. Горизонтальные линии отмечают уровни энергии в миллионах электроновольт (Мэв).

Слева сгруппированы ускорители прямого действия. Эта ветвь обозначена буквами «ВВ» — высоковольтные установки. Во всех этих установках энергия частиц прямо пропорциональна тому напряжению, которое фактически прикладывается к ускорительной трубке. 10 Мэв — это потолок для всех высоковольтных устройств («ВВУ»).

В ветви «ВВ» — три подразделения. Слева — «И пос. Н» — источники постоянного напряжения. Справа — «И пер. Н» — источники переменного напряжения. Между ними — «ИГ» — импульсные генераторы.

К источникам постоянного напряжения относятся электростатические генераторы — «ЭСГ» и каскадные выпрямители «КВ», которые бывают с емкостной и индуктивной связью каскадов.

Источники переменного напряжения могут работать с токами низкой частоты — «ТНЧ» и с токами высокой частоты — «ТВЧ». До напряжений порядка сотни мегавольт поднимается ветвь вихревых ускорений «В». Собственно, в этой ветви имеется единственный представитель — бетатрон, обозначенный на рисунке буквой «Б».

Вправо от общего ствола идет ветвь резонансных ускорителей — «РУ». Именно на этой ветви непрерывно возникают все новые и новые побег, стремящиеся все выше, ко все более грандиозным энергиям заряженных частиц.

Во всех типах «РУ» ускоряемые заряженные частицы многократно проходят через ускоряющие участки высокочастотного электромагнитного поля; ускорение происходит отдельными ступеньками. Высота каждой отдельной ступени невелика. Прогресс резонансных ускорителей заключался в непрерывном увеличении количества ступеней ускорения: от нескольких единиц в первых «РУ» до многих миллионов в современных резонансных устройствах.

Все «РУ» делятся на циклические «Ц» и линейные «Л». На ветви «Л» показаны два плода: «ЛУИ» — линейный ускоритель ионов и «ЛУЭ» — линейный ускоритель электронов.

На ветви циклических ускорителей самый старый побег — это циклотрон, который работает с неизменной напряженностью магнитного поля и неизменной частотой ускоряющего напряжения «ИПЧ». Больших энергий, чем циклотрон, позволил достичь фазотрон «Ф». Однако не видно путей к дальнейшей эволюции циклотронов и фазотронов. Плодоносным направлением развития являются конструкции с кольцевым магнитом «КМ».

Для ускорения электронов применяется электронный синхротрон «СЭ». Для ускорения ионов строятся приборы с кольцевым магнитом огромных размеров. Самый большой из подобных приборов — это советский синхрофазотрон «СФ».

Наиболее молодой побег на ветви «РУ» — это ускоритель с острой фокусировкой «ОФ». Ожидается, что это устройство позволит получить частицы с энергиями в несколько десятков миллиардов электроновольт.

Можно любоваться этими проектами, как мы любуемся прекрасными произведениями живописи и скульптуры, с той, правда, разницей, что в области ускорителей все очень быстро выходит из моды. То, что вчера казалось новым и оригинальным, назавтра сдается в архив.

История ускорителей заряженных частиц не насчитывает и трех десятилетий. За этот срок достижимые энергии выросли от долей мегаэлектронвольта до тысяч мегаэлектронвольт. Примерно каждые 6 лет достижимые энергии увеличивались в 10 раз. Это можно видеть из представленного на странице 76 родословного древа «семейства ускорителей».

Одна мысль в истории развития ускорителей должна быть подчеркнута. Чем большую энергию требуется получить, тем больше ступеней ускорения должен пройти сгусток частиц, тем дольше продолжается игра электромагнитных волн и заряженных частиц и тем меньше остается к концу цикла ускорения уцелевших, накопивших энергию частиц*. Это дало повод для шутки, что со временем появятся ускорители, которые будут давать одну частицу сверхвысокой энергии в неделю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физику атомного ядра иногда сравнивают с астрономией. Исследуемые этими науками объекты находятся на противоположных концах «шкалы длин». Но и для изучения мельчайших деталей микромира и для проникновения в дали космоса необходима аппаратура гигантских размеров.

Успехи астрономии основаны на использовании мощных телескопов. От подзорной трубы Галилея с линзами диаметром в несколько сантиметров до современного телескопа-рефлектора с пятиметровым зеркалом — таков путь совершенствования астрономической аппаратуры.

* Напомним, что бетатрон дает 50 порций ускоренных частиц в секунду, существующие синхрофазотроны — одну порцию в несколько секунд, а безжелезный синхрофазотрон Олифанта — одну порцию ускоренных частиц в несколько минут.

Попытки еще дальше продвинуться по пути увеличения размеров телескопов для световых лучей наталкиваются на почти непреодолимые трудности; здесь и неустранимые деформации инструмента и влияние земной атмосферы. Современная астрономия ищет новые пути. Например, развивается радиоастрономия, в которой используются электромагнитные волны в десятки тысяч и даже в миллионы раз более длинные, нежели световые. Длинные волны позволяют применять воспринимающие поверхности больших размеров. Есть проекты радиотелескопов с диаметром «зеркала» порядка сотни метров.

Физики, работающие над проблемами ускорения заряженных частиц, вряд ли могут сегодня ответить на вопрос, когда же остановится стремительное развитие ускорителей на все большие энергии? Одно можно сказать: техника не пойдет по пути простого увеличения размеров современных приборов.

В XVII веке в Версале — резиденции французского короля Людовика XIV — была построена насосная станция для приведения в действие фонтанов в парке. Она считалась в то время величайшим инженерным сооружением, одним из чудес мира. Версальская насосная станция занимала площадь в несколько гектаров, королева мысли насосов были сделаны из вековых сосен. И вся эта громоздкая «машинерия» развивала мощность менее 100 киловатт, то есть меньше, чем средних размеров насос современной пожарной машины.

Быть может, так же громоздко и неуклюже будут выглядеть, по сравнению с физическими приборами будущего, наши современные грандиозные ускорители.

Все глубже становится наше познание вещества, все новые и новые способы перестройки материи находят человек. И нет предела в познании и обладании веществом.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Снаряды для обстрела атомов	6
Гонки в безвоздушном пространстве	13
Магнитное управление	14
«Электрические горы»	16
Молния	18
Перенос зарядов на ремнях	19
Каскады	21
Удар работает	26
Высокие энергии без высоких напряжений	27
Вихрь вместо горы	30
Бетатрон	32
Принцип отзывчивости	34
Океан и линейный ускоритель	37
Еще о работе удара	39
«Ядерная дробилка» тридцатых годов	42
Снова об отзывчивости	48
Циклотрон с переменной частотой — фа- зотрон	49
Кольцевой магнит	51
Циклический ускоритель электронов — син- хротрон	53
Положительные ионы на кольцевых ор- битах	56
Завод космических частиц	57
Об устойчивости	64
Устойчивость на волне	65
Устойчивость на орбите	66
Сильная фокусировка	68
Сверхвысокие энергии	72
Пустота служит обмоткой	73
«Дуэль» ускорителей	75
Заключение	78