



ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ
ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ
ЗНАНИЙ

ДОКТОР ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК
М. С. РАБИНОВИЧ

УСКОРИТЕЛИ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Серия VIII
№№ 5, 6

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва — 1957

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

Доктор физико-математических наук
М. С. РАБИНОВИЧ

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва



1957

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение	3
Некоторые закономерности движения частиц в магнитном поле	6
Циклотрон	8
Устойчивость движения	11
Как увеличить предел достижимых энергий	14
Принцип автофазировки	15
Фазотрон	16
Синхрофазотрон. Описание принципа работы.	18
Синхрофазотрон на 10 000 мэв	22
Синхротрон и бетатрон — ускорители электронов	25
Синхротрон	28
Предельная энергия в автофазирующих ускорителях	30
Сильная фокусировка	33
Кольцевой фазотрон	35
Линейные резонансные ускорители	37
Электронные линейные ускорители	40
Можно ли повысить предел энергии в циклотроне без использования принципа автофазировки	42
Поиски новых методов ускорения	43
Когерентный метод ускорения пучков частиц В. И. Векслера	44
Релятивистский стабилизированный электронный пучок Г. И. Будкера	45
Литература	47



Введение

В результате совместной работы ученых многих стран, проделанной за несколько последних десятилетий, удалось проникнуть в тайны микромира атома. Понадобился сравнительно короткий срок, чтобы наука получила первые весьма существенные данные об атоме.

Гораздо более сложной задачей оказалось найти способы воздействия на ядро. Только после решения этой задачи открылись возможности более глубоко понять строение атомного ядра, получить представление о его структуре и природе внутриядерных сил.

Разработка методов воздействия на ядро началась еще в условиях небольших лабораторий и физических кабинетов, в которых исследователи использовали примитивные, по современным представлениям, приборы, а также частицы, испускаемые естественными радиоактивными элементами. Однако скоро стало ясно, что такой путь сильно ограничивает возможности экспериментатора. Тогда в арсенал исследователя начали входить новые технические средства, созданные в процессе быстрого развития электротехники, энергетики, радиотехники и электроники.

Атомная физика вышла из стен маленьких лабораторий, кабинетов и мастерских. На помощь ученым пришли инженеры. Постепенно крупные установки весом в сотни, тысячи и десятки тысяч тонн, занимающие обширные пространства, заменили скромные лабораторные приборы.

С помощью этих установок физики получили возможность регистрировать мельчайшие частицы материи, управлять их движением на пути, превышающем по длине расстояние от Земли до Луны, воспроизводить явления, ранее наблюдавшиеся только в мировом пространстве.

Наиболее мощным средством научного исследования ядра явились ускорители — крупные инженерные сооружения, с помощью которых удалось получить мощные потоки мельчайших заряженных частиц: электронов, протонов, ядер или ионов легких элементов — гелия, углерода, азота, кислорода.

Источники ионов или электронов испускают частицы с небольшими энергиями. В численных расчетах можно приближен-

но считать эту энергию равной нулю. Обычно энергию атомных частиц измеряют в специальных единицах — электронвольтах (*эв*). Электронвольт—это энергия, которую получает электрон, пройдя электрическое поле с разностью потенциалов в один вольт. Введение этой единицы энергии целесообразно потому, что электрический заряд всех атомных частиц равен (по абсолютной величине) или кратен заряду электрона, а ускорение происходит только под действием электрического поля, разность потенциалов которого измеряют в вольтах. Величина энергии определяется произведением заряда (измеренного в числе зарядов электрона) и разности потенциалов (измеренной в вольтах), пройденной частицей.

Энергия 1 *эв* по масштабам обыденной жизни очень мала. Она равняется примерно одной биллионной доли *эрга*. Но в микромире атомов и молекул эта величина не является малой. Энергией 1 *эв* обладают атомы и молекулы вещества, нагретого до температуры 10 000°. Вспомним, что кинетическая энергия равна $\frac{mv^2}{2}$. Так как масса *m* атомных частиц чрезвычайно мала,

то уже при энергии, равной нескольким *эв*, они движутся с большими скоростями *v*, недоступными даже современной артиллерии.

В радиолампе источником электронов является накаливаемая нить — катод. Электроны ускоряются электрическим полем, существующим между катодом и анодом. Если между анодом и катодом радиолампы была разность потенциалов 100 вольт, то энергия электронов, падающих на анод, равна 100 электронвольтам (сокращенно 100 *эв*).

Электронная лампа является ускорителем электронов до энергии в несколько сот *эв*. В кинескопе телевизоров электроны ускоряются до энергии 10 000 *эв* (10 килоэлектронвольт, сокращенно 10 *кэв*). В рентгеновской трубке электроны ускоряются до нескольких десятков *кэв*. Аналогичным способом можно ускорять до таких же энергий и ионы различных элементов.

Таким образом, ускорение частиц до энергии в несколько десятков *кэв* не представляет трудностей для современной техники.

Однако для ядерной физики такие небольшие энергии не представляют интереса. Для того чтобы протоны эффективно проникали внутрь атомного ядра и вызывали ядерные реакции, позволяющие судить о структуре ядра, они должны иметь энергию по крайней мере в 1 млн. электронвольт (*мэв*), а желательно еще большую энергию.

Для изучения ядерных сил необходимы π -мезоны, частицы с массой, примерно в 280 раз большей, чем электроны, „ответственные“ за ядерные силы. Интенсивные пучки π -мезонов можно получить при помощи протонов и электронов с энергией в сотни *мэв*.

Для того чтобы понять строение „элементарных“ (а на самом деле весьма сложных) частиц: протонов, нейтронов, выяснить роль многих нестабильных частиц: тяжелых мезонов, гиперонов, и составить представление о законах микромира (еще весьма поверхностное), необходимо использовать для опытов частицы с энергией в миллиарды и десятки миллиардов эв.

Как же создать колоссальные напряжения в сотни миллионов вольт для ускорения электронов или ионов до десятков, сотен или даже тысяч мэв? Может быть, можно ускорять частицы до больших энергий без применения сверхвысокого напряжения?

Быстрые частицы с энергией в несколько мэв можно получить без всяких ускорителей. Они испускаются радиоактивными элементами. Еще в начале XX века выдающийся английский физик Резерфорд использовал такие „естественные“ частицы с большой энергией.

Направляя поток α -частиц (ядра атома гелия) на слой вещества, Резерфорд в 1919 году обнаружил превращение атомов азота в кислород. На каждый миллион α -частиц было зарегистрировано 20 превращений. Эти опыты имели выдающееся значение для развития ядерной физики. Однако вскоре стало ясно, что применение радиоактивных препаратов неудобно из-за малой интенсивности энергии α -частиц. Кроме того, для точных экспериментов необходимы разные частицы: протоны, дейтоны, электроны с большей регулируемой энергией.

Примерно с 1920 по 1930 год основные усилия ученых были направлены на создание высоковольтных установок для получения протонов и электронов с большой энергией и интенсивностью пучка.

В начале 30-х годов удалось создать такие установки с разностью потенциалов 1—2 млн. вольт. Кокрофт и Уолтон, используя высоковольтную установку в 1932 году в Кэвендишской лаборатории (Кэмбридж, Англия), впервые осуществили ядерную реакцию с ускоренными частицами, расщепив протонами с энергией 0,7 мэв ядра лития.

Существенным шагом вперед было изобретение в 1930 году электростатического генератора Ван-де-Граафа. Этот генератор позволил полностью освоить область энергий 1—2 мэв.

Генераторы Ван-де-Граафа непрерывно совершенствуются. В настоящее время в них удалось ускорить протоны до энергии 8,5 мэв. Практически же установка Ван-де-Граафа удобна для получения заряженных частиц с энергией до 2—4 мэв.

Применение высоких напряжений вызвало необходимость в создании такой ускорительной трубки, в которой не возникали бы пробой. Трудности, связанные с изоляцией и ликвидацией электрического пробоя, поставили предел для ускорения в электростатическом поле электронов или протонов до энергий, превышающих несколько мэв.

Еще до того как удалось создать колоссальные постоянные разности потенциалов, были предложены методы ускорения, при которых частица набирает энергию постепенно, проходя многократно относительно небольшую разность потенциалов. В этом случае ускоряющее электрическое поле не должно быть статическим, так как в электростатическом поле приобретенная энергия зависит не от пути частицы, а только от разности потенциалов в начальной и конечной точках траектории. Поэтому сколько раз мы ни пропускали бы частицу через электростатический ускоритель, энергия ее в конце концов останется такой же, как и при первом прохождении. В переменном же электромагнитном поле частица, двигаясь по одной и той же круговой траектории, непрерывно увеличивает свою энергию. Таким образом, если мы хотим ускорять частицы до больших энергий, используя небольшие (по амплитуде) разности потенциалов, то следует производить ускорение в переменном электромагнитном поле.

В 1930 — 1932 годах американский ученый Э. Лоуренс построил ускоритель — циклотрон, в котором при относительно небольшой амплитуде переменной разности потенциалов удалось ускорить протоны, дейтоны, α -частицы до энергии в несколько *мэв*, а затем и несколько десятков *мэв*. Можно считать, что история ускорителей начинается с циклотрона.

Некоторые закономерности движения частиц в магнитном поле

Для того чтобы понять принцип работы циклотрона, надо знать некоторые закономерности движения ионов в магнитном поле. На ион в магнитном поле действует так называемая сила Лоренца, всегда перпендикулярная к направлению магнитного поля и скорости частицы. Следовательно, сила Лоренца не совершает работы и не может изменить величину скорости иона; она лишь смещает направление скорости. Действие силы Лоренца напоминает действие нити на привязанный к ней шар, вращающийся по окружности. Центробежная сила, действующая на шар со стороны натянутой нити, не совершает работы, а лишь изменяет направление скорости шара.

Сила Лоренца равна:

$$F_{\text{л}} = \frac{e}{c}(vH),$$

где e — заряд, c — скорость света, H — напряженность магнитного поля, а v — проекция скорости частицы на плоскость, перпендикулярную к направлению H .

Если магнитное поле постоянно, то ион будет двигаться по окружности. Радиус окружности R_0 определяется из усло-

вия, что центробежная сила $\frac{mv^2}{R_0}$ (m — масса частицы) равняется центростремительной силе Лоренца:

$$\frac{mv^2}{R_0} = \frac{e}{c} vH,$$

отсюда

$$R_0 = \frac{mcv}{eH}.$$

Замкнутую траекторию частиц в магнитном поле принято называть орбитой. Радиус орбиты R_0 пропорционален скорости v иона, следовательно, период обращения по окружности:

$$T = \frac{2\pi R_0}{v} = \frac{2\pi mc}{eH}$$

не зависит от скорости.

Приведенные формулы являются основными и в сущности единственными, которыми мы будем пользоваться для объяснения принципа работы почти всех ускорителей.

Ниже неоднократно рассматривается зависимость радиуса орбиты, по которой обращается ион в магнитном поле, от массы и скорости частиц и от величины напряженности магнитного поля. Радиус орбиты растет пропорционально произведению скорости частицы v и массы m (т. е. пропорционально импульсу $P=mv$) и обратно пропорционально значению напряженности магнитного поля H . Период обращения пропорционален отношению массы m к напряженности магнитного поля H и не зависит явно от скорости.

В таблице 1 приведены значения радиусов орбит и периодов обращения атомных частиц, имеющих разную энергию, в магнитном поле 10 000 эрстед. Пользуясь тем, что радиус и период обращения обратно пропорциональны напряженности магнитного поля, можно по этой таблице найти их значения при любой другой величине поля.

Таблица 1

Радиус окружности R_0 (в метрах), по которой обращаются электроны, протоны, дейтоны, α -частицы в магнитном поле 10 000 эрстед; период обращения T (в миллимикросекундах)

Энергия (в $M\text{Эв}$)	Электроны		Протоны		Дейтоны		α -частицы	
	R_0	T	R_0	T	R_0	T	R_0	T
1	0,005	0,105	0,144	65,6	0,204	131,0	0,144	130,4
10	0,035	0,733	0,457	66,2	0,646	131,6	0,454	130,6
100	0,334	6,99	1,48	72,5	2,06	138	1,45	135
1000	3,33	69,8	5,64	135	7,25	200	4,85	165
10000	33,3	698	36,3	763	39,0	829	22,0	479

Как видно из таблицы 1, при небольших энергиях радиус и период обращения электронов значительно меньше, чем аналогичные величины для протонов, масса которых в 1840 раз больше массы электронов. Но при очень больших энергиях указанные величины сближаются. Это связано с интересным эффектом, предсказанным задолго до создания современных мощных ускорителей. То, что в обыденной жизни принято называть массой, на самом деле, согласно теории относительности, является массой покоя. При возрастании скорости частиц их масса сначала медленно, а затем все быстрее (по мере приближения к скорости света) возрастает. Массу покоя обозначим m_0 (в отличие от полной массы m). Каждой массе соответствует энергия. Массе m_0 соответствует энергия покоя E_0 :

$$E_0 = m_0 c^2.$$

Для различных частиц эта энергия равна:

электроны —	0,511	мэв
протоны —	938,1	»
дейтоны —	1875	»
α -частицы —	3723	»

Полная энергия частиц E равняется сумме энергии покоя E_0 и кинетической энергии W .

При сверхбольших энергиях кинетическая энергия W становится значительно больше энергии покоя E_0 , и в расчетах последней можно пренебречь. Поэтому протоны и электроны с одной и той же кинетической энергией обращаются по почти одинаковым орбитам с почти одинаковым периодом обращения. Приблизительно можно считать, что частицы начинают двигаться одинаково почти со скоростью света, когда их кинетическая энергия становится в 2—3 раза больше энергии покоя. Поэтому электроны уже при энергии 2 мэв двигаются почти со скоростью света, а с протонами это происходит при энергии 4000 мэв. Это обстоятельство будет для нас в дальнейшем весьма существенным.

Циклотрон

Магнитное поле не производит ускорения. Оно управляет движением частиц, заставляя их многократно проходить через ускоряющий электрод. Как устроены ускоряющие электроды циклотрона? Представим себе невысокую цилиндрическую тонкостенную металлическую коробку, разрезанную пополам по диаметру. Между двумя половинками коробки (названными дуантами) создается переменная разность потенциалов (рис. 1). Электрическое поле возникает лишь в щели между дуантами и не проникает внутрь дуантов, так же как внутрь металлического тела (вспомним свойства металлического экрана). Для определения ускорения иона надо знать величину и направление электри-

ческого поля только в те моменты, когда ион находится в щели между дуантами.

Электромагнит циклотрона постоянного тока имеет круговой зазор радиусом 0,5 — 1,5 м и высотой 20 — 50 см. В зазор помещена вакуумная камера с боковыми стенками из немагнитного материала. В камере поддерживается давление порядка 10^{-5} мм ртутного столба, чтобы ускоряемые частицы при движении не сталкивались часто с молекулами газа. В камеру помещают дуанты. Ионы образуются в центре камеры, в дуге, горящей в пространстве между дуантами. Совершая движение в магнитном поле по окружности, ионы дважды за оборот через одинаковые промежутки времени $\frac{T}{2}$ проходят щель между дуантами. Ускорится ион или замедлится в щели — зависит от того, совпадает ли направление электрического

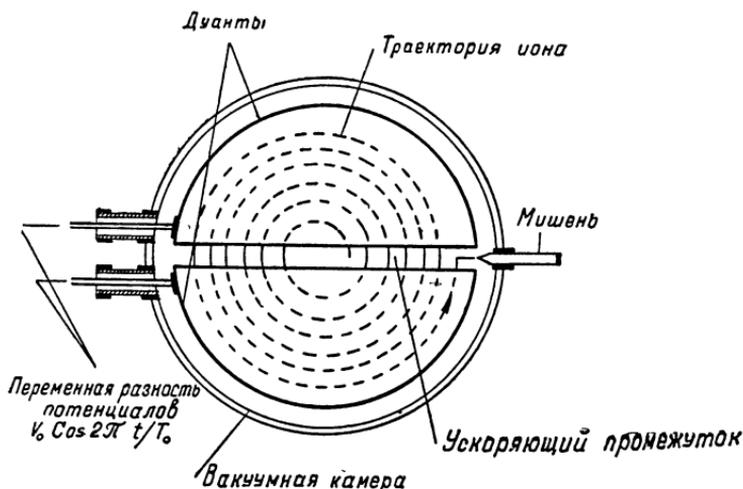


Рис. 1. Схема процесса ускорения иона в циклотроне.

поля с направлением движения иона или противоположно ему. Если период изменения напряжения между дуантами T_0 равен периоду обращения T , то каждый раз в моменты прохождения щели ионом разность потенциалов между дуантами будет иметь одно и то же значение, а направление электрического поля меняется, так как интервал между двумя прохождением равен $\frac{T_0}{2}$, а не T_0 . Но и при вращении ион проходит щель в разных направлениях: один раз от первого дуанта ко второму, а затем от второго к первому и т. д. (рис. 1).

Таким образом, если в начальный момент ион попадает в щель между дуантами, когда электрическое поле направлено вдоль движения, он ускорится и будет ускоряться при всех последующих прохождении щели, до тех пор, пока это позволят размеры полюсов магнита (рис. 2). Движение иона и измене-

ние электрического поля происходит в резонанс, и циклотрон называется резонансным ускорителем.

Приведенное описание циклотрона сильно упрощено. Существуют две причины, которые не позволяют длительно сохранять равенство $T=T_0$ и тем самым нарушают работу циклотрона, препятствуя достижению больших энергий. Первая из них связана с ростом массы ускоряемой частицы, ограничивающим достижение больших энергий. Действительно, если период ускоряющего поля T_0 постоянен, то период обращения T увеличивается в процессе ускорения частиц.

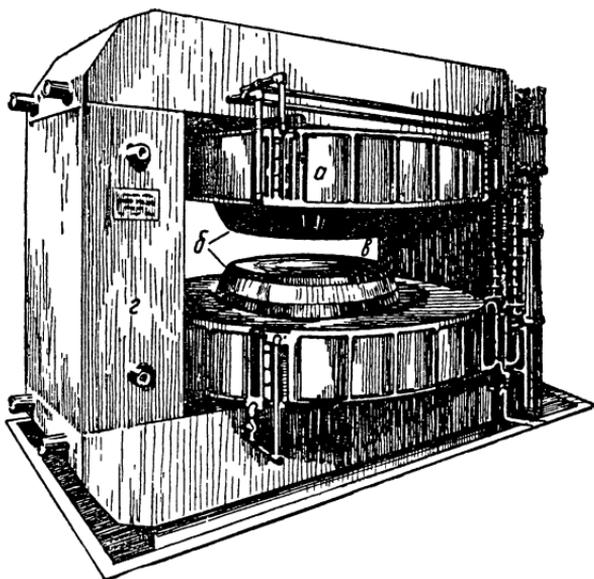


Рис. 2. Магнит циклотрона Массачусетского технологического института.

a — обмотка магнита; b — полюса магнита; g — зазор между полюсами; z — ярмо.

Период обращения в магнитном поле зависит от массы иона m . Согласно теории относительности масса зависит от скорости по следующему закону:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m_0 \frac{E}{E_0},$$

где m_0 — масса иона в покое, E — полная энергия и E_0 — энергия покоя частицы.

Пока скорость частицы v сильно отличается от скорости света c , период обращения $T = \frac{2\pi mc}{eH}$ составляет постоянную величину, примерно равную T_0 , и частица попадает в ускоряющую щель в правильные моменты времени. Но по мере роста

скорости растет масса m и период обращения T . Равенство $T = T_0$ нарушается (нарушается резонанс). Ион будет при каждом обороте запаздывать на время $\tau = T - T_0$ или на угол $360 \frac{T - T_0}{T}$ градусов.

За время $\tau = T - T_0$ разность потенциалов между дуантами изменится, поэтому изменится значение электрического поля в моменты прохождения ионом ускоряющей щели, и, наконец, ион попадет в щель между дуантами, когда там замедляющее поле.

Если подсчитать изменение электрического поля в ускоряющей щели в моменты прохождения иона, то можно определить максимальное число оборотов, после которого все ионы попадут в замедляющее поле.

В самом мощном работающем циклотроне $eV_0 = 410$ кэв (где V_0 — амплитуда разности потенциалов между дуантами) протоны совершают всего 80 оборотов. Теоретическое значение максимальной энергии в циклотроне равно:

$$W_{(\text{макс})}^{(\text{теорет})} = 4 \sqrt{\frac{eV_0 \cdot E_0}{\pi}}$$

Практически максимальная энергия, приобретаемая в циклотроне, оказывается примерно в два раза меньше теоретического значения. Это связано с тем, что для получения интенсивного пучка частиц нельзя допускать попадание всех ионов в замедляющее поле.

В рассмотренном примере $W_{\text{макс}} = 22$ мэв. Максимальная энергия в циклотроне пропорциональна $\sqrt{E_0}$, т. е. корню квадратному из массы частицы.

Таким образом, циклотрон не пригоден для ускорения электронов до больших энергий, так как собственная энергия электрона очень мала.

Предельная энергия дейтронов в циклотроне примерно на 40% больше, чем для протонов. Предельная энергия для α -частиц в $\sqrt{8}$ раз больше, чем для протона.

Создание циклотрона было замечательным успехом ускорительной техники. Впервые при расчете такого крупного инженерного сооружения пришлось пользоваться не обычной механикой, а механикой сверхбольших скоростей, разработанной в теории относительности. Успех этих расчетов явился одним из блестящих подтверждений замечательной теории А. Эйнштейна.

Устойчивость движения

Вторая причина, приводящая к изменению периода обращения T , связана с устойчивостью движения ионов.

В циклотроне частица совершает десятки, а иногда и сотни оборотов; в ускорителях других типов число оборотов возраста-

ет до миллионов. Но даже в циклотроне, где частица совершает меньше оборотов, чем в других ускорителях, процесс ускорения не может происходить, если движение неустойчиво.

Устойчивость движения обеспечивается силами магнитного поля, которые возвращают частицы на орбиту при ее случайных отклонениях. Эти силы часто называют фокусирующими. Но не всякое магнитное поле создает фокусирующие силы.

Для устойчивости движения необходимо, чтобы напряженность магнитного поля уменьшалась от центра магнита к его краю. Поскольку период обращения T обратно пропорционален напряженности магнитного поля, ионы, попадая в процессе ускорения на все большее расстояние от центра магнита, будут обращаться медленнее. Таким образом, уменьшение напряженности магнитного поля к краю магнита увеличивает период обращения.

Зависимость магнитного поля от расстояния R до центра магнита удобно записать в следующем виде:

$$H = \frac{H_0}{R^n},$$

где H_0 — постоянная величина, n — показатель магнитного поля. От значения n зависит устойчивость или неустойчивость движения. В уравнении для определения радиуса орбит $\frac{mv^2}{R_0} = \frac{e}{c} v H$ приравнены центробежная сила и центростремительная сила Лоренца. Движение по окружности происходит устойчиво, если при увеличении радиуса сверх нормального значения центробежная сила будет меньше центростремительной, так чтобы центростремительная сила могла вернуть частицу на равновесную орбиту. Наоборот, при случайном уменьшении радиуса центробежная сила должна быть больше центростремительной. Центробежная сила изменяется обратно пропорционально радиусу $\frac{mv^2}{R}$, центростремительная сила равна силе Лоренца $\frac{e}{c} v H = \frac{e}{c} v \frac{H_0}{R^n}$. Если $n < 1$, то устойчивость движения будет обеспечена, так как центростремительная сила превысит центробежную при больших радиусах (рис. 3).

Таким образом, если $n < 1$, то частица не ударится о боковые стенки камеры, а будет обращаться по равновесной орбите.

Если частица случайно сместится с равновесной орбиты, то благодаря восстанавливающей фокусирующей силе частица притянется к орбите. Во время притяжения частица получит скорость в радиальном направлении. Поэтому, попав на орбиту, она не останется на ней, а будет совершать около орбиты колебания. Они называются свободными радиальными колебаниями.

Но частица может сместиться не только вдоль радиуса, а и в вертикальном направлении в сторону полюсов магнита и, ударившись о крышку камеры, потеряться из пучка. Необходимо обеспечить устойчивость в вертикальном направлении. Оказы-

вадается, что существуют силы, которые заставляют двигаться частицу в средней плоскости между двумя полюсами магнита, если только магнитное поле спадает с ростом радиуса орбиты. Условие устойчивости в вертикальном направлении можно записать с помощью показателя магнитного поля n : $n > 0$.

Условие устойчивости в обоих направлениях равнозначно требованию, чтобы n было больше нуля и меньше единицы:

$$0 < n < 1.$$

Итак, условия вертикальной и радиальной устойчивости оказываются связанными друг с другом. Это обстоятельство является следствием общих законов электродинамики магнитного поля.

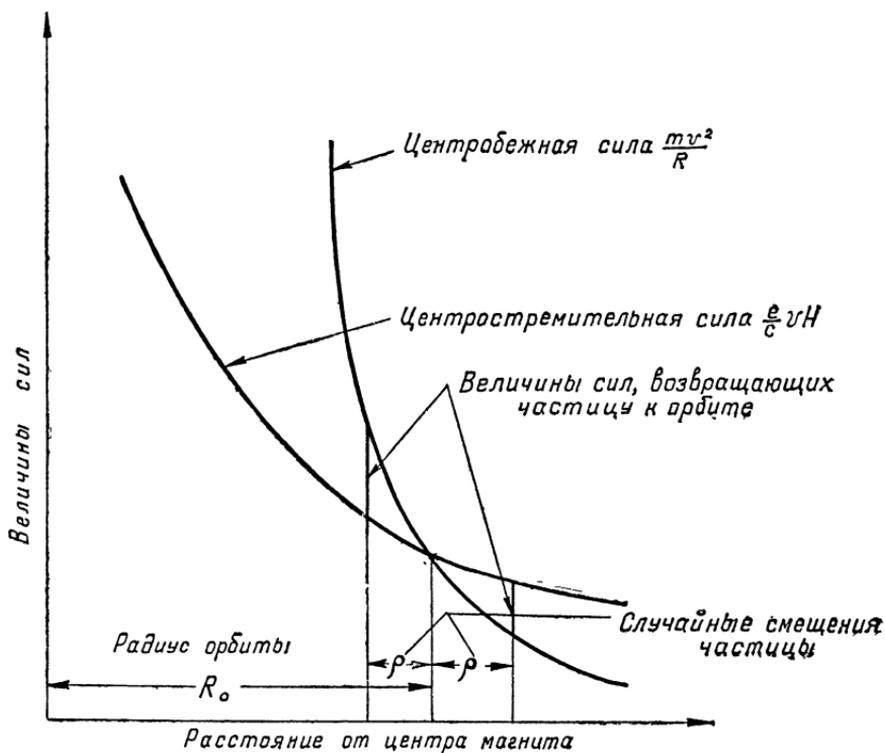


Рис. 3. Силы, действующие на ион при устойчивом движении в магнитном поле; на больших радиусах решающую роль играет центростремительная сила, на меньших — центробежная.

Вернемся к циклотрону. Для устойчивости движения в вертикальном направлении магнитное поле не должно возрастать с ростом радиуса, а желательнее, чтобы оно спадало. Но уменьшение поля увеличивает период обращения T и нарушает условие равенства его периоду T_0 ускоряющего поля, причем уменьшение H и увеличение массы m действуют в одном направлении

(т. е. увеличивают период обращения). Поэтому нельзя допускать существенного уменьшения поля циклотрона по радиусу для улучшения устойчивости. В циклотроне проблема создания вертикальной устойчивости ионов всегда была самой трудной.

Запуск циклотрона, юстировка магнитного поля представляют сложную задачу, решение которой во многом зависит от искусства экспериментатора сделать поле не очень спадающим по радиусу, так, чтобы одновременно ни на одном, даже малом участке, не было местного возрастания поля. Если поле будет сильно спадать, то ионы (из-за возрастания T) не достигнут расчетной энергии; если где-нибудь поле возрастет с ростом радиуса, то ионы из-за потери устойчивости, ударившись о крышку камеры, потеряются из пучка.

Как увеличить предел достижимых энергий

В настоящее время во всех странах мира работают более 40 циклотронов.

Между 1930 и 1940 годами циклотрон интенсивно внедрялся в физические лаборатории. Техника изготовления и наладки циклотрона была доведена до совершенства. В 1939—1940 годах в США началось строительство гигантского циклотрона, в котором надеялись получить протоны с энергией 60 *мэв* и дейтроны с энергией 100 *мэв*. Диаметр полюсов магнита составлял 4,67 *м*, вес (без медной обмотки) — 3600 *т*. Амплитуда напряжения между дуантами проектировалась равной 1—2 млн. вольт. Зазор магнита достигал 1 *м*. Однако этот ускоритель не был запущен в режиме циклотрона. Оказалось, что возможно в тысячи раз повысить предел достигаемых энергий без использования большой разности потенциалов между дуантами.

В 1944—1945 годах появились три работы советского ученого В. И. Векслера, которые ознаменовали новый этап в развитии ускорителей.

В. И. Векслером было показано, что в любом ускорителе, в котором осуществляется резонанс между движением частиц и изменением ускоряющего поля (т. е. равенство периодов обращения T и периодов изменения ускоряющего поля T_0 , как в циклотроне), имеет место явление автофазировки.

Явление автофазировки позволяет теоретически беспредельно повысить предел достижимых энергий (в этом случае предел определится лишь техническими и экономическими возможностями). Гигантский американский циклотрон, о котором говорилось выше, был переделан с использованием явления автофазировки. После этого на нем были получены в 1946 году дейтроны с энергией 200 *мэв*, α -частицы с энергией 380 *мэв*, а спустя несколько лет — протоны с энергией 350 *мэв*. Амплитуда разности потенциалов равнялась всего 15 *кв*.

Принцип автофазировки

Принцип автофазировки позволяет в ускорителях типа циклотрона сохранить примерное равенство периодов обращения T и периодов ускоряющего поля T_0 , несмотря на изменение периодов обращения из-за роста массы или из-за спадания магнитного поля к краю магнита.

Энергия ионов в циклотроне повышается до тех пор, пока они не попадут в щели в замедляющее поле. Обычно ионы выводили из камеры ускорителя до наступления этого момента. Если же ионы оставить в камере, то они будут замедляться до

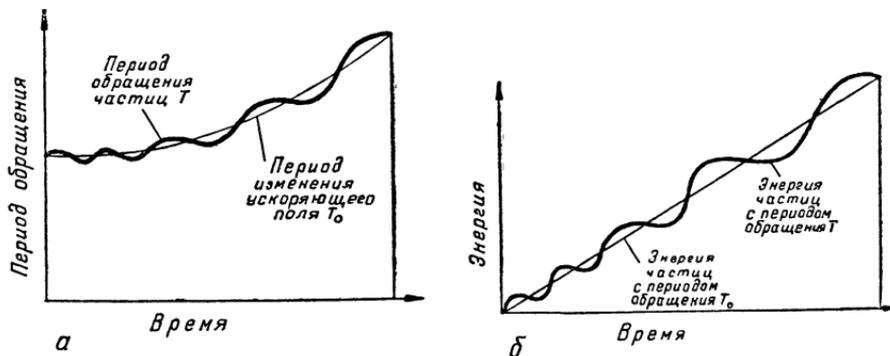


Рис. 4. *а* — колебания периода обращения частиц около значения периода ускоряющего поля T_0 в результате действия автофазировки; *б* — нарастающие энергии частиц в процессе автофазировки.

тех пор, пока их скорость не станет равной нулю. В процессе замедления накопившаяся разность периодов обращения T и изменения ускоряющего электрического поля T_0 уменьшается до тех пор, пока T и T_0 не сравняются. Таким образом, период обращения T если и отличается в некоторые моменты от периода ускоряющего поля T_0 , то затем вновь становится равным ему. В циклотроне нельзя достичь большой энергии потому, что электрическое поле не позволяет частице вращаться с частотой, сильно отличающейся от T_0 . Но обращаться с частотой T_0 в постоянном магнитном поле частицы могут только с вполне определенной энергией. Действительно, согласно формуле $T = \frac{2\pi mc^2}{eHc}$ и таблице 1 каждому значению периода обращения соответствует в постоянном магнитном поле одна вполне определенная полная энергия $E = mc^2$. Вполне определенной энергии соответствует и период обращения T_0 . Эта энергия не может быть большой, потому что ускорение частиц начинается с очень малой (нулевой) энергией и нельзя, чтобы в самом начале ускорения период обращения частиц с нулевой энергией $T_{\text{нач}}$ сильно отличался от T_0 .

Итак, принцип автофазировки можно сформулировать следующим образом.

В процессе ускорения период обращения частицы T может быть больше периода ускоряющего поля T_0 или меньше T_0 , но в среднем будет равняться T_0 , если амплитуда ускоряющего напряжения V_0 достаточно велика, а начальная разность $T - T_0$ достаточно мала.

Как можно использовать принцип автофазировки для повышения предельной энергии в циклотроне?

Период T колеблется около значения T_0 , а энергия частицы — около значения, соответствующего периоду обращения T_0 . Если T_0 изменять во времени, то период обращения будет совершать колебания около новых значений $T_0(t)$, а энергия частиц будет совершать колебания около растущего значения энергии $E(t)$, соответствующей $T_0(t)$. Этот процесс схематически изображен на рис. 4.

Ускоритель, построенный по изложенному выше принципу, носит название фазотрона или синхроциклотрона.

Самый большой в мире фазотрон построен в Институте ядерных проблем АН СССР под руководством Д. В. Ефремова, М. Г. Мещерякова, А. Л. Минца, Е. Г. Комара, В. П. Дзелепова, Н. А. Моносзона, И. Х. Невяжского и других¹.

Фазотрон

Магнит фазотрона очень похож на магнит циклотрона. Форма полюсов магнита подбирается так, чтобы магнитное поле спадало к краю на 3—5%. Это обеспечивает хорошую вертикальную фокусировку пучка и чрезвычайную легкость наладки машины по сравнению с циклотроном. Действительно, уменьшение магнитного поля к краю уже не вызовет нарушения резонанса, так как происходящее из-за спада поля увеличение периода обращения T может быть скомпенсировано дополнительным изменением T_0 на 3—5%.

Для улучшения фокусировки протонов на первых оборотах в центре магнитного полюса помещают дополнительный конус, обеспечивающий более резкий спад поля. Это повышает интенсивность ускоренного пучка до 10 раз.

Амплитуда переменного напряжения в фазотроне не превышает 15—20 кВ, что позволяет сделать зазор магнита относительно небольшим и тем самым уменьшить вес магнита и мощность системы питания. В больших фазотронах период ускоряющего поля увеличивается во время ускорения (пропорционально росту массы протонов) более чем в два раза.

Для того чтобы переменная частота генератора и собственная частота контура, в который входит дуант, все время совпадали, к последнему присоединяют механический переменный конденсатор. Обычно ограничиваются одним дуантом, чтобы умень-

¹ Этот фазотрон передан Объединенному институту ядерных исследований.

шить емкость ускоряющего электрода и тем самым облегчить изменение собственной частоты электрического контура.

Фазотрон работает импульсно. Когда период ускоряющего поля соответствует периоду обращения ионов с нулевыми скоростями, происходит захват частиц в фазотронный режим ускорения. Затем следует период ускорения. Радиус частиц увеличивается, и они либо попадают на мишень, находящуюся на больших расстояниях от центра магнита, и образуют мезоны, нейтроны, вызывают ядерные реакции, либо выводятся из камеры ускорителя. После этого период ускоряющего поля уменьшают до первоначального значения, и цикл повторяется снова. Число циклов в 1 секунду обычно порядка 100. Из-за такой импульсной работы средняя интенсивность ускоренных частиц в фазотроне всегда значительно ниже, чем в циклотроне. Импульсный характер работы присущ всем ускорителям, работающим по принципу автофазировки.

Процесс ускорения происходит обычно до тех пор, пока орбиты не упадут в область магнитного поля у края зазора, где показатель магнитного поля n равен 0,2. При $n = 0,2$ пучок увеличивается в вертикальном направлении и, ударяясь о стенки дуанта, пропадает. Это объясняется связью между свободными вертикальными и радиальными колебаниями; при $n = 0,2$ энергия радиальных колебаний переходит в энергию вертикальных.

Эксперименты ставятся как внутри камеры фазотрона, так и с пучками, выведенными наружу. Конечно, точный эксперимент можно поставить только с пучком, выведенным наружу. Наиболее простая задача — вывести наружу нейтроны. Часть протонов, ударившихся о мишень, помещенную внутри камеры, превращается в нейтроны с небольшой потерей энергии. Нейтроны, двигаясь в магнитном поле по прямой, выходят из камеры и через специальные трубки (их делают несколько), вставленные в толстую бетонную стенку, попадают в помещение для эксперимента. Отрицательные мезоны (π -мезоны) выводятся наружу магнитным полем фазотрона, так как знак их заряда противоположен знаку протона.

Наиболее трудно вывести из камеры ускорителя протоны.

В последние годы в Институте ядерных проблем АН СССР и в Ливерпульском университете (Англия) проблема вывода была успешно решена. В институте ядерных проблем удалось вывести наружу 5 % частиц (в Ливерпуле — 3 %). Плотность протонов, выведенных наружу, составляет 10 млрд. протонов на $1 \text{ см}^2/\text{сек}$.

В таблице 2 приведены некоторые параметры наиболее крупных фазотронов мира.

Фазотрон — очень удобный прибор для ядерных исследований, но практический предел энергии протонов, достижимый в фазотроне, вряд ли может значительно превышать 1000 мэв. Фазотрон неудобен для ускорения электронов, так как масса

электронов очень быстро возрастает с ростом энергии и, следовательно, возникает необходимость очень сильно менять период ускоряющего поля. Это технически нецелесообразно. Например, при энергии 500 мэв масса электрона возрастает по сравнению с массой покоя в 1000 раз, масса же протона при энергии 500 мэв отличается от массы покоя всего на 50%.

Для ускорения электронов существуют два типа ускорителей, использующих магнитное поле. Один из них, основанный

Таблица 2

Параметры крупных фазотронов

	Диаметр полюсов (в м)	Магнитное поле (в эрстедах)	Максимальная энергия (в мэв)	Средний ток (в микроамперах)	Вес магнита (в т)
Объединенный институт ядерных исследований	6	17 000	680	0,3	7000
Калифорнийский университет (США)	4,66	15 000	350	0,75	4300
Чикагский университет (США)	4,32	18 600	450	0,1	2200
Колумбийский университет (США)	4,16	17 400	385	0,1	2400
Ливерпульский университет (Англия)	3,96	18 900	410	1,0	1700

на принципе автофазировки, — синхротрон, а другой нерезонансный — бетатрон.

Фазотрон не удобен и для ускорения протонов до энергий, превышающих 1000 мэв.

Ускоритель, использующий принцип автофазировки и рассчитанный на ускорения протонов до энергии свыше 1000 мэв, получил название синхрофазотрона.

Синхрофазотрон. Описание принципа работы

В фазотроне траектория частиц представляет собой спираль, разворачивающуюся из центра магнита.

Если бы траектория протона была близка к окружности или другой какой-либо постоянной замкнутой орбите, то вся средняя часть магнита оказалась бы ненужной. Можно было бы построить ускоритель на очень большую энергию со значительно меньшим весом магнита, чем в фазотроне.

Для того чтобы протоны с разной энергией — от нескольких миллионов до миллиардов эв — двигались по почти постоянной орбите, магнитное поле должно нарастать во времени. Допустим, что нам удалось заставить двигаться протон

по почти постоянной орбите. Пусть длина периметра постоянной орбиты равняется Π , тогда период обращения T по орбите равен:

$$T = \frac{\Pi}{v}.$$

Для резонансного ускорения T должно равняться в среднем периоду T_0 ускоряющего поля. Следовательно, период ускоряющего поля должен изменяться обратно пропорционально скорости протона v .

Синхрофазотрон — это ускоритель на очень большие энергии, поэтому мы можем считать, что конечная скорость протона $v_{\text{кон}} = c$ — скорости света. Поэтому период ускоряющего поля изменяется в $p = \frac{c}{v_{\text{нач}}}$ раз, где $v_{\text{нач}}$ — начальная скорость протона, p называют коэффициентом частотной модуляции ускоряющего поля. Коэффициент p нельзя сделать очень большим, поэтому в синхрофазотрон впускают протоны с относительно большой энергией от 1 до 10 млн. (т. е. со скоростью $v_{\text{нач}}$ от $0,03 c$ до $0,1 c$).

На первый взгляд кажется, что для обеспечения движения частиц по постоянной орбите мы в каждый момент времени должны измерять скорость протонов и в соответствии с полученным значением изменять период T_0 ускоряющего поля. Это сделать очень трудно.

При постоянном периметре (а следовательно, и радиусе) орбиты скорость частицы однозначно связана со значением магнитного поля, что видно из выражения для радиуса орбит R (см. на стр. 7). Вместо того чтобы измерять скорость частиц, следует все время измерять магнитное поле и в соответствии с изменением магнитного поля изменять период ускоряющего поля T_0 . Поэтому, чтобы орбита протона оставалась постоянной, между растущим во времени магнитным полем $H(t)$ и убывающим во времени периодом ускоряющего поля T_0 должна сохраняться точная связь.

Обычно в синхрофазотроне указанная связь поддерживается с точностью до $0,1\%$. Это достигается с помощью специальной системы, которая в каждый момент времени производит измерение магнитного поля, а период ускоряющего поля подстраивается к нужному значению.

При правильном соотношении между $H(t)$ и T_0 средняя орбита будет постоянна. Но так как в отдельные моменты периода обращения T отличается от T_0 , то мгновенная орбита будет то больше средней (когда $T > T_0$), то меньше средней (когда $T < T_0$). Такие колебания мгновенных орбит носят название радиально-фазовых. Они связаны с явлением автофазировки, не позволяющим частицам обращаться с периодом, в среднем отличным от T_0 . Эти колебания медленные; за один период радиально-фазовых колебаний протоны совершают тысячи оборотов.

На рис. 5 изображены средняя орбита (ее иногда называют синхронной орбитой) и мгновенные орбиты. Детальное исследование поведения протонов показывает, что практически протоны не движутся ни по синхронной, ни по мгновенной орбите, а совершают около мгновенных орбит быстрые колебания, под действием фокусирующих сил, обеспечивающих устойчивость. Эти колебания носят название свободных или бетатронных. Они связаны с явлением устойчивости мгновенных орбит.

Выше, в разделе „Устойчивость движения“ мы показали, что орбиты устойчивы, если показатель магнитного поля n лежит между нулем и единицей. Устойчивость движения означает, что появляются силы, притягивающие частицы к орбитам. По-

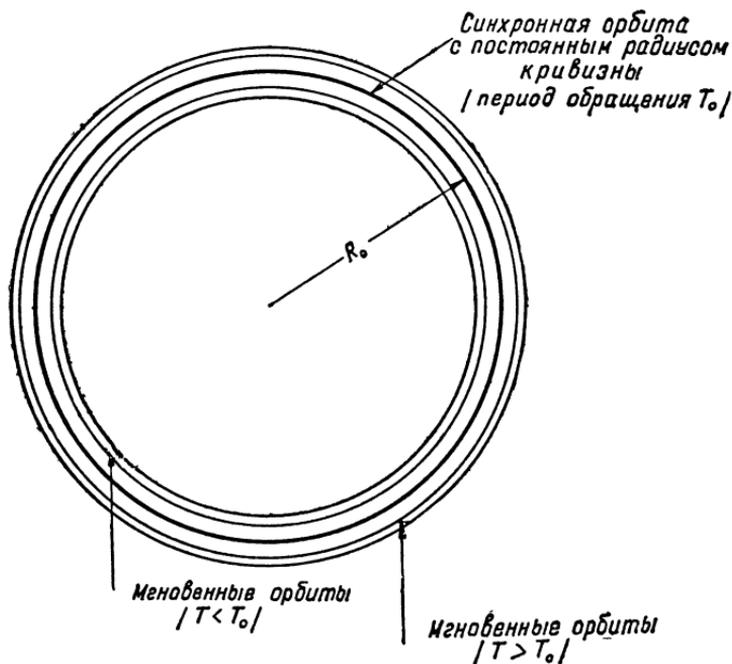


Рис. 5. Мгновенные орбиты пульсируют около синхронной орбиты.

этому, если частицу отклонить от положения равновесия, т. е. от орбиты, то она будет колебаться около орбиты, подобно маятнику, выведенному из положения равновесия.

Отклонение от орбиты происходит главным образом в момент впуска частиц в ускоритель. В такие моменты мгновенная орбита может занимать любое положение в камере, а частицы испускаются практически из одной точки (рис. 6). Отклонение от орбиты может происходить также в результате рассеяния протонов на ядрах молекул газа, оставшегося в камере после откачки. Итак, движение протонов в синхрофазотроне можно описать следующим образом. Существует синхронная орбита. Ее положение определяется соотношением между напряженностью магнит-

ного поля и периодом ускоряющего поля. Эта орбита сохраняет постоянное положение в камере с точностью до $0,1 - 0,3\%$. Около орбиты довольно медленно пульсируют мгновенные орбиты. Протоны совершают быстрые колебания около мгновенных орбит.

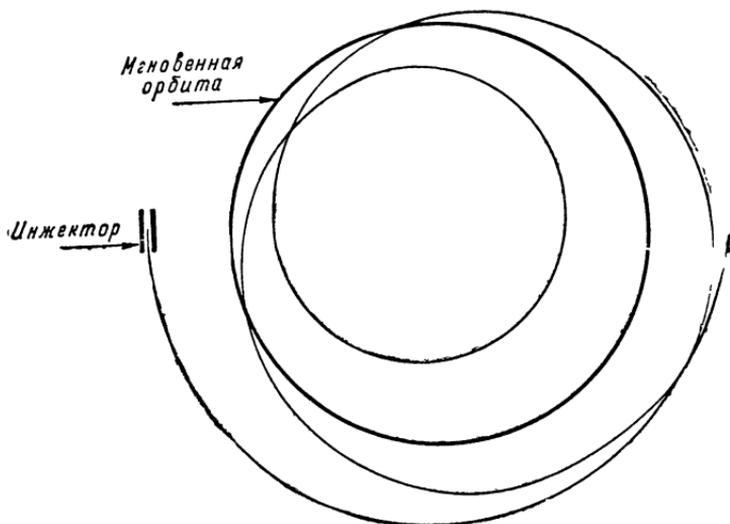


Рис. 6. Свободные колебания частицы, выпущенной из инжектора, около мгновенной орбиты.

Чем определяется ширина кольца, в котором можно производить ускорение? Очевидно, из экономических соображений ширину следует стремиться сделать как можно меньшей. Эта ширина определяется:

1) постоянством синхронной орбиты, т. е. точностью выполнения соотношения между T_0 и $H(t)$;

2) размахом радиально-фазовых колебаний, т. е. условием автофазировки;

3) размахом свободных колебаний, возникающих во время впуска частиц из инжектора, которые зависят также от величины фокусирующих сил, обеспечивающих устойчивость движения.

На допустимую величину ширины кольца влияет также искажение орбиты из-за всевозможных отклонений поля от расчетного значения, т. е. ширина кольца зависит от величины искажений магнитного поля.

Из-за неоднородности металла, из которого сделан магнит, а также из-за отсутствия полной симметрии в конструкции в магнитном поле всегда появляется зависимость значений магнитного поля от азимута.

Пусть на некотором небольшом участке магнитное поле отличается от расчетного значения. Обращаясь по орбите, протон будет каждый оборот проходить через небольшой участок искаженного магнитного поля. Следовательно, это искажение будет действовать через период обращения T . Действие искажения сводится к тому, что протон сбивается с расчетной мгновенной орбиты. Фокусирующие силы возвращают его обратно. При-

ведет ли многократное сбивание частицы с орбиты к непрерывному росту величины отклонения от орбиты или нет?

Чтобы ответить на этот вопрос, следует знать значение периода свободных колебаний около орбиты. Если период свободных колебаний равен периоду обращения, то искажение поля будет действовать в резонанс, и амплитуда свободных колебаний будет непрерывно возрастать. Если же периоды обращения и свободных колебаний не совпадают, то искажение поля не приведет к непрерывному росту свободных колебаний, а приведет лишь к искажению мгновенной орбиты, причем это искажение будет тем больше, чем ближе совпадают указанные периоды.

Период свободных радиальных T_R и вертикальных T_z колебаний выражается так:

$$T_R = \frac{T}{\sqrt{1-n}}; \quad T_z = \frac{T}{\sqrt{n}}.$$

Если показатель магнитного поля n отличен от нуля и единицы, то резонанс не возникает ни с вертикальными ни с радиальными колебаниями. По случайным обстоятельствам резонансные значения показателя магнитного поля n (0 и 1) совпадают с границами области устойчивости.

В СССР заканчивается строительство самого большого в мире синхрофазотрона, рассчитанного на получение протонов с энергией 10 тысяч *мэв*. Физические основы синхрофазотрона разработаны в Физическом институте имени П. Н. Лебедева АН СССР.

В создании этого гигантского ускорителя большую роль играли научные учреждения, связанные с отечественной электро- и радиопромышленностью, в частности Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры Министерства электропромышленности СССР и Радиотехническая лаборатория АН СССР, а также ведущие советские инженеры: Д. В. Ефремов, А. Л. Минц, М. М. Вейсбейн, С. А. Водопьянов, М. А. Гашев, П. П. Иванов, Е. Г. Комар, И. Ф. Малышев, Н. А. Моносзон, И. Х. Невяжский, С. М. Рубчинский, А. М. Столов и другие.

Синхрофазотрон на 10 000 *мэв*

Описание этого ускорителя приводится в виде комментариев к трем фотографиям.

Магнит ускорителя состоит из четырех квадрантов, разделенных прямолинейными промежутками. Зазор магнита имеет сечение 2 м (вдоль радиуса) и высоту 40 см. Магнитное поле в зазоре магнита возрастает за 3,3 секунды от 150 до 13 тыс. эрстед. Реактивная мощность питания магнита равна 140 тыс. киловольтампер.

На рис. 7 виден линейный ускоритель¹, в котором предварительно протоны ускоряются до энергии 9 *мэв*. По специальной вводной системе, состоящей из магнитных корректоров, поворотного магнита, магнитных линз (рис. 8), пучок протонов

¹ Описание линейных ускорителей приводится на стр. 36.

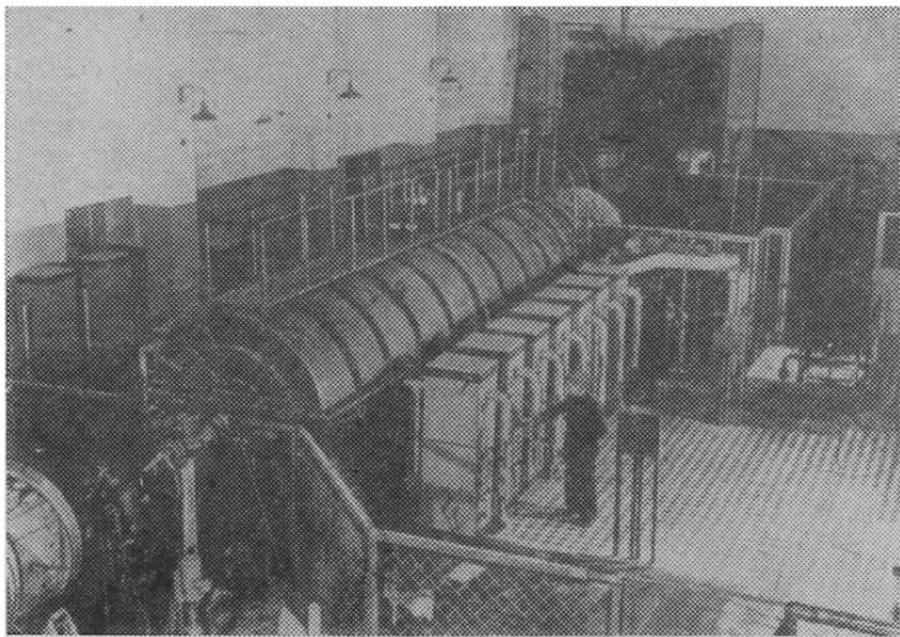


Рис. 7. Линейный ускоритель. Прежде чем попасть в камеру синхрофазотрона, протоны предварительно ускоряются в линейном ускорителе до энергии 9 МэВ .

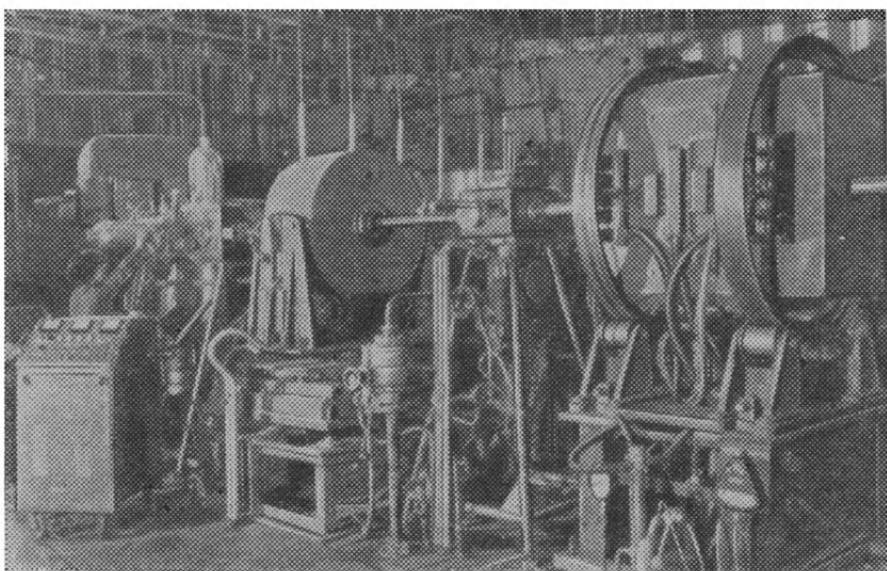


Рис. 8. Фокусирующая система, по которой протоны проходят от линейного ускорителя до камеры синхрофазотрона.

вводится с большой точностью в камеру ускорителя, когда магнитное поле в ней равно 150 эрстед.

На рис. 9 показаны два квадранта (со средним радиусом 28 м) ускорителя весом 36 тыс. т, разделенные прямолинейным промежутком в 8 м. В двух таких промежутках расположены ускоряющие электроды, в третьем — вводная система и в четвертом — выводная система. Магнит собран из листового железа с изоляцией для уменьшения токов Фуко. Он должен быть изготовлен почти с ювелирной точностью.

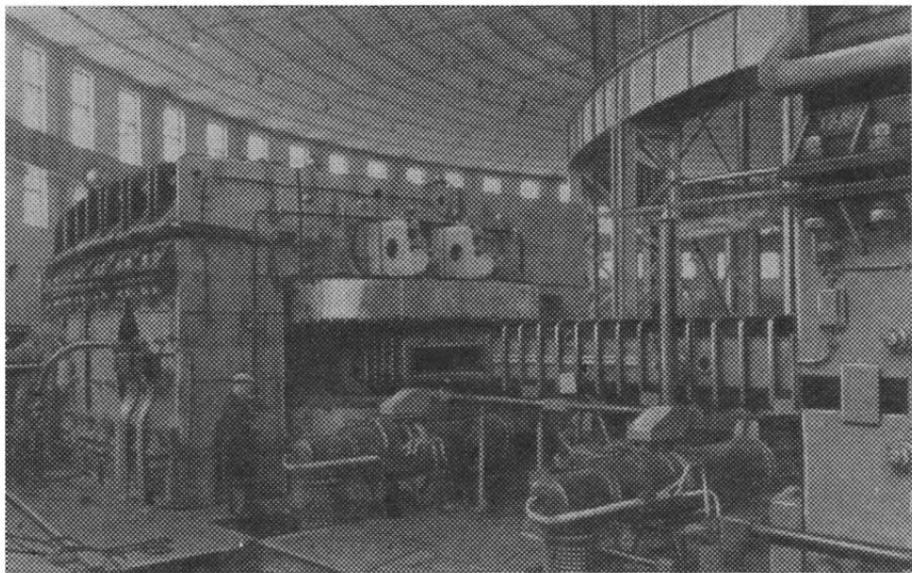


Рис. 9. Два сектора магнита и прямолинейный промежуток между ними. Одна секция камеры вынута, поэтому видна внутренняя часть камеры.

Ускоряющее напряжение включается в момент впуска частиц. Период ускоряющего поля соответствует значению магнитного поля с точностью до 0,1 %.

Максимальная энергия, которую может приобрести за один оборот протон, равна 8 кэв. В среднем частица приобретает за один оборот энергию в 2,2 кэв. Легко подсчитать, что за время ускорения протон сделает 4,5 млн. оборотов по орбите длиной 200 м. Общий путь, пройденный протоном во время ускорения, равен 900 тыс. км, т. е. в два с половиной раза больше, чем расстояние от Земли до Луны.

Для того чтобы протоны на таком большом пути не были потеряны, в камере ускорителя должен поддерживаться вакуум порядка нескольких миллионных долей миллиметра ртутного столба.

В таблице 3 приведены сравнительные данные для всех известных синхрофазотронов.

Сравнительные данные ряда синхрофазотронов

Учреждения	Максимальная энергия (в мэв)	Средний радиус орбиты (в м)	Прямойный промежуток (в м)	Вес магнита (в т)	Реактивная мощность питания магнита (в киловольтамперах)	Начальная энергия протона (в мэв)	Время ускорения (в сек.)	Число импульсов ускорения частиц (в сек.)
Объединенный институт ядерных исследований . . .	10000	28	4×8	36000	140000	9	3,3	5
Калифорнийский университет (США) . . .	6200	15,2	$4 \times 6,1$	10000	90000	9,8	2	10
Брукгавенская национальная лаборатория (США) . . .	3000	9,2	4×3	1650	26000	3,7	1	12
Бирмингемский университет (Англия) . .	1000	4,5	нет	810	14000	0,46	1	6

Синхротрон и бетатрон — ускорители электронов

Как уже упоминалось, для ускорения электронов применяются два циклических ускорителя: бетатрон и синхротрон.

В бетатроне ускорение происходит за счет эдс индукции, возникающей в переменном магнитном поле. Бетатрон работает по принципу трансформатора. Недаром изобретатель бетатрона Видероз (1928 г.) первоначально назвал этот ускоритель лучевым трансформатором. Первичной обмоткой бетатрона является обмотка магнита, вторичной одновитковой обмоткой — пучок электронов, обращающихся в магнитном поле.

Хотя еще в 20-х годах предлагалось ускорять электроны в растущем во времени магнитном поле, только Видероз в 1928 году обратил внимание на простое условие, обеспечивающее ускорение электронов по постоянной орбите. Если среднее поле $H_{cp}(R)$ внутри орбиты радиуса R в два раза больше, чем магнитное поле $H(R)$ на самой орбите, то ускорение электронов может происходить все время на постоянной круговой орбите: $H_{cp}(R) = 2H(R)$ *.

* Строго говоря, сформулированное выше условие относится к переменным составляющим магнитного поля, поэтому более точное бетатронное условие следует писать $\dot{H}_{cp}(R) = 2\dot{H}(R)$, где \dot{H}_{cp} — изменение среднего поля за 1 секунду, а \dot{H} — изменение магнитного поля на орбите за 1 секунду.

Если среднее поле внутри орбиты больше $2H(R)$, то орбита расширяется; если меньше, то орбита сжимается.

Конструкция магнита бетатрона чрезвычайно проста. Полюс магнита создает в кольцевой области спадающее магнитное поле с показателем n порядка 0,6 — 0,75. Такой показатель магнитного поля обеспечивает устойчивость движения. В центре магнита помещен железный сердечник, в котором магнитное поле значительно больше, чем поле на орбите. Иногда в сердечнике

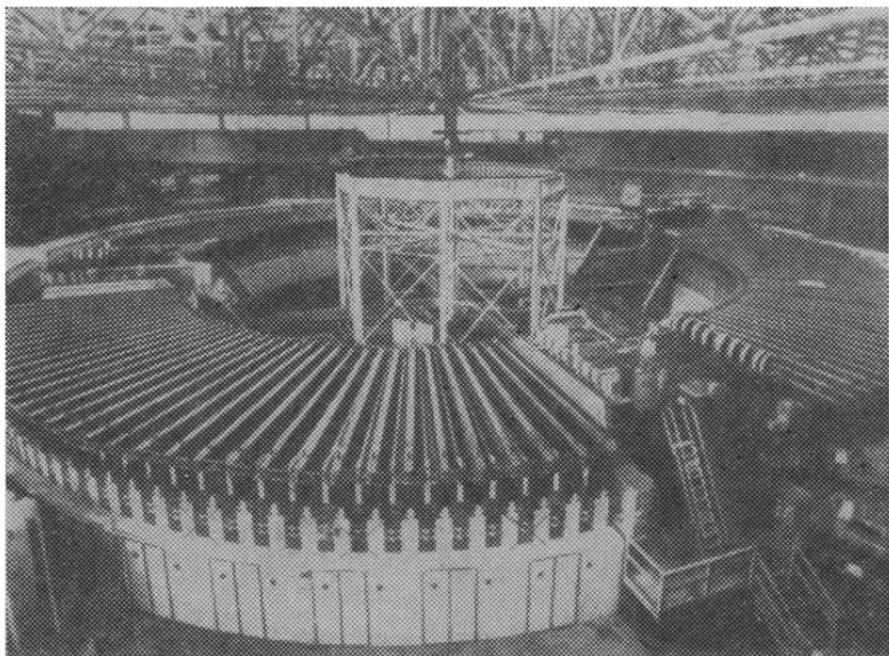


Рис. 10. Общий вид магнита синхрофазотрона Калифорнийского университета (США), дающего протоны с энергией в 6 200 млн. эв. Этот ускоритель часто называют „бетатрон“.

делают небольшой зазор, регулируя который можно добиться выполнения бетатронного условия на окружности с заданным радиусом.

Конечно, механическая регулировка зазора сердечника весьма неудобна, поэтому в последнее время стали делать сердечник сплошным, а регулировку поля обеспечивают дополнительными электрическими обмотками.

Между полюсами магнита помещают вакуумную камеру, сделанную из стекла или фарфора. В вакуумной камере находится инжектор, испускающий электроны. Устройство инжектора напоминает устройство катода кинескопа телевизоров. Электроны вылетают из раскаленной вольфрамовой нити и двигаются

ускоренно по направлению к аноду, к которому обычно прикладывают довольно высокое напряжение от 10 до 80 киловольт. В аноде имеется отверстие, через которое узким пучком и вылетают электроны.

Часть электронов неизбежно попадает на стенки камеры; поэтому на внутренние стенки камеры наносят проводящее покрытие (серебро или аквадаг) и заземляют его (анод инжектора также заземлен). Чтобы ускоряющее электрическое поле проникало внутрь камеры, в проводящем покрытии делают один или два разреза.

В камере без покрытия или с плохо нанесенным покрытием электроны, накапливаясь на стекле или фарфоре, создают мощные электростатические поля, искажающие траектории ускоряемых электронов или совсем нарушающие процесс ускорения.

Вакуумная камера бетатрона имеет несколько отростков, через которые производят откачку воздуха, вставляют инжектор и мишени. В последнее время для бетатронов, используемых в промышленности и медицине, стали применять сменные камеры, в которых откачка воздуха производится заранее на заводе.

Обмотка бетатрона питается переменным током (частотой 50 герц, 150 герц и т. д.). Ускорения происходят при растущем во времени магнитном поле. Электроны впускаются в камеру, когда поле в зазоре магнита 10 — 15 эрстед (в зависимости от радиуса бетатрона и напряжения между нитью и анодом инжектора). В этот период времени на инжектор подается короткий импульс напряжения длительностью несколько миллионных долей секунды, электроны выбрасываются в камеру; часть из них пропадает, а какая-то, обычно небольшая, доля начинает ускоряться¹. Затем происходит процесс ускорения. За каждый оборот электрон получает энергию, равную $eE \Delta v$, где E численно равно электродвижущей силе индукции, возникающей в проволоке, помещенной в камеру ускорителя вдоль орбиты электрона.

Процесс ускорения продолжается до тех пор, пока возрастет магнитное поле. При уменьшении магнитного поля электрон будет терять энергию. Поэтому ускоренные электроны следует использовать прежде, чем магнитное поле достигнет максимума. Для этого в бетатронах предусмотрены расширительные обмотки, которые можно включить в любой момент времени. Когда по обмоткам течет ток, орбита электронов расширяется или сжимается (в зависимости от направления тока в дополнительных обмотках) и электроны ударяются о специальную мишень или инжектор, при этом образуются очень жесткие рентгеновские лучи (γ -кванты), которые узким конусом (угловая ширина конуса зависит от энергии электронов и толщины мишени) вы-

¹ Несмотря на то, что во многих странах работают десятки и сотни бетатронов, до сих пор не удалось рассчитать долю частиц, захваченных в бетатронный режим ускорения, и до конца объяснить физические явления, происходящие в период инъекции.

ходят из ускорителя. Они без существенных потерь проходят через стенки вакуумной камеры.

Бетатрон очень удобен для ускорения электронов до энергии 50—100 мэв. При больших энергиях бетатрон менее удобен, так как чрезвычайно увеличиваются размеры сердечника магнита. Кроме того, работу бетатрона нарушает электромагнитное излучение, испускаемое электроном при движении по окружности. Поэтому при энергии 50 мэв, а может быть, и при меньших энергиях, с бетатроном начинает конкурировать другой ускоритель электронов — синхротрон, работающий с использованием принципа автофазировки. При энергиях больших 100 мэв преимущества синхротрона очевидны.

Синхротрон

Обращение электронов в бетатроне происходит с периодом

$$T = \frac{2\pi R}{v}.$$

Скорость электрона при энергии, большей 2—3 мэв, очень мало отличается от скорости света (меньше чем на 1—2%), по-

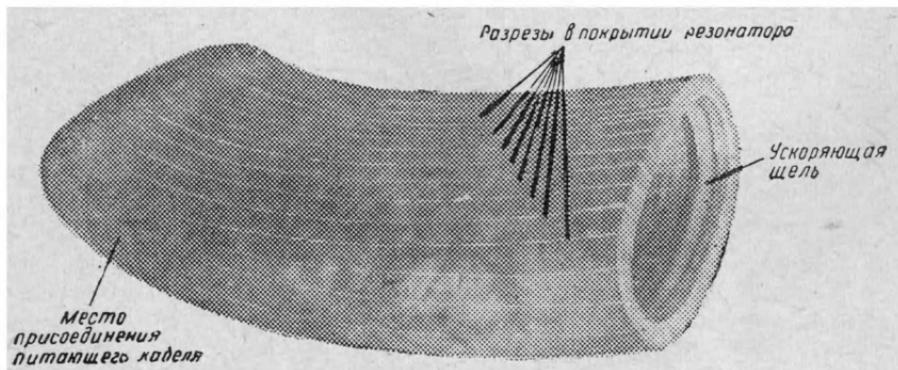


Рис. 11. Резонатор — ускоряющий электрод синхротрона Физического института имени П. Н. Лебедева АН СССР. Резонатор является частью вакуумной камеры, в которую он вклеен в качестве одного из ее секторов.

этому электрон при больших энергиях будет обращаться в бетатроне с постоянным периодом.

Согласно принципу автофазировки, если в ускоряющем элементе создается переменное ускоряющее электрическое поле с периодом изменения T_0 , то и ускоряемые частицы будут обращаться в магнитном поле с периодом T , в среднем равным T_0 .

Следовательно, при больших энергиях бетатронный сердечник можно заменить ускоряющим электродом с постоянным периодом изменения поля T_0 , равным $\frac{2\pi R}{c}$. В этом случае ускорение бу-

дет происходить так же, как в бетатроне, по орбите с примерно постоянным радиусом.

Ускоряющий электрод обычно изготавливают в виде четверть-волнового резонатора, вклеенного в камеру (рис. 11.). Для этого резонатору придают форму части вакуумной камеры. Наиболее удобный материал — кварц, так как диэлектрические потери в нем наименьшие. Весь резонатор серебрят (или меднят), оставляя только продольные полосы (для уменьшения токов Фуко)

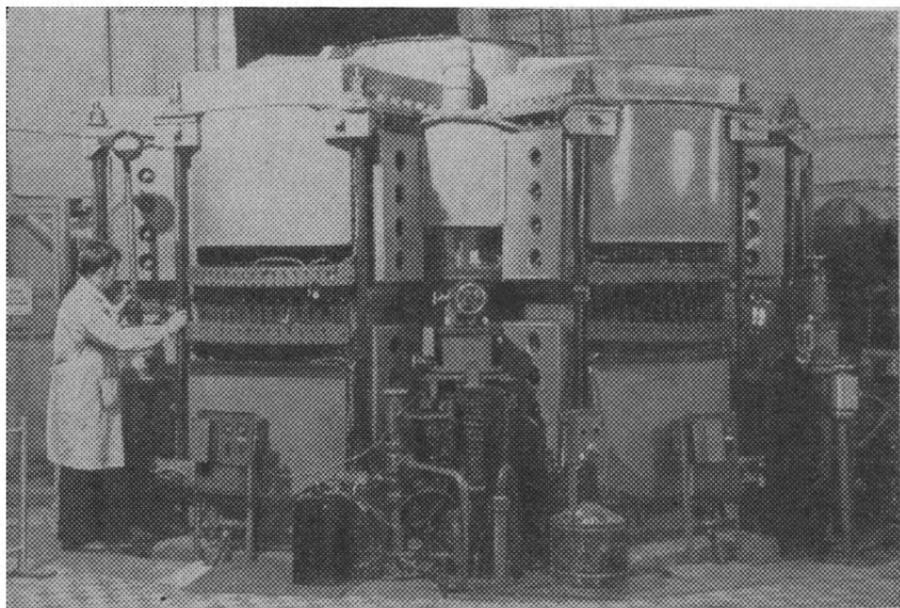


Рис. 12. Шестияремный магнит синхротрона Физического института имени П. Н. Лебедева АН СССР, дающего электроны с энергией 265 мэв.

и ускоряющую щель. Кабель питания, идущий от высокочастотного генератора, присоединяется к полосе связи на внешней стороне резонатора (рис. 11). В резонаторе возбуждается электромагнитная волна с пучностью напряжения на ускоряющей щели.

По конструкции магнит синхротрона отличается от магнита бетатрона только размерами сердечника. В синхротроне обычно делают также небольшой сердечник, обеспечивающий выполнение бетатронного условия, при небольших значениях магнитного поля на орбите. Это позволяет ускорять электроны до энергии 2 — 3 мэв в бетатронном режиме. При достижении энергии 2 — 3 мэв к резонатору подключается высокое напряжение, и в дальнейшем ускорение происходит в синхротронном режиме. Интересно, что при переходе от бетатронного режима ускорения к синхротронному электроны практически не теряются, что согласуется с хорошо разработанной теорией синхротрона.

При обращении электронов по круговым орбитам нам приходится сталкиваться со специфическим явлением: электроны из-за своей малой массы довольно легко излучают электромагнитные волны. Этим свойством электронов широко пользуются в различных генераторах радиоволн: магнетронах, клистронах и др.

В ускорителях способность электронов излучать электромагнитные волны является неприятным эффектом. На это впервые обратили внимание Л. А. Арцимович, Д. Д. Иваненко, И. Я. Померанчук. Расчет показывает, что энергия u (в $кэв$), потерянная электроном на излучение за один оборот, равна:

$$u = \frac{88}{R} E^4 \text{ кэв,}$$

где E — энергия электрона в миллиардах $эв$, R — радиус орбиты в метрах.

Из формулы видно, что потери на излучение растут очень быстро с ростом энергии. Если в ускорителях на 300 — 350 $мэв$ ($R = 1 м$) они составляют около 1 $кэв$, то при энергии 1000 $мэв$ ($R = 4,5 м$) — около 20 $кэв$, а при энергии 10 000 $мэв$ потери энергии за оборот уже составляют около 30 $мэв$.

Потери энергии на излучение восполняются за счет энергии, передаваемой резонатором, причем механизм автофазировки обеспечивает автоматическое восполнение потерь на излучение. Действительно, механизм автофазировки обеспечивает обращение частиц с периодом T_0 , равным периоду ускоряющего поля. А это возможно лишь при восполнении потерь на излучение. Механизм автофазировки перестает действовать лишь тогда, когда потери на излучение за один оборот становятся больше, чем максимально может восполнить резонатор.

Таким образом, излучение не нарушает режима работы синхротрона, если только амплитуда разности потенциалов в ускоряющей щели достаточно велика.

На рис. 12 изображен шестиремный магнит синхротрона на 265 $мэв$ Физического института имени П. Н. Лебедева АН СССР. В таблице 4 приведены для сравнения данные для трех синхротронов и одного бетатрона на энергию порядка 300 $мэв$.

Синхротроны на энергию больше 300 $мэв$ конструируют несколько иначе. Бетатронный сердечник вообще не используется, и электроны ускоряются до энергии 1 — 2 $мэв$ в электростатическом ускорителе, а затем по специальной впускной системе вводятся в вакуумную камеру, расположенную в зазоре магнита так, как это делается в синхрофазотронах.

Предельная энергия в автофазирующих ускорителях

В ускорителях, использующих принцип автофазировки, не существует теоретического предела достижимых энергий (или он чрезвычайно высок). Максимально достижимая энергия опре-

Сравнительные данные синхротронов и бетатрона

Учреждения	Вес магнита (в т)	Радиус орбиты (в см)	Энергия конца бетатронного режима (в мэв)	Число импульсов (в сек.)	Начальная энергия электронов (в кэв)	Максимальная энергия (в мэв)	Средняя интенсивность ускоренного лучка (рентген в 1 мин/1 м)
Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР	130	82,5	2	50	80	265	10000
Калифорнийский университет (США)	135	100	2	6	100	322	1000
Массачусетский институт технологии (США)	50	100	7	2—6	80	330	180
Бетатрон Иллинойского университета (США) . . .	330	100	320	6	100	320	1000

деляется техническими и экономическими возможностями. Стоимость ускорителей с ростом техники, увеличением точности изготовления магнитов, радиотехнических устройств непрерывно снижается. Особое значение имеет уменьшение размеров и веса магнитов. Уменьшить размеры магнитов можно лишь за счет уменьшения зазора и ширины кольца магнита. Но при уменьшении размеров зазора магнита повышаются и без того высокие требования к качеству изготовления установки, к точности юстировки всех узлов. Ускоритель начинает работать с перебоями, давать небольшую интенсивность. Проведение физических экспериментов затрудняется.

Если бы удалось создать дешевый магнитный материал, насыщенность при полях 50 000 — 100 000 эрстед, то размеры и стоимость установок сильно снизились. Но в настоящее время при использовании обычной трансформаторной стали магнитное поле в кольцевых ускорителях не может превышать величины порядка 15 тыс. эрстед. Обычно магнитное поле еще меньше. Следовательно, с ростом энергии частиц радиус орбиты должен увеличиваться. Для очень больших энергий можно написать приближенно соотношение:

$$E = 300 HR,$$

где E — энергия в эв, H — напряженность магнитного поля в эрстедах и R — радиус в сантиметрах.

Если при энергии 10 тыс. мэв радиус R порядка 30 м (см. таблицу 1), то при энергии 30 тыс. мэв радиус орбиты будет

около 100 м. Но с ростом радиуса орбиты уменьшаются фокусирующие силы, обеспечивающие устойчивость движения. Фокусирующие силы прямо пропорциональны смещениям частицы (z и ρ) от орбиты и обратно пропорциональны радиусу орбиты R .

Чтобы сохранить величину фокусирующих сил, необходимо увеличивать пропорционально росту радиуса допустимые величины отклонений от орбиты в вертикальном (z) и радиальном (ρ) направлениях, т. е. пропорционально увеличивать все размеры магнита. Но тогда вес магнита увеличивается пропорционально кубу радиуса (или кубу энергии), так, что при переходе от энергии 10 тыс. мэв к энергии 30 тыс. мэв вес магнита должен был бы возрасти в 27 раз.

На самом деле, при росте радиуса магнита отношения $\frac{D_z}{R}$ и $\frac{D_R}{R}$ (где D_z — зазор, а D_R — ширина кольцевой дорожки магнита) довольно сильно уменьшают, предъявляя более высокие требования к точности изготовления и юстировки магнита. Но это дает лишь небольшую экономию веса магнита. Если бы удалось увеличить фокусирующие силы, то размер кольцевой дорожки и зазор магнита (а следовательно, и вес) можно было бы значительно уменьшить. При увеличении фокусирующих сил частицу труднее столкнуть с орбиты, а при инжекции допустима большая ошибка в угле впуска частиц в камеру. Чем сильнее фокусировка¹, тем надежнее работает ускоритель.

Но увеличить фокусирующие силы в ускорителе очень трудно. Это объясняется связью между вертикальными и радиальными фокусирующими силами. Довольно просто увеличить вертикальную фокусировку даже в несколько сот раз, сделав показатель магнитного поля n равным $+300$ (т. е. сделать магнитное поле быстро спадающим с ростом радиуса). Напомним, что магнитное поле $H = \frac{H_0}{R^n}$. Но тогда не будет выполнено условие устойчивости (фокусировки) в радиальном направлении: $n < 1$. Пучок частиц, сильно сжатый по вертикали, быстро разойдется в радиальном направлении и вскоре все частицы ударятся о боковые стенки камеры.

Можно поступить по-другому: сделать n равным -300 (т. е. магнитное поле сильно возрастающим с ростом радиуса). Тогда фокусировка в радиальном направлении увеличится в несколько сот раз, но в вертикальном направлении появится мощная дефокусировка. В этом случае очень узкий в радиальном направлении пучок ударится о полюса магнита (или крышки вакуумной камеры).

Таким образом, в ускорителях мы вынуждены использовать слабые фокусирующие силы, чтобы обеспечить условие одно-

¹ Часто термин „устойчивость“ мы будем заменять словом „фокусировка“, а термин „неустойчивость“ — словом „дефокусировка“.

временной фокусировки в радиальном и вертикальном направлениях.

Но из этого, казалось бы, безвыходного положения в 1952 году Ливингстоном, Курантом и Снайдером был найден интересный выход. (Как выяснилось впоследствии, аналогичная работа была выполнена в 1950 году, но не опубликована Н. Кристофилосом.)

Сильная фокусировка

Выход был найден в отказе от радиально-симметричного магнитного поля, не зависящего от азимута. Представим себе магнит, состоящий из нескольких десятков пар секторов, расположенных по окружности большого радиуса R . Все секторы имеют одинаковый угловой раcтвор и отличаются только по своему магнитному полю. Первая половина секторов имеет магнитное поле, резко спадающее по радиусу (следовательно, показатель магнитного поля n — большое положительное число). Вторая половина секторов имеет магнитное поле, резко возрастающее с ростом радиуса (следовательно, показатель магнитного поля n — большое отрицательное число). Секторы из первой и второй половины расположены через один вдоль окружности (рис. 13). Секторы первой половины обеспечивают вертикальную фокусировку и приводят к радиальной неустойчивости (дефокусировке). Секторы второй половины, наоборот, обеспечивают фокусировку в радиальном направлении и приводят к дефокусировке в вертикальном. На первый взгляд кажется, что никакого выигрыша здесь не будет, так как фокусирующие и дефокусирующие секторы имеют одинаковые размеры и фокусирующие и дефокусирующие силы действуют одинаковое время. Но такое рассуждение содержит одну ошибку. Величина фокусирующих или дефокусирующих сил зависит еще от смещения (z или ρ) частицы от равновесной орбиты. Поэтому следует установить, какое значение смещение (z или ρ) принимает в фокусирующих и дефокусирующих секторах. Оказывается, что если число пар секторов N выбрано правильно, то частицы находятся в фокусирующих секторах в среднем на больших расстояниях от орбиты, чем в дефокусирующих. Это и понятно, так как в соседнем дефокусирующем секторе действуют силы, отталкивающие частицы от орбиты, поэтому они попадают в фокусирующий сектор наиболее сильно отклоненными. Наоборот, когда частица находится в фокусирующем секторе, она все время притягивается к орбите и попадает в соседний дефокусирующий сектор на небольшом расстоянии от орбиты. Если провести две кривые, между которыми происходит колебание частиц, то мы увидим, что эти две линии (огibaющие) наиболее близко сходятся в дефокусирующих секторах и расходятся в фокусирующих (рис. 13). Если частица в фокусирующих секторах находится дальше от орбиты, чем в

дефокусирующих, то это означает, что фокусирующая сила, действующая на частицу, больше, чем дефокусирующая, и, несмотря на равенство размеров всех секторов, получается суммарный фокусирующий эффект.

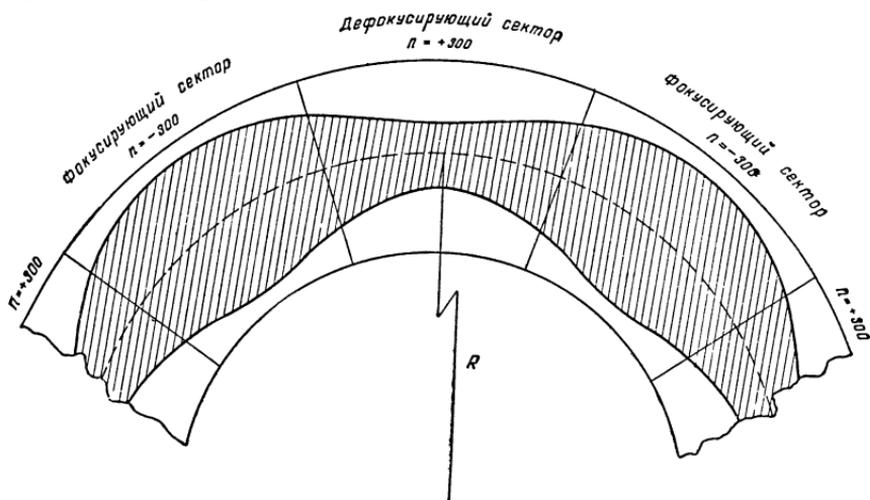


Рис. 13. Схема расположения фокусирующих и дефокусирующих секторов при сильной фокусировке. Заштрихована область, в которой происходит движение ускоряемых частиц.

Если число пар секторов N равно примерно $2\sqrt{|n|}$, где (n) — абсолютная величина показателя магнитного поля, то фокусирующие силы

$$\frac{F_z}{z} \approx \frac{F_R}{\rho} \approx -\frac{(n)}{5} \frac{e}{c} v H \frac{1}{R}.$$

Таким образом, если $n=300$, то фокусирующие силы возрастают по сравнению с обычным ускорителем со слабой фокусировкой при одинаковых значениях z и ρ почти в 100 раз. Период свободных колебаний, который обратно пропорционален корню квадратному из величин F_z или F_R , уменьшается в 10 раз.

В настоящее время опубликованы несколько проектов ускорителей на 25 млрд. эв с сильной фокусировкой. В Советском Союзе проектируется ускоритель на 50 млрд. эв. Вес магнита такого ускорителя будет составлять 22 тыс. т. Размер зазора магнита порядка 6 см, ширина магнитной дорожки 10 см, длина камеры 1500 м. Ускорение будет происходить так же, как в обычном синхрофазотроне, с использованием принципа автофазировки. Протоны до энергии 100 мэв ускорятся в линейном ускорителе, а затем уже с большой точностью вводятся в камеру.

Наряду с указанным преимуществом ускоритель с сильной фокусировкой имеет и ряд недостатков, которые сильно затрудняют его сооружение.

1. Требования к точности изготовления сильнофокусирующего магнита значительно выше, чем для обычного ускорителя. Это объясняется чрезвы-

чайно большим количеством возможных резонансов, которые могут привести к раскачке свободных колебаний. Часть из этих резонансов подобна тем, которые возникают при $n=1$ и 0 в обычных синхрофазотронах.

2. Для сильнофокусирующих ускорителей характерно наличие критической энергии $E_{кр}$, при которой не действует механизм автофазировки. При прохождении через критическую энергию возможны большие потери частиц.

3. Точность выполнения соотношения, устанавливающего связь магнитного поля H и периода T_0 ускоряющего поля, должна быть в десятки раз больше, чем в обычных ускорителях.

Есть и другие трудности, однако нет сомнения, что все они будут преодолены и сильная фокусировка позволит повысить практический предел энергии, достижимой в синхрофазотроне, еще в несколько раз.

Сильная фокусировка открывает возможности создания ряда весьма интересных ускорителей. Об одном из них — кольцевом фазотроне, предложенном в 1953 году А. А. Коломенским, В. А. Петуховым и М. С. Рабиновичем, мы коротко расскажем.

Кольцевой фазотрон

В рассмотренных ускорителях применялось переменное во времени магнитное поле и кольцевой магнит (синхротроны, бетатроны, синхрофазотроны) или постоянное магнитное поле и сплошной круговой магнит (циклотрон, фазотрон).

Известно, что применение постоянного магнитного поля имеет большие преимущества с точки зрения повышения эффективности работы установки. В фазотроне, например, нет жесткого требования к закону изменения ускоряющего поля. Изменение периода ускоряющего поля в фазотроне может происходить чаще, чем изменение магнитного поля в синхрофазотроне. Следовательно, можно получать несколько сот импульсов ускоренных частиц в 1 секунду вместо нескольких импульсов в 1 минуту, как в синхрофазотронах. Но сплошной магнит фазотрона во много раз тяжелее и дороже кольцевого магнита.

Оказывается, возможно производить ускорение частиц и в узком кольце постоянного магнита и, таким образом, в одном приборе сконцентрировать все достоинства двух типов ускорителя. Рассматриваемый ускоритель получил специальное название — кольцевой фазотрон.

Магнит кольцевого фазотрона, так же как и сильнофокусирующего синхрофазотрона, состоит из отдельных секторов. Магнитное поле в них очень сильно изменяется вдоль радиуса от очень малого до очень большого значения. Половина секторов имеет угол γ_1 , а вторая половина секторов — угол γ_2 меньше угла γ_1 ($\gamma_2 < \gamma_1$). Во всем остальном эти магниты совершенно подобны (рис. 14).

Однако, электрическая обмотка магнитов с малым углом и большим углом γ включена навстречу друг другу, так что магнитное поле в зазорах имеет противоположное направление. Вдоль орбиты сектора с большим и малым углом расположены через один. В одном из секторов частица поворачивает на угол γ_1 , а во втором — в обратном направлении на угол γ_2 , т. е. траектория частицы, прошедшей два сектора, повернет всего на угол

($\gamma_1 - \gamma_2$). Это приводит к двум обстоятельствам: во-первых, два сектора несмотря на то что они подобны друг другу, действуют так же, как в сильной фокусировке, оттого что показатель n у них имеет противоположный знак (из-за разного направления магнитного поля). Во-вторых, при изменении энергии орбиты смещаются в узком кольце параллельно друг другу. Таким образом, в узком кольце может происходить ускорение от небольших энергий (нескольких мэв) до 1 млрд. эв.

Замечательным свойством кольцевого фазотрона является отсутствие критической энергии, при которой происходит потеря автофазирующих

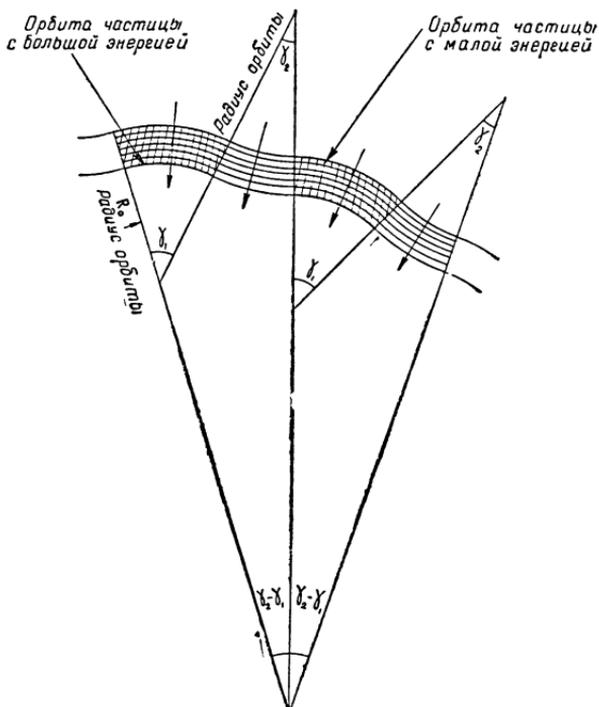


Рис. 14. Орбиты частиц и направление магнитного поля в кольцевом фазотроне. Стрелки указывают направление возрастания абсолютной величины магнитного поля, направленного перпендикулярно к плоскости рисунка. В заштрихованных секторах с углом γ_1 магнитное поле направлено снизу вверх, в незаштрихованных секторах с углом γ_2 — сверху вниз.

свойств. Оказывается, что введение в обычный ускоритель с сильной фокусировкой магнитных полей обратного направления также помогает ликвидировать критическую энергию. Недостатком кольцевого фазотрона является увеличение периметра орбиты из-за наличия участков с обратным направлением магнитного поля. Дальнейшая работа покажет, перспективен ли этот тип ускорителей. В настоящее время испытана небольшая модель такого ускорителя.

Конечно, кольцевой фазотрон не единственная и, возможно, не лучшая модификация сильнофокусирующего ускорителя. Следует ожидать появления новых интересных предложений.

Линейные резонансные ускорители

До сих пор мы рассматривали движение частиц в магнитном поле. Хотя магнитное поле не производит ускорения, оно обеспечивает многократное прохождение частиц через один и тот же ускоряющий электрод. В самых больших ускорителях протоны миллионы раз проходят через единственный электрод. Это большое преимущество ускорителей с магнитными управляющими полями покупается дорогой ценой — преодолением больших трудностей при создании сильных магнитных полей. Поэтому уже давно возникла идея (Видероз, Изинг и другие) об ускорении частиц без использования магнитного поля. В этом случае частицы будут двигаться по прямолинейному пути, на котором размещено большое число ускоряющих электродов. Каждый ускоряющий электрод частица проходит один раз; так как нель-

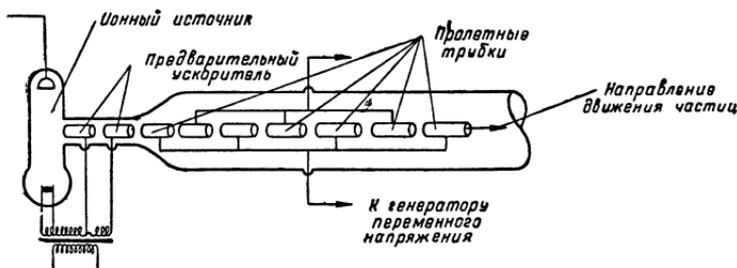


Рис. 15. Линейный ускоритель старого типа.

зя поместить очень много электродов, то разность потенциалов на ускоряющем промежутке электрода должна быть очень велика.

На рис. 15 изображена схема линейного ускорителя старого типа. В вакуумной камере расположены полые металлические пролетные трубки, присоединенные попеременно к разным клеммам генератора высокого переменного напряжения. Внутри трубки электрическое поле не проникает. Оно сосредоточено в промежутках между противоположно заряженными трубками. Направление электрического поля в соседних трубках противоположное. Длина трубок выбирается исходя из условия, чтобы за время пролета от одного промежутка к соседнему электрическое поле изменило свое направление на противоположное и, следовательно, во втором промежутке сделалось таким, каким ранее было в первом. Это условие аналогично условию резонансного ускорения в циклотроне.

Мы уже знаем, что электрическое поле изменяет свое направление за время, равное половине периода $\frac{T_0}{2}$ изменения переменного напряжения. Следовательно, длина трубки l связана

с периодом изменения ускоряющего поля T_0 простым (резонансным) соотношением:

$$l = v \frac{T_0}{2},$$

где v — скорость частицы.

Длина трубки пропорциональна скорости частиц и периоду ускоряющего поля. Для того чтобы ускоритель не был очень длинным, необходимо, чтобы произведение vT_0 было мало. Это можно достигнуть, применяя малые T_0 , т. е. очень коротковолновые генераторы (длина волны $\lambda = cT_0$, где c — скорость света) и ускоряя как можно более тяжелые частицы, чтобы v было мало.

В 1932 году были построены линейные ускорители, в которых ускорялись ионы ртути до энергии 1 мэв. Амплитуда разности потенциалов между трубками равнялась всего 50 киловольт, а длина волны 200 м.

Первые успехи в создании линейных резонансных ускорителей, к сожалению, очень долго оставались единственными. Это объяснялось двумя причинами: во-первых, радиотехника коротких волн не могла обеспечить необходимые мощности, во-вторых, было показано, что циклотрон и генератор Ван-де-Граафа обеспечивают ускорение протонов и электронов до таких больших энергий, о которых конструкторы линейных резонансных ускорителей в те годы и не мечтали.

В течение 12—14 лет в печати не появлялось сообщений об экспериментальных работах с резонансными линейными ускорителями. После войны положение резко изменилось. Развитие радиотехники на ультракоротких волнах в связи с нуждами радиолокации позволило подойти к решению вопроса совсем по-иному. Была также разработана точная и подробная теория движения частиц в линейных ускорителях. Этому способствовало применение в линейных ускорителях принципа автофазировки, открытого В. И. Векслером (1944 г.) и Э. Мак-Милланом (1945 г.).

Современные линейные протонные ускорители не отличаются принципиально от своего прототипа. Разница состоит лишь в способе создания ускоряющего электрического поля между трубками. Длина волны λ в линейных ускорителях обычно берется 1,5 м. Такая небольшая длина волны позволяет воспользоваться для создания ускоряющего поля волноводом или резонатором. Отдельные пролетные трубки не соединяются уже с клеммами генератора, а подвешиваются на специальных подпорах в центре большой трубы. Генераторы ускоряющего поля (магнетроны или клистроны) возбуждают внутри трубы стоячую электромагнитную волну, электрическое поле которой направлено вдоль пролетных трубок (электрическое поле внутри пролетных трубок не проникает).

В линейном ускорителе Калифорнийского университета в большой трубе диаметром 1,5 м и длиной 12 м расположены 46 пролетных трубок, длина которых возрастает пропорционально скорости протонов от 11 до 28 см. 12 магнетронов передают внутрь трубы через специальные петли электромагнитную импульсную мощность 2,1 мегаватт (3 раза в секунду по 600 микросекунд). Протоны впускаются в ускоритель с энергией 4 мэв (эту энергию они получают в генераторе Ван-де-Граафа); пройдя 12 м, они получают еще 28 мэв.

Начальная энергия в этом ускорителе (наиболее старой конструкции) выбрана слишком большой. В последнее время удастся начинать ускорение в линейном ускорителе с энергией 0,5 мэв или даже с еще меньшей.

Ускоритель Калифорнийского университета, построенный в 1948 году, успешно используется уже в течение восьми лет для исследований в области атомного ядра. Он обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с круговыми ускорителями на ту же энергию. Пучок ускоренных частиц легко выводится наружу, он достаточно моноэнергетичен, угловая расходимость мала. В указанном ускорителе диаметр ускоренного пучка протонов составляет 1 см, а угловая расходимость 3 минуты. Однако до сих пор не построены протонные линейные ускорители на большую энергию, хотя уже сообщалось о плане их строительства. Это объясняется тем, что линейные ускорители очень дороги в эксплуатации из-за высокой стоимости и малого времени жизни мощных ламп, генерирующих электромагнитные волны. Кроме того, в линейных ускорителях не осуществляется условие естественной устойчивости движения частиц, как в круговых ускорителях. Приходится применять особые дополнительные меры, обеспечивающие такую устойчивость. В протонных ускорителях на энергию 10—30 мэв на входах каждой пролетной трубки надевают специальную сетку. Эта сетка так изменяет конфигурацию электрического поля в промежутке между трубками, что движение становится устойчивым. Однако много протонов, попадающих на нити сетки, теряется из пучка.

Можно создать устойчивость движения без сеток, с помощью сильного продольного магнитного поля. Но тогда стоимость линейного ускорителя чрезвычайно возрастет. По-видимому, многообещающим является использование квадрупольных линз, в которых используется метод сильной фокусировки. Это предложение было выдвинуто сравнительно недавно, поэтому еще рано выносить окончательное суждение о его практической ценности.

Если при создании протонных линейных ускорителей на сверхбольшие энергии пока возникают трудности, то электронные линейные ускорители уже в настоящее время достаточно хорошо разработаны.

Электронные линейные ускорители

При сооружении электронных линейных ускорителей учитывается способность электронов быстро наращивать свою скорость. Уже при энергии 2—3 млн. эв скорость электрона весьма близка к скорости света.

Для ускорения электронов обычно используют электромагнитные волны, возбуждаемые в полых металлических трубках с помощью высокочастотных генераторов-клистронов и магнетронов. Такие трубки называют волноводами. Длина волны электромагнитного поля, используемого в электронных ускорителях, обычно бывает очень малой, всего 10 см. В полых металлических трубках может распространяться электромагнитная волна, у которой направление электрического поля либо совпадает с направлением распространения (положительная полуволна), либо прямо противоположно ему (отрицательная полуволна).

Если электрон попадает в положительную полуволну, то он будет ускоряться, если в отрицательную, то замедляться.

Рассмотрим сначала один электрон, попавший из источника в положительную полуволну. Если скорость электрона равна



Рис. 16. Волновод, нагруженный диафрагмами для уменьшения фазовой скорости распространения электромагнитной волны.

скорости движения положительной полуволны (эта скорость называется фазовой скоростью волны), то ускорение будет происходить непрерывно. Следовательно, для обеспечения непрерывного (резонансного) ускорения мы должны рассчитать изменение скорости электрона и в соответ-

ствии с этим построить волновод так, чтобы скорость волны в каждой точке равнялась скорости данной частицы.

Влиять на скорость волны в волноводе можно с помощью специальных диафрагм, вводимых в волновод. Фазовая скорость волны в гладком волноводе без диафрагмы всегда больше скорости света. Чем меньше отверстие в диафрагме, тем сильнее можно замедлить волну. Диафрагмы не только замедляют волну, но также ее рассеивают и приводят к дополнительным потерям мощности в стенках диафрагм (рис. 16). Поэтому волну без существенных потерь мощности можно замедлить лишь до скорости света или несколько меньших скоростей. Это вполне достаточно для ускорения электронов и не подходит для ускорения протонов или более тяжелых ядер.

Таким образом, в линейном ускорителе некоторое количество электронов все время будет двигаться со скоростью волны и непрерывно ускоряться. Конечно, будут ускоряться и электроны, двигающиеся с другой скоростью. Действительно, в линейном

ускорителе будет также действовать принцип автофазировки, так что скорость частиц в среднем станет равной скорости волны. Например, пусть частица, двигающаяся со скоростью волны, находится несколько правее максимума положительной полуволны. Такая частица называется синхронной. Отставшие частицы будут ближе к вершине волны, на них действует более сильное электрическое поле, их энергия и скорость быстро возрастают и они догоняют синхронную частицу. Наоборот, частицы, обогнавшие синхронную, попадут в более слабое ускоряющее поле, и синхронная частица их догонит.

Принцип автофазировки будет действовать до тех пор, пока скорость электронов практически зависит от энергии. При больших энергиях электроны двигаются почти с одной и той же скоростью, весьма близкой к скорости света. Автофазировка не действует, но оказывается, что она и не нужна, если скорость электромагнитной волны равна в точности скорости света.

Действительно, в этом случае все частицы и волна двигаются с одной скоростью, и электроны не могут покинуть положительную часть полуволны.

Самый большой действующий электронный ускоритель построен в Станфорде (США). Волновод ускорителя представляет собой трубу диаметром 7,5 см и длиной 60 м. Волновод возбуждается 60 раз в 1 секунду на 2 микросекунды синхронно работающими клистродами, расположенными через 3 м, общей импульсной мощностью 200 мегаватт.

Электроны впускаются в ускоритель с энергией 80 кэВ и, пройдя 60 м, получают энергию 600 мэВ. В каждом импульсе (2 микросекунды) ускоряются 100 миллиардов электронов.

Фокусировка электронов осуществляется только на начальной части волновода небольшим магнитным полем. В дальнейшем фокусировка не требуется, так как электрон настолько быстро ускоряется, что не успевает отойти от оси трубы.

Электронные линейные ускорители на энергию 6—15 мэВ выпускаются многими фирмами; они весьма удобны в обращении и дают значительно большую интенсивность, чем бетатроны или синхротроны на такую же энергию.

Линейные ускорители используются не только для научных исследований, но и в технике для просвечивания толстых металлических изделий и выявления скрытых дефектов, для стерилизации пищевых продуктов.

В медицине электронные ускорители применяют для лечения глубинных злокачественных опухолей и исследования лучевой болезни на животных.

Линейные электронные ускорители на очень большую энергию, несомненно, перспективны, так как излучение электронов в них не столь велико, как в синхротронах и бетатронах.

Обычно линейные ускорители—электронные и протонные—работают импульсами. Это связано с тем, что большие высоко-

частотные мощности, необходимые для ускорения частиц до больших энергий, можно относительно просто получить от импульсных генераторов электромагнитных волн.

При ускорении протонов или дейтронов в линейных ускорителях до не очень больших энергий, по-видимому, можно воспользоваться непрерывными источниками мощности. В 1955 году сообщалось о строительстве в Калифорнийском университете (США) непрерывно работающего линейного ускорителя дейтронов на энергию 7 мэв. Ожидаемый средний ток дейтронов будет составлять 0,5 ампера. Это означает, что средняя мощность ускоренного пучка протонов будет составлять 3500 квт. В настоящее время на первой секции подобного ускорителя получен средний ток протонов 0,5 ампера при энергии 0,5 мэв. Наличие такого большого тока ускоренных частиц, в сотни раз превышающего ранее достигнутый, открывает перед физиками новые возможности в исследовании атомного ядра.

Задача получения больших токов ускоренных протонов или электронов в последнее время широко обсуждается. Как мы указали, некоторыми возможностями в этом направлении обладают линейные ускорители. Относительно большого тока при больших энергиях ускоренных частиц можно достигнуть и на кольцевом фазотроне; однако следует обсудить, не существует ли каких-либо других путей получения интенсивного пучка ускоренных частиц, помимо указанных выше.

Можно ли повысить предел энергии в циклотроне без использования принципа автофазировки

Мы видели, какие широкие возможности открыл принцип автофазировки в применении к ускорителям. Пока сейчас нет другого способа, который позволил бы далеко и сравнительно просто продвинуться в область больших энергий.

Однако способ автофазировки предусматривает циклическую работу ускорителя: частицы захватываются в режим ускорения, ускоряются, выпускаются, а затем цикл повторяется снова. Ускоренные частицы поступают через интервалы времени порядка 0,01 секунды в синхротронах, бетатронах и фазотронах и через 5 — 10 секунд в синхрофазотронах. В то же время в циклотроне процесс захвата, ускорения и выпуска происходит одновременно и частицы из ускорителя выходят почти непрерывной струей. По этой причине средняя интенсивность ускоренных частиц в циклотроне значительно выше (в 1000 — 10 000 раз), чем в фазотроне, не говоря уже о других ускорителях. Поэтому всякое, даже не очень сильное, повышение предела достижимых энергий в циклотроне может оказаться полезным. Для того чтобы повысить предельную энергию в циклотроне, следует обеспечить постоянство периода обращения иона и устойчивость движения. Таковую работу впервые предпринял Томас, который еще в

1938 году предложил обеспечить постоянство периода обращения частиц в циклотроне за счет роста магнитного поля вдоль радиуса пропорционально росту массы частицы:

$$H(R) \propto mc^2 = (E_0 + W(R)),$$

где E_0 — энергия покоя, а $W(R)$ — кинетическая энергия протона в зависимости от радиуса орбиты R . Однако в этом случае показатель магнитного поля $n < 0$, так как поле возрастает с ростом радиуса. Появившуюся при этом вертикальную неустойчивость Томас предложил компенсировать, сделав магнитное поле зависящим от азимута. Эффект фокусировки, предложенный Томасом, отличается от метода сильной фокусировки: он связан с действием азимутальной составляющей магнитного поля на искаженную орбиту.

Только через 15 лет после появления работы Томаса в Калифорнийском университете была сделана первая попытка проверить его идею, используя для создания устойчивости также и метод сильной фокусировки. Эксперимент прошел успешно, показав правильность основных положений Томаса.

Недавно было обращено внимание (Е. М. Мороз, М. С. Рабинович) на то, что можно сохранить период обращения протонов в циклотроне постоянным, несмотря на рост массы в однородном или даже спадающем по радиусу магнитном поле. Для этого следует сделать магнит разрезным, введя в него участки без магнитного поля. Тогда период обращения по орбите будет равен:

$$T_0 = \frac{2\pi E}{ecH} + \frac{L}{v},$$

где L — длина всех прямолинейных промежутков. Действительно, выражение для периода обращения в магнитном поле совпадает с первым членом в правой части формулы. Если имеются участки без магнитного поля, то время движения по ним равно $\frac{L}{v}$. Считая T_0 постоянной величиной, можно найти зависимость длины L прямолинейного промежутка от скорости (или, что то же самое, от радиуса орбиты R , так как радиус и скорость в магнитном поле однозначно связаны). Таким образом, можно повысить предел достижимой энергии в циклотроне до нескольких сот миллионов эв. Этот пример показывает, что резервы, имеющиеся в циклотроне, еще не исчерпаны.

Поиски новых методов ускорения

Успехи ускорительной техники за последние годы очень велики. За сравнительно короткое время достигнуты колоссальные энергии, о которых 10 лет тому назад не могли мечтать даже люди с очень богатой фантазией. В настоящее время ученые уже не сомневаются в том, что недалек день, когда будут достигнуты энергии еще в сотни и тысячи раз большие.

В одной из своих последних лекций знаменитый физик Энрико Ферми в шуточной форме говорил об ускорителе протонов на энергию 10^{19} эв (10 миллионов миллиардов). Кольцевой

магнит такого ускорителя должен был бы опоясывать земной шар по экватору.

Эти слова предупреждают о том, что нужно осторожно относиться к прогнозам на будущее.

Значительная часть продвижения вперед по шкале энергий была достигнута путем увеличения размеров и стоимости машин, а не за счет новых идей. В настоящее время от техники взято все, что она может дать.

Дальнейший существенный прогресс ускорительной техники возможен лишь при изобретении новых методов ускорения. Использование сильной фокусировки позволит увеличить предел достижимых энергий в несколько раз. Найти новые эффективные методы ускорения очень трудно.

В последнее время в Физическом институте имени П. Н. Лебедева АН СССР под руководством В. И. Векслера и в Московском физическом институте АН СССР под руководством Г. И. Будкера разрабатываются два новых метода ускорения. Об этих методах В. И. Векслер, Г. И. Будкер и А. А. Наумов рассказывали на Московской и Женевской конференциях по физике частиц большой энергии и ускорителям (май — июнь 1956 года).

Когерентный метод ускорения пучков частиц В. И. Векслера

Во всех рассмотренных выше установках ускоряющее электрическое поле создается каким-либо внешним источником. Поэтому в первом приближении сила, действующая на ускоряемые частицы, не зависит от числа частиц в пучке.

Существенной особенностью нового метода является то, что сами ускоряемые частицы участвуют в создании ускоряющего поля. Поэтому поле имеет всегда нужную величину и направление. Сила, действующая на одну частицу, будет зависеть не только от мощности внешнего источника, но и от числа ускоряемых частиц. В ряде случаев сила, действующая на одну частицу, оказывается пропорциональной числу ускоряемых частиц. Поэтому этот метод получил название когерентного по аналогии с известными оптическими явлениями, когда каждый из двух когерентно работающих источников излучает в два раза больше энергии, чем при отсутствии своего соседа.

Существует несколько конкретных схем осуществления когерентного метода ускорения. Рассмотрим следующий пример. Пусть в нашем распоряжении имеется пучок электронов с энергией 1 мэв. С помощью этого пучка можно ускорить протоны до энергии в 1840 раз большей. Пусть пучок электронов падает на сгусток протонов. Под действием кулоновского поля пучок электронов будет тянуть за собой протоны, пока скорость первых больше скорости вторых. А так как масса протона

в 1840 раз больше массы электрона, то их скорости сравняются, когда энергия протонов будет в 1840 раз больше энергии электронов.

Если бы протонов было мало, то сила, действующая на них со стороны электронов, также была мала. Если же в сгустке протонов содержится $10^{11} - 10^{13}$ частиц, то поле протонов деформирует пучок электронов, так что сила возрастает в $10^{11} - 10^{13}$ раз.

Осуществление этого метода позволит получать мощные сгустки протонов с большой энергией и этим самым решить задачу существенного увеличения интенсивности в ускорителях.

В другой схеме когерентного метода можно производить ускорение даже в целом нейтральных (но ионизированных) сгустков вещества.

Когерентный метод еще не изучен до конца, и многие его стороны до сих пор не выяснены. Дальнейшая работа покажет, перспективен ли этот способ ускорения сгустков частиц.

Релятивистский стабилизированный электронный пучок Г. И. Будкера

Колоссальные размеры и стоимость ускорителей определяются главным образом трудностью получения больших магнитных полей, превышающих 15 тыс. эрстед, и относительно слабой фокусировкой частиц. Г. И. Будкеру удалось найти способ, который в принципе позволит решить эти две проблемы одновременно.

При ускорении электронов в бетатроне по орбите циркулирует электронный ток. Обычно величина этого тока не превышает 1 ампера. Однако если величина тока электронов достигнет, скажем, 1000 ампер, то возникнет ряд новых интересных явлений. Ионы остаточного газа камеры сначала нейтрализуют отталкивающие силы, действующие между электронами, а затем создадут силы, направленные к оси тока. Возникающее мощное излучение сильно сожмет пучок, превратив его в тонкую круговую нитку. Бетатронное электрическое ускоряющее поле будет компенсировать потери энергии электронов на излучение.

Если указанный ток создают, например, электроны с энергией 15 мэв, обращающиеся в магнитном поле 500 эрстед по окружности с радиусом 1 м, то при компенсирующем электрическом поле 1 вольт/см пучок сожмется в тонкую нить с диаметром 0,08 мм. Получающаяся при этом плотность тока колоссальна и составляет 200 тыс. ампер на 1 мм².

При такой большой плотности тока на его поверхности возникнет колоссальное магнитное поле, в данном случае равное 50 тыс. эрстед. На оси пучка действует лишь внешнее поле 500 эрстед. Мы видим, что в сечении тока на длине 0,04 мм напряженность магнитного поля изменяется в 100 раз.

Спрашивается, нельзя ли использовать это колоссальное магнитное поле для ускорения протонов? Для этой цели нужно впустить протоны внутрь электронного пучка и ускорять их одним из известных способов с помощью резонансного ускоряющего устройства. Энергия протонов в таком ускорителе могла бы возрасти почти до 1000 мэв, причем радиус орбиты протонов увеличился бы всего на 0,04 мм.

Возникает сомнение, будет ли в этом случае обеспечена устойчивость движения. Сильно возрастающее по радиусу и однородное по азимуту магнитное поле создает вертикальную неустойчивость. Поэтому во всех круговых ускорителях (с обычной фокусировкой) показатель магнитного поля n должен быть меньше 1. Если подсчитать показатель n в данном случае, то он может достигать 1 млн. Тем не менее в рассматриваемом примере будет сильная вертикальная и радиальная фокусировка. Это объясняется тем, что ускорение происходит не в пустоте, а внутри электронного тока. Оказывается, что внутри тока не существует условия устойчивости типа $0 < n < 1$.

Таким образом, электронный пучок при больших токах и энергиях создает мощное магнитное поле, обеспечивающее одновременно сверхсильную фокусировку. Можно показать, что фокусировка в этих ускорителях будет в 1000 раз больше, чем в сильнофокусирующих ускорителях с показателем n порядка 500. Следовательно, если удастся создать стабилизированный пучок электронов, то он с успехом может быть использован для ускорения протонов.

Г. И. Будкер приводит следующий пример: при токе электронов 10 тыс. ампер, радиусе орбиты 3 м и энергии электронов 15 мэв можно ускорить протоны до 100 млрд. эв.

Ускоритель, использующий стабилизированный пучок электронов, будет, конечно, по своим размерам в сотни раз меньше даже сильнофокусирующего ускорителя. Но, к сожалению, проблема получения больших токов электронов с относительно высокой энергией не решена до сих пор. Г. И. Будкеру и А. А. Наумову удалось пока получить ток 10 ампер при энергии электронов 3 мэв, и они надеются получить на своей установке ток электронов порядка 100 ампер с энергией порядка 10 мэв.

Это позволит проверить правильность основных теоретических расчетов, относящихся к устойчивости самого электронного пучка.

Безусловно, развитие работ по стабилизированному электронному пучку представляет большой научный и практический интерес.

ЛИТЕРАТУРА

В. И. Векслер. — Ускорители атомных частиц. Изд-во АН СССР. 1956.

М. С. Ливингстон. — Ускорители. Изд-во иностранной литературы. 1956.

Доклады советских и иностранных ученых на Московской (май 1956) и Женевской (июнь 1956) конференциях по физике частиц большой энергии и ускорителям:

1. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по физике частиц высокой энергии. Изд-во Академии наук СССР. Москва. 1956.

2. Symposium on High Energy Accelerators and Pion Physics. Proceedings CERN (European Organization for Nuclear Research), Vol. 1, 1956.

★ К ЧИТАТЕЛЯМ ★

Издательство «Знание» Всесоюзного общества
по распространению политических и научных
знаний просит присылать отзывы об этой брошюре
по адресу: Москва, Новая площадь, д. 3/4.



Автор
Матвей Самсонович Рабинович

Редактор **И. Б. Файнбойм**
Техн. редактор **М. И. Губин**
Корректоры
Л. С. Малышева и В. М. Сергеева

A01359 Подписано к печати 28/II 1957 г. Тираж 50000 экз. Изд. № 88
Бумага 60 × 92¹/₁₆ — 1,5 бум. л. = 3 п. л. Учетно-изд. 2,85 л. Заказ № 2536

Министерство культуры СССР
Главное управление полиграфической промышленности
Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова.
Москва, Ж-54, Валовая, 28.

В МАГАЗИНАХ КНИГОТОРГА
МОЖНО ПРИОБРЕСТИ

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ АТЛАСЫ:

- Атлас СССР книжного формата Ц. 28 р.
Атлас СССР карманного типа Ц. 15 р.
Атлас для учителей средней школы Ц. 40 р.
Географический атлас для начальной школы Ц. 1 р. 70 к.
Географический атлас для 5—6-го классов средней школы Ц. 8 р. 45 к.
Географический атлас СССР для 7—8-го классов средней школы Ц. 11 р.
Географический атлас для 9-го класса Ц. 11 р.
Атлас истории средних веков Ц. 10 р.
Атлас истории СССР, части 1, 2, 3-я.
Комплекты контурных карт для 6, 7, 8, 9-го классов.

Перечисленные атласы покупайте в магазинах книготоргов.

При отсутствии атласов в местных книжных магазинах их можно выписать «Книга — почтой» по адресу: Москва, Е-116, Энергетическая ул., 8, корпус 2. Магазин № 104 Москниготорга.

ГЛАВКНИГОТОРГ
МИНИСТЕРСТВА КУЛЬТУРЫ СССР