

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКПРОТОННЫЙ СИНХРОТРОН*Е. Дж. Лофгрин *)*

В 1910 и 1911 гг. Гейгер и Марсден выполнили ряд опытов с целью исследования строения атома. Они пропускали узкий пучок α -частиц через тонкую золотую фольгу и наблюдали распределение по направлениям α -частиц, выходящих из фольги. Большинство частиц испытывало рассеяние на малые углы. Однако некоторое число частиц отклонялось на очень большие углы (около 0,01% α -частиц отклонялось на углы, превышающие 90°). Этот результат находился в полном противоречии с любым представлением о непрерывном строении атома, например, с представлением об однородном распределении положительного заряда, в который вкраплены электроны. Резерфорд предложил совершенно иную модель атома, в которой положительный заряд и большая часть массы сосредоточены в центральной сфере с радиусом, равным одной десятой радиуса всего атома. Происходящее в редких случаях тесное сближение падающих частиц с этим центральным ядром приводит к большим отклонениям. Таким образом, можно было количественно объяснить опыты Гейгера и Марсдена. Это было началом современных теорий о строении атомов и ядер. С тех пор, а особенно после 1930 г., один из основных методов исследования строения ядра и его свойств состоял в бомбардировке ядра пучками различных частиц. Перечисление ведущих идей ядерной физики выходит за рамки этой статьи. Её целью является описание способов получения бомбардирующих частиц. Естественными источниками частиц большой энергии, кроме космического излучения, являются альфа- и бета-излучения радиоактивных веществ. α - и β -частицы обладают энергиями порядка нескольких миллионов электрон-вольт. По мере развития ядерных исследований возникла необходимость получения частиц с большими энергиями, а также быстрых частиц иной природы. Экспериментальные исследования в значительной мере наталкивались на ограниченные возможности контроля над направлением, интенсив-

*) E. J. Lofgren, Science 111, 235 (1950). Перевод В. А. Троицкой.

ностью и энергией быстрых частиц от естественных источников. С целью увеличить возможности эксперимента был разработан ряд ускорителей частиц. В таблице I перечислены основные из этих ускорителей. К первой половине тридцатых годов разработка первых трёх типов ускорителей была доведена в ядерной физике до степени успешного применения. Конструкция бетатрона была завершена в 1940 г. Следующие три ускорителя были освоены в 1946, 1947 и 1948 гг. Конструкции всех этих машин продолжают совершенствоваться и в настоящее время. Так как с их помощью можно ускорять различные частицы и получать различные интервалы энергий и интенсивности при различной степени контроля, то каждая из этих установок скорее дополняет, чем заменяет предшествующую. По мере развития исследований природы космического излучения, сделавших особенно большие успехи за последние годы, выяснилось, что космическое излучение является богатым источником быстрых частиц, пригодных для ядерных исследований. Изучение космического излучения привело к открытию положительного электрона, обнаружению семейства мезонов и дало экспериментальное подтверждение некоторых положений электродинамики. Частицы космического излучения могут обладать энергиями вплоть до 10^{16} — 10^{17} электрон-вольт (если предполагать, что широкие ливни Оже вызываются отдельной первичной частицей). Первичные частицы космического излучения падают из мирового пространства на границу земной атмосферы в количестве, равном примерно 0,6 частицы на см^2 в секунду. Они являются главным образом протонами. Недавно было показано, однако, что небольшой процент этих частиц представляет собой ядра различных элементов, занимающих в периодической таблице места вплоть до её середины. Проходя через атмосферу, эти частицы сталкиваются с ядрами атомов воздуха и расходуют свою энергию на взаимодействие с уже существующими частицами и на создание новых частиц. Таким образом, прохождение космического излучения через атмосферу Земли представляет собой осуществлённый в огромном масштабе самой природой опыт по изучению взаимодействия быстрых частиц с веществом. Для того чтобы упростить условия такого опыта и иметь возможность менять и контролировать его по желанию экспериментатора, необходимо найти способ получения в лабораторных условиях частицы с энергией, близкой к той, которую они имеют в космическом излучении. Интенсивность таких искусственно созданных частиц будет значительно превышать интенсивности, которыми экспериментатор может воспользоваться в космическом излучении. Проектируемый в настоящее время протонный циклотрон должен явиться источником таких частиц; он сможет создавать пучки частиц с энергиями от 1 до 6 *Бэв* (1 *Бэв* = 10^9 эв). Средняя энергия частиц первичного космического излучения равна 10 *Бэв*.

Таблица I

Тип ускорителя	Частица	Наибольшая энергия, достигнутая в действующих установках (в Мэв)	Наибольшая энергия, которая будет достигнута в строящихся установках (в Мэв)	Примечания
Электростатический ускоритель	Любая заряженная частица	5	12	Возможен точный контроль энергии и степени коллимации пучка. Применение ограничено небольшим интервалом энергий, так как ускорение происходит один раз
Выпрямители или трансформаторы	Любая заряженная частица	2	.	Установка аналогична электростатическому ускорителю
Циклотрон	p d e	10 20 40	30	Надёжный и экономичный ускоритель в среднем интервале энергий. Применение ограничено областью энергий порядка нескольких десятков Мэв вследствие релятивистского возрастания массы
Бетатрон	e	100	300	Применим только для электронов. Простая машина в области средних энергий. Её использование ограничено вследствие потерь на излучение, достигающих нескольких сотен Мэв.
Синхроциклотрон	p d α	350 190 380	450	В этой установке ограничение для энергий, имеющее место в циклотроне. Установка становится неэкономичной при энергиях свыше 500 Мэв. Интенсивность пучка меньше, чем в циклотроне

Продолжение

Тип ускорителя	Частица	Наибольшая энергия, достигнутая в действующих установках (в Мэв)	Наибольшая энергия, которая будет достигнута в строящихся установках (в Мэв)	Примечания
Линейный ускоритель	р е	32 25	66 1000	Предела для энергии нет. Его преимущество перед магнитными машинами состоит в том, что пучок выходит хорошо коллимированным с малым разбросом по энергии
Синхротрон	е	335	1000	Наибольшая энергия увеличена по сравнению с бетатроном
Протонный синхротрон	р	6½	3500	Предел энергий ограничен из-за экономических соображений, но он выше, чем в синхротроне

Таким образом, с помощью этой машины можно будет с успехом достигнуть нижних пределов энергий частиц космического излучения. Однако верхний предел их энергий в миллион раз больше того предела, который может быть достигнут в конструируемых в настоящее время ускорителях. Величина предельной энергии, которую частицы могут приобрести в циклотроне, ограничена релятивистским возрастанием массы частиц по мере их ускорения. Это легко показать следующим образом. Ион в однородном постоянном магнитном поле в B гаусс движется по круговой траектории с радиусом r , определяемым из равенства

$$Br = \frac{v}{\frac{e}{m}},$$

где $\frac{e}{m}$ — отношение заряда к массе для иона, а v — скорость.

Отсюда для времени одного оборота можно написать:

$$t = \frac{2\pi}{\frac{e}{m} \cdot B}.$$

В нерелятивистской области эта величина является существенно постоянной. Переменное электрическое поле частоты $\frac{1}{t}$, приложенное к дуантам циклотрона, ускоряет ионы каждый раз, когда они проходят пространство между дуантами, если только эти ионы начали двигаться в соответствующей фазе.

Изменение массы со скоростью происходит по закону $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$, где m_0 — масса иона, находящегося в покое, а β — отношение скорости частицы к скорости света. Если частица ускоряется до скорости, равной половине скорости света (энергия протона, движущегося с такой скоростью, будет равна примерно 150 Мэв), то её масса будет на 15% больше массы покоя, а время t на 15% больше, чем время, затрачиваемое на первый оборот. При этих условиях ионы разойдутся по фазе с ускоряющим полем и не будут ускоряться. Это затруднение было обойдено теорией синхротрона (ускорителя электронов), а также теорией синхроциклотрона (ускорителя протонов), разработанной независимо друг от друга Векслером¹¹, Мак-Милланом⁶ и Олифантом⁷. Эти теории показывают, что в некоторых условиях ион, движущийся в магнитном поле, будет обладать стабильной фазой. Рассмотрим ион, энергия которого находится в крайнем релятивистском интервале энергий. Пусть он движется по кругу радиуса r в однородном магнитном поле и пусть, как и раньше, между дуантами существует поле высокой частоты. Предположим, что фаза иона такова, что при прохождении ионом пространства между дуантами ускоряющее поле равняется нулю, тогда как предыдущее прохождение ионом этого пространства сопровождалось ускорением. Радиус траектории определяется соотношением

$$r = \frac{\sqrt{E^2 - E_r^2}}{300 B},$$

где $E = E_k + E_r$ — полная энергия, E_r — энергия покоя, равная для протонов 935 Мэв, E_k — кинетическая энергия.

Выражение для радиуса может быть переписано в виде

$$r = \frac{\sqrt{E_k^2 + 2 E_k E_r}}{300 B}.$$

Если E_k велико по сравнению с E_r , то приближённо

$$r = \frac{E_k}{300 B}.$$

Таким образом, в релятивистской области скорость иона приближается к скорости света и радиус его траектории пропорционален энергии. Более ранний подход иона к зазору приводит к тому, что он приобретает большую энергию и движется по кругу увеличенного радиуса. Его скорость при этом увеличивается незначительно, и следовательно, в следующий раз ион позже пересечёт пространство между дуантами. С другой стороны, если частица запоздает, то она замедлится, пройдёт по более короткому пути и в следующий раз придёт к зазору во-время. Если фаза частицы нарушена, то частица осциллирует около стабильной фазы и не приобретает энергии при прохождении через зазор. Приведённое рассуждение показывает, что у релятивистской частицы может существовать устойчивая орбита в магнитном поле. Эти доводы в пользу существования стабильности фазы несправедливы для малых энергий. В этом случае стабильность может быть достигнута радиальным уменьшением магнитного поля. Такое уменьшение желательно также для того, чтобы удерживать ускоряемые частицы в медленной плоскости магнитного поля. Если медленно изменять в нужном направлении величину магнитного поля, или частоту ускоряющего поля, или обе эти величины, то энергия частицы будет увеличиваться, а стабильность фазы будет такова, что приращение энергии за каждый оборот будет как раз достаточно для того, чтобы удерживать ион на стабильной орбите по мере изменения поля или частоты. Кроме фазовой осцилляции, которая мала по сравнению с частотой вращения, имеют место также радиальные и вертикальные колебания положения частицы, частота которых сравнима с частотой вращения. Они известны под названием бетатронных колебаний. На принципе стабильности фазы было сконструировано большое количество различных ускорителей. Эти ускорители различаются в зависимости от того, какие параметры в них изменяют. В ускорителе электронов, если электронам какими-либо другими способами сообщена энергия 2 Мэв или немногим больше, нет необходимости изменять частоту ускоряющего поля, потому что в этом случае они обладают 98% своей предельной скорости. Магнитное поле увеличивают со временем для того, чтобы обеспечить постоянство радиуса орбиты. Вакуумная камера имеет тороидальную форму, а магнитное поле заполняет кольцевое пространство. Эта машина и есть синхротрон. Для ускорения тяжёлых ионов существует два способа. При одном из них магнитное поле постоянно и конфигурация его такая же, как в циклотроне. В этом типе ускорителя источник ионов расположен в центре, и ускоряющие дуанты такие же, как в циклотроне. Однако по мере возрастания массы ионов и увеличения их периода обращения частота ускоряющего напряжения уменьшается. Радиус орбиты увеличивается, так что вся траектория представляет собой расширяющуюся спираль. Такой ускоритель

ионов называется синхроциклотроном*). По мере увеличения размеров синхроциклотронов выяснилось, что экономическим пределом являются установки, дающие частицы с энергиями порядка 500—1000 Мэв. Этот предел обусловлен главным образом очень большими размерами магнитов, необходимых для этих ускорителей. Остается ещё, однако, второй способ, который заключается в одновременном изменении частоты и магнитного поля. Радиус орбиты можно поддерживать постоянным и применить для ускорителя кольцевой магнит, который значительно дешевле, чем соответствующий магнит циклотронного типа.

В настоящее время строятся три таких протонных синхротрона. Один из них (Бирмингемский университет, Англия) рассчитан на 1,3 Бэв. Другой, строящийся в национальной лаборатории в Брукгавене, будет ускорять протоны примерно до 3 Бэв и носит название космотрона. Третий, строящийся в Беркли, будет вначале давать протоны с энергией $3\frac{2}{3}$ Бэв, но в нём предусмотрено такое видоизменение конструкции, чтобы он давал протоны с энергией 6 Бэв. Эта машина была названа беватроном. Единственным физическим пределом энергий, даваемых этим классом ускорителей, является предел, накладываемый потерей энергии заряженной частицы, движущейся по круговому пути, на электромагнитное излучение. Для протонов этот предел настолько велик, что главным ограничением при конструировании такого ускорителя является стоимость установки, равная от одного до двух миллионов долларов на 1 Бэв. Подробная теория протонного синхротрона дана в литературе, указанной в конце статьи под номерами ⁸ и ¹⁰, а проекты конструкций описаны в статьях ¹ и ⁷. Основы конструкции Берклийского беватрона разработаны Бробеком¹. Магнит будет состоять из четырёх кольцевых 90-градусных сегментов, расположенных таким образом, что орбиты ионов представляют собой четверти окружностей, соединённые прямыми участками. Такое устройство магнита было впервые предложено Креном² для синхротрона, который он в настоящее время строит. В прямых участках вакуумной камеры между магнитными сегментами сделаны приспособления для откочки камеры, для ввода пучка, для установок ускоряющего электрода и для экспериментирования с пучком. Намагничивание производится мотор-генератором, на валу которого помещён большой маховик. При создании магнитного поля энергия, запасённая маховиком, переходит в энергию магнитного поля магнита. При уменьшении поля генератор действует как мотор и возвращает энергию маховику. Таким образом, мотор

*) Векслер, предложивший такой метод ускорения, назвал ускоритель такого типа фазотроном. В американской литературе он называется синхроциклотроном или циклотроном с модулированной частотой. (Прим. перев.)

восполняет потери, которые для каждого импульса достигают 40% запасённой энергии. Протоны должны вводиться из линейного ускорителя с начальной энергией 10 Мэв. Некоторые из установленных в настоящее время размеров беватрона приведены в первом столбце таблицы II.

Таблица II

	Данные запро- ектированного беватрона	Данные завер- шённой в настоящее время модели в $\frac{1}{4}$ от нату- ральной величины
Энергия протонов	$3\frac{2}{3}$ Бэв	$6\frac{1}{2}$ Мэв
Число протонов за импульс	10^{10} или боль- ше	$2 \cdot 10^8$
Частота импульсов	10 в минуту	18 в минуту
Радиус орбиты	14,5 м	3,4 м
Длина прямых участков	6 м	1,5 м
Размеры магнитного поля	в вертикальном направ- лении в радиальном направ- лении	24 см 88 см
Число оборотов в процессе ускорения	$3,8 \times 10^8$	$0,9 \times 10^8$
Расстояние, пройденное в процессе ускорения	—	—
Время ускорения	1,75 сек.	0,25 сек.
Максимальное магнитное поле	3800 гаусс	1000 гаусс
Вес магнита	10 000 т	150 т
Энергия, запасённая в магните	$8,3 \times 10^8$ дж	4×10^4 дж
Мощность установки, питающей магнит	6000 квт	30 квт
Радиочастота ускоряющего потенциала	от 0,37 до 2,5 Мгц	от 0,4 до 1,2 Мгц
Энергия инъекции	10 Мэв	0,7 Мэв

При разработке конструкции беватрона возникло опасение в степени правильности отдельных положений теории этой установки. В частности, до настоящего времени ни одна из ускорительных установок не работала с прямыми участками, предложенными Креном, и казалось вероятным, что какая-нибудь непредвиденная помеха вызовет колебания пучка ионов, достаточные для того, чтобы направить пучок к стенкам камеры. Возник также чрезвычайно важный вопрос о величине разумного поперечного сечения для применяемого магнитного поля. Было очевидно, что в проекте этой установки имелись положения, находившиеся в

противоречии друг с другом. При данных затратах на магнит и оборудование возбуждения можно было получить маленькую апертуру при большом поле, которая давала бы частицы большой энергии, но допускала бы лишь очень ограниченное отклонение от идеальных орбит ионов. С другой стороны, выбор большой апертуры снижает величину окончательной энергии частиц. Для того чтобы инжектированные ионы попали на свою орбиту, требуется применение электродов, которые должны быть расположены в камере, так что многие ионы будут неизбежно с ними

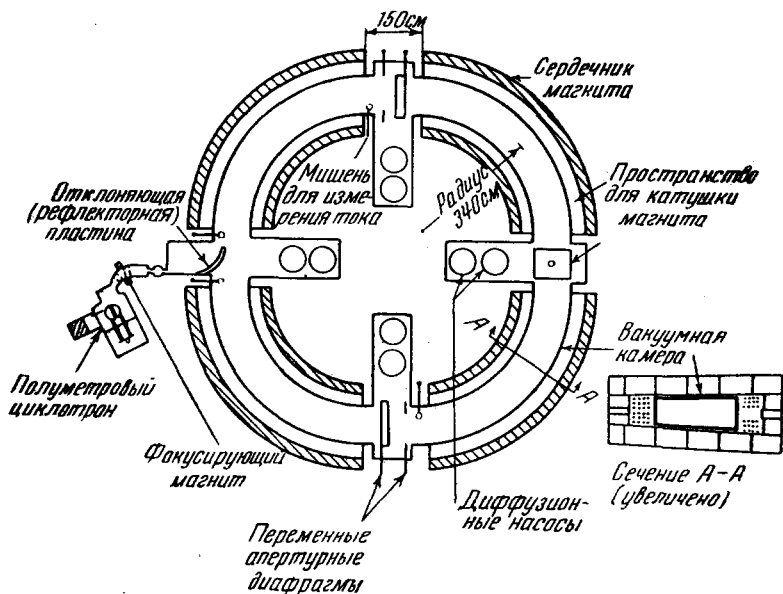


Рис. 1.

сталкиваться. Мы не были уверены в том, какие меры следует принять, чтобы избежать этих опасностей. Чтобы получить ответы на эти вопросы и научиться управлять подобной установкой, было решено построить рабочую модель величиной в $\frac{1}{4}$ от размеров окончательной установки. Так как почти все возможные затруднения должны были возникнуть сразу же после инжекции, то было решено, что ускорение порядка 6 Мэв будет достаточным. Это позволило значительно снизить стоимость магнита и оборудования возбуждения. Во втором столбце таблицы II даны основные размеры этой модели. Общее устройство показано на рис. 1. Для того чтобы уменьшить влияние токов Фуко, магнит был составлен из пластинок толщиной 1,25 см, разделённых бумажной

изоляции. По той же причине вакуумная камера собрана из пластинок нержавеющей стали толщиной 0,8 мм, соединённых в секции длиной 30 см, каждая из которых изолирована от других секций резиновой прокладкой. Атмосферная нагрузка снимается с камеры посредством стержней, соединённых с ярмом магнита. На рис. 2 показан общий вид установки с циклотроном в качестве инжектора на переднем плане. Протоны ускоряются до 0,7 Мэв в циклотроне, который работает в течение одной миллисекунды и запускается током магнита беватрона в тот момент, когда он достигает соответствующего значения. Ионы проходят



Рис. 2.

через фокусирующее магнитное поле и, после того как они попадают в область магнита беватрона, их траектории загибаются электрическим полем «отклоняющих» электродов так, что они начинают двигаться по траекториям, касательным к их орбитам в беватроне. По мере увеличения магнитного поля и при неизменной энергии ионов они начинают осциллировать вокруг круговых траекторий уменьшающегося радиуса. Прежде чем все они достигнут внутренней стенки камеры, ускоряющий электрод возбуждают с частотой, равной частоте обращения. Этот электрод расположен в прямолинейной области камеры, против инфлектора, и представляет собой медную трубку с открытыми концами, помещённую таким образом, что ионы могут проходить через неё. Энергия, сообщаемая протонам, равна изменению напряжения на электроде за время их прохождения через электрод, так как электрическое поле на обоих концах электрода противоположно

по знаку. В построенной модели беватрона протонам сообщается энергия порядка 40 эв за оборот, в согласии с магнитным полем, возрастающим на 4000 гаусс в секунду. Так как скорость ионов находится заведомо вне релятивистской области скоростей, то частота обращения пропорциональна импульсу частиц. При постоянном радиусе орбиты импульс частицы пропорционален магнитному полю. Поэтому используемая для ускорения радиочастота должна меняться так же, как меняется магнитное поле. Это изменение частоты осуществляется пропусканием части тока, питающего магнит, через индуктивность с ферромагнитным сердечником,

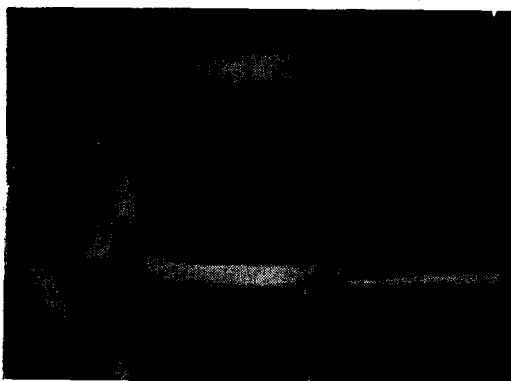


Рис. 3.

включённую в радиочастотную схему. Возрастающее насыщение сердечника по мере возрастания тока, текущего по обмотке магнита, уменьшает индуктивность и увеличивает частоту в цепи. Требуемый интервал частот простирается от 0,4 до 1,2 мегацикла в секунду. В течение примерно четверти секунды магнитное поле почти достигает предельного значения в 1000 гаусс, и протоны

приобретают энергию порядка $6 \frac{1}{2}$ Мэв. При выключении радиочастоты дальнейшее небольшое возрастание магнитного поля вызывает уменьшение радиуса орбиты, и ионы отклоняются на небольшую мишень, вводимую через внутреннюю стенку кольцевой камеры. На рис. 3 приведён след, полученный на осциллографе и показывающий историю одного импульса. В этом случае ускорение длится только 10 миллисекунд, так что может быть показан весь ход кривой. В первую очередь о мишень ударяются ионы, обладающие неправильным направлением или энергией. Из остающихся ионов ускоряются те, которые проходят через ускоряющий электрод в соответствующей фазе. Те ионы, которые обладают неправильной фазой, сразу же после включения радиочастоты увлекаются к мишени. В течение длинного пути, который ионы проходят в беватроне, они испытывают много столкновений с молекулами оставшегося в камере воздуха. Из таблицы II видно, что ионы в беватроне и его модели ускоряются в течение 1,75 и 0,25 сек. соответственно, тогда как в 184-дюй-

мовом синхроциклотроне они ускоряются в течение 0,002 сек. В результате большого количества таких столкновений, имеющих место в течение столь длительного ускорения и происходящих особенно часто сразу же после инжекции, когда энергия мала, происходит существенное ослабление пучка. Мы нашли, что увеличение давления на $1,7 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. привело к уменьшению интенсивности пучка на величину $\frac{1}{e}$. Эта ве-

личина согласуется в пределах ошибок теории и измерений с ожидаемыми потерями. Обычное рабочее давление равнялось $2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. На рис. 4 показано изменение интенсивности пучка при больших энергиях. Здесь величина окончательной энергии устанавливается изменением продолжительности ускоряющего радиочастотного импульса и регистрацией интегрального пучка, собираемого на мишени при постоянном инжектированном импульсе. Большая часть потерь происходит при энергиях 3 Мэв. На рис. 4

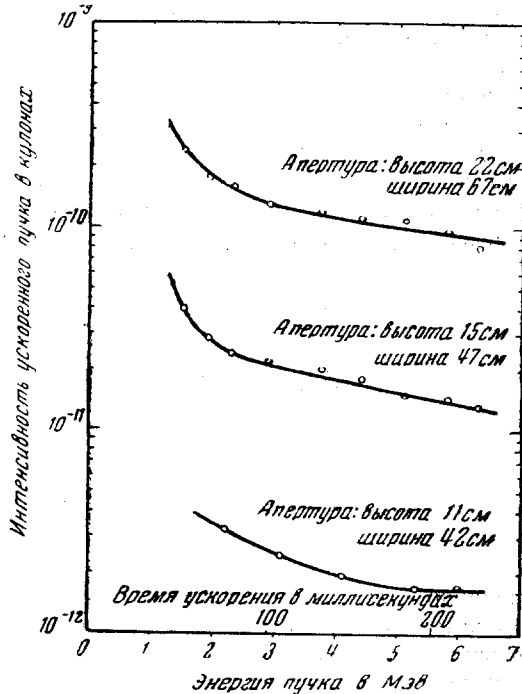


Рис. 4.

приведены данные для трёх поперечных сечений пучка, задаваемых апертурными диафрагмами, расположенными в двух прямых участках камеры. Средняя кривая по относительной величине сечения наиболее точно соответствует апертуре высотой 60 см и шириной 180 см, выбранной для беватрона натуральных размеров. Колебания ионов в беватроне в радиальном и осевом направлениях приблизительно определяются выражениями*) $f_r = \sqrt{1-n} f_0$; $f_a = \sqrt{n} f_0$, где $n = \frac{r}{B} \frac{dB}{dr}$ определяет радиальное уменьшение магнитного поля, а f_0 — частота обращения. Постоянная n равна 0,6.

*) Точные выражения более сложны, так как в них учитываются влияния прямых участков.

Отсюда видно, что обе частоты близки к частоте обращения. Очень важно, чтобы между этими частотами не было простого гармонического соотношения. Если бы такое соотношение существовало, то амплитуда одного из колебаний могла бы возрастать до тех пор, пока ионы не терялись бы в стенках камеры. Эти частоты были измерены в опыте, предложенном Креном, в котором в радиальном и аксиальном направлениях вакуумной камеры устанавливается радиочастотное поле. При соответствующей частоте это поле будет увеличивать колебания и разрушать пучок. Вычисленные частоты были подтверждены в этом опыте с точностью примерно до 1%: были обнаружены также некоторые представляющие интерес явления, которые, однако, до сих пор количественно не объяснены. Два из этих явлений касаются критического периода инжекции. Было обнаружено, что если накладываемое ускоряющее радиочастотное напряжение возрастает не

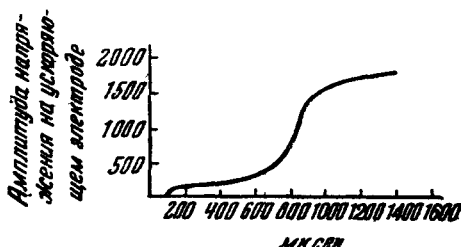


Рис. 5.

линейно или резким скачком, а так, как показано на рис. 5, то интенсивность пучка возрастает на 75%. Увеличение интенсивности пучка примерно на 100% наблюдалось также при выключении напряжения на отклоняющем электроде сразу же после инжекции. Наибольшая интенсивность пучка при размерах апертуры $9 \cdot 45 \text{ см}^2$ равнялась $3,5 \cdot 10^{-11}$ кулонов на импульс. Интенсивность инжектированного пучка, измеренного в конце отклоняющих электродов, равнялась 10^{-8} кулонам. В этом случае эффективность установки равнялась примерно $\frac{1}{3}\%$. В будущем беватроне потери, вызванные рассеянием в газе, должны быть пренебрежимо малы вследствие значительно большей энергии инжекции. Кроме того, камера беватрона должна быть в четыре раза выше камеры рабочей модели, тогда как размер отклоняющих электродов вовсе не будет изменён, и следовательно, вероятность того, что ионы после инжекции не попадут на отклоняющий электрод, увеличится. Поэтому естественно ожидать, что интенсивность частиц в беватроне натуральных размеров возрастёт по крайней мере на несколько процентов.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. W. M. Brobeck, Rev. Sci. Instr. **19**, 545 (1948).
 2. H. R. Crane, Phys. Rev. **69**, 542 (1946).
 3. J. S. Gooden, H. H. Jensen and J. L. Symonds, Proc. Phys. Soc. **59**, 667 (1947).
 4. Q. A. Kerns и др., Bull. Amer. Phys. Soc. **24**, 8 (1949).
 5. Lofgren и др., Bull. Amer. Phys. Soc. **24**, 8 (1949).
 6. E. M. McMillan, Phys. Rev. **68**, 143 (1945).
 7. M. L. Oliphant, J. S. Gooden and G. S. Hide, Proc. Phys. Soc. **59**, 667 (1947).
 8. D. C. Sewell и др., Bull. Amer. Phys. Soc. **24** (1949).
 9. Smith, Lloyd, A. A. Garren and L. R. Henrich, Bull. Amer. Phys. Soc. **24**, 8 (1949).
 10. R. Q. Twiss and N. H. Frank, Rev. Sci. Instr. **20**, 1 (1949).
 11. V. Veksler, J. Phys. USSR **9**, 153 (1945).
-