

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ГИГАНТСКИЙ ЦИКЛОТРОН С МОДУЛИРОВАННОЙ ЧАСТЬЮ
(ФАЗОТРОН)

В апрельском номере *Physical Review* опубликовано первое сообщение¹ о работе в Беркли гигантского 184-дюймового циклотрона и о первых экспериментах с дейтонами с энергией 200 MeV и α -частицами с энергией 400 MeV. История этого циклотрона весьма поучительна. Он был сконструирован Лоуренсом как ускоритель обычного типа, где релятивистское возрастание массы частиц компенсируется соответствующим увеличением электрического поля на дуантах. Как известно², максимальная энергия, достижимая в таком циклотроне, пропорциональна корню квадратному из амплитуды на дуантах. Поэтому предполагалось при запуске ускорителя для получения протонов с энергией 60 MeV и дейтонов с 100 MeV довести амплитуду на дуантах до 1—2 MeV³. Такое значение электрического поля требовало, конечно, наличия большого зазора в машине, что повышало и без того гигантские параметры машины. Перед войной был полностью построен гигантский магнит, весящий 4000 т⁴, и приступлено к оборудованию ускорительной части. Во время войны строительство циклотрона было приостановлено, а магнит использовался для разделения изотопов⁵.

В 1945 г. В. И. Векслер, используя открытый им ещё в 1944 г. принцип «автофазировки»⁶ (в американской литературе этот принцип называется «principle of phase stability»), показал, что при некоторых нежёстких условиях можно ускорить ионы до больших энергий путём медленного адиабатического изменения частоты, подводимой к дуантам. Общее необходимое изменение частоты складывается из изменения массы частицы при ускорении и из спадания магнитного поля к краю, обеспечивающего вертикальную фокусировку пучка. Скорость изменения частоты определяется с помощью решения уравнений Векслера⁶. С одной стороны, энергия, приобретаемая в среднем за оборот, V_{cp} определяется из следующего соотношения:

$$V_{cp} = -\pi \frac{d\omega}{dt} \frac{cH(r)}{K\omega^3(t)},$$

где

$$K = 1 + \frac{N}{1 - N\beta^2}, \quad \beta = \frac{v}{c}, \quad N = -\frac{d \lg H}{d \lg r};$$

H — магнитное поле на дуантах, ω — угловая частота. С другой стороны, интенсивность ионного пучка зависит от $\alpha = \frac{V_{cp}}{V_0}$, где V_0 — амплитуда

электрического поля на дуантах. Она максимальна¹ при α в окрестности 0,5. Это накладывает определённые требования на скорость модуляции частоты.

Осенью 1945 г. к аналогичным выводам пришёл Мак-Миллан⁷. Было решено переоборудовать 184-дюймовый циклотрон в фазотрон. Но прежде необходимо было разработать технические методы модуляции частоты и проверить принцип автофазировки на модели.

МОДУЛЯЦИЯ ЧАСТОТЫ МЕХАНИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Метод модуляции частоты был разработан Шмидтом⁸. Изложим вкратце содержание его работы. Модуляция может быть проведена двумя различными способами.

А) Электронные методы модуляции

Сущность этих методов состоит в том, что меняется частота генератора без изменения нагрузки последнего. Частота может быть изменена в достаточно широких пределах без применения каких-либо вращающихся деталей, например, с помощью реактивной лампы. Чтобы при изменении частоты не происходило значительного уменьшения амплитуды на ускоряющих электродах, система этих электродов должна иметь широкую резонансную кривую, следовательно, низкую добротность. Это является недостатком системы, ибо, чем выше добротность последней, тем больше амплитуда напряжения на дуантах.

В) Механические модулирующие системы

Сущность этих методов состоит в том, что меняются параметры систем ускоряющих электродов (дуантов), являющиеся нагрузкой генератора. При этом генератор сильно связан с нагрузкой, что приводит к изменению частоты генератора. Однако в отличие от первого способа здесь частота всё время совпадает с собственной частотой системы ускоряющих электродов, вследствие чего последняя может иметь узкую резонансную кривую, т. е. большую добротность. В этом преимущество механических методов частотной модуляции перед электронными.

Можно менять как ёмкость, так и индуктивность системы ускоряющих электродов. Удобнее менять ёмкость. Переменная ёмкость, как показано Шмидтом, может быть подключена к дуантам несколькими способами; некоторые из них изображены на рис. 1.

- а) Переменная ёмкость приключена непосредственно к дуанту.
- б) Переменная ёмкость на конце полуволновой коаксиальной линии.
- в) Две переменные ёмкости на концах двух полуволновых коаксиальных линий. Между ними четвертьволновой отрезок для крепления дуанта. (Авторами была использована схема б.)

Импеданс передающей линии определяется следующим уравнением:

$$Z = jZ_0 \operatorname{tg} \frac{\omega \cdot l_d}{c}, \quad (1)$$

где Z_0 — волновое сопротивление линии в омах ($Z_0 = 60 \ln \frac{r_2}{r_1}$, r_1 и r_2 — радиусы внутреннего и внешнего цилиндров), ω — угловая частота, l_d — расстояние в см от узла напряжения до данной точки, c — скорость, $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

Условия резонанса требуют, чтобы сумма индуктивного и ёмкостного импеданса равнялась нулю. Ёмкостный импеданс в случае *a* равен $Z_d = -\frac{j}{\omega(C_d + C_v)}$, где C_d — ёмкость дуантов в фарадах, а C_v —

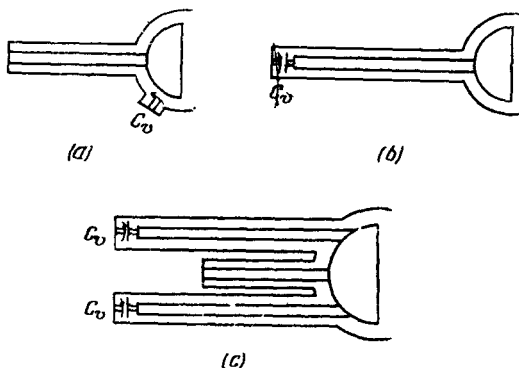


Рис. 1. Схемы включения переменного конденсатора в цепь дуанта.

переменная ёмкость. Следовательно, из условия $Z + Z_d = 0$ получаем:

$$\frac{1}{\omega(C_d + C_v)} = Z_0 \operatorname{tg} \frac{\omega \cdot l_d}{c}, \quad (2)$$

или, считая $\frac{\omega \cdot l_d}{c} \ll 1$, что для большинства практических случаев в циклотроне справедливо, получим, заменяя тангенс на его аргумент:

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{Z_0 l_d (C_d + C_v)}}. \quad (3)$$

В случае *b* равенство (2) должно быть заменено на два следующих соотношения:

$$\frac{1}{\omega C_d} = Z_0 \operatorname{tg} \frac{\omega \cdot l_d}{c} \quad \text{и} \quad \frac{1}{\omega C_v} = Z_0 \operatorname{tg} \frac{\omega l_v}{c}, \quad (4)$$

где l_v — расстояние от переменного конденсатора до узла напряжения вдоль передающей линии, $l = l_v + l_d$ — общая длина передающей линии. С помощью (4) легко найдём, что

$$C_v = \frac{1}{Z_0 \omega \operatorname{tg} \left\{ \frac{\omega l}{c} - \operatorname{arctg} \frac{1}{Z_0 \omega l_d} \right\}}. \quad (5)$$

На рис. 2 C_v показана как функция частоты $f = \frac{\omega}{2\pi}$ для обоих случаев *a* и *b* [случаю *a* соответствует формула (3), случаю *b* — формула (5)]. Из этого рисунка видно, что изменение частоты, соответствующее данному изменению ёмкости, тем больше, чем меньше эта ёмкость. Следовательно, с этой точки зрения выгодно брать конденсатор C_v с возможно меньшей ёмкостью (желательно, чтобы было $C_v < C_d$).

Однако оказывается, что напряжение, возникающее на переменном конденсаторе, приблизительно может быть выражено следующей формулой:

$$V_v = V_d \frac{C_d}{C_v}, \quad (6)$$

где V_d — напряжение на дуантах, V_v не должно быть очень велико из-за соображений, связанных с изоляцией. Таким образом с этой точки зрения, в противоречие к предыдущему, желательно, чтобы C_v было больше C_d .

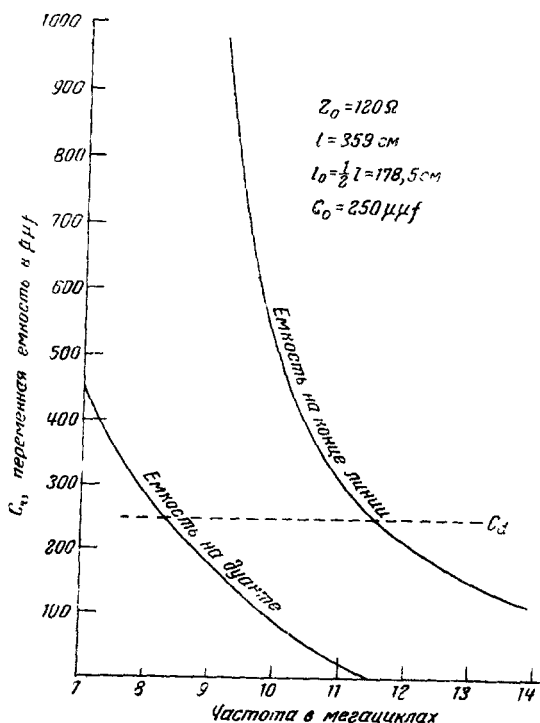


Рис. 2. Зависимость частоты от ёмкости переменного конденсатора. Верхняя кривая — в случае включения конденсатора на конце полуволновой линии. Нижняя — в случае непосредственного приключения к дуантам.

В качестве компромисса Шмидт выбрал $C_{v\text{max}} = C_d$, т. е. максимальное напряжение на конденсаторе равно напряжению на дуантах. С помощью (5) можно показать, что в этом случае узел находится на середине линии ($l_v = l_d$ при $C_v = C_d$).

Из рис. 2 легко усмотреть, что конденсатор, присоединённый непосредственно к дуанту, действует более эффективно. Кроме того, $V_v = V_d$ всё время. Однако конденсатор, помещённый на конце полуволновой линии, обладает тем преимуществом, что он может быть помещён в отдельную вакуумную систему. Кроме того, он будет находиться вне магнитного поля.

Способ включения *c*, как показывает несложный расчёт, является менее выгодным, чем случай *b*. Например, для того чтобы изменить частоту на

15%, необходимо: для системы *a*: $\frac{C_{v\max}}{C_{v\min}} = 1,64$, системы *b*: $\frac{C_{v\max}}{C_{v\min}} =$
 $= 1,96$, системы *c*: $\frac{C_{v\max}}{C_{v\min}} = 2,32$.

Формулы (4) и (5), как указывает Шмидт, не точны, так как в них считается, что ёмкость дуантов сосредоточенная; поэтому для точного определения зависимости частоты от C_v на моделях можно непосредственно

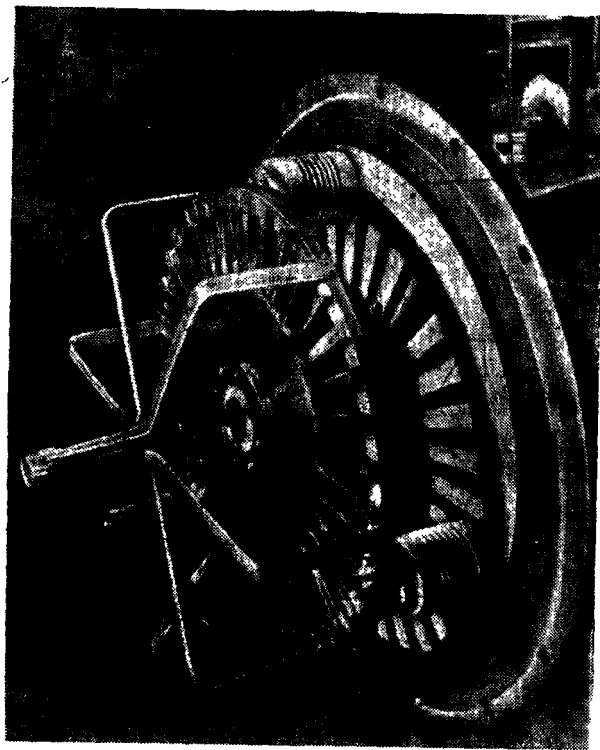


Рис. 3. Фотография ротора и статора.

измерять значение I_v в зависимости от C_v , вместо того чтобы математически определять I_v с помощью второго уравнения (4). Тогда второе уравнение (4) даст точное значение частоты в зависимости от C_v и I_v . Ниже даётся краткое описание переменного конденсатора, использованного для 37-дюймового циклотрона.

Конденсатор состоит из подвижного диска, вращающегося между двумя неподвижными. Каждый диск по окружности имеет лопасти. Когда лопасти вращающегося диска оказываются против лопастей неподвижного, ёмкость между ними наибольшая. Неподвижные диски соединены между собой и

образуют одну обкладку конденсатора; вращающийся между ними диск — другую обкладку: меняя форму лопастей, можно изменить зависимость ёмкости, а следовательно, и частоты от времени.

Описываемый конденсатор имеет 36 лопастей по окружности. Для прочности весь ротор вместе с лопастями изготовлен из одного куска стали.

Каждая лопасть имеет форму прямоугольника, длина которого $3\frac{1}{2}$ дюйма, ширина $\frac{3}{4}$ дюйма. Эффективная длина (т. е. покрытая лопастями статора)* равна 2 дюймам.

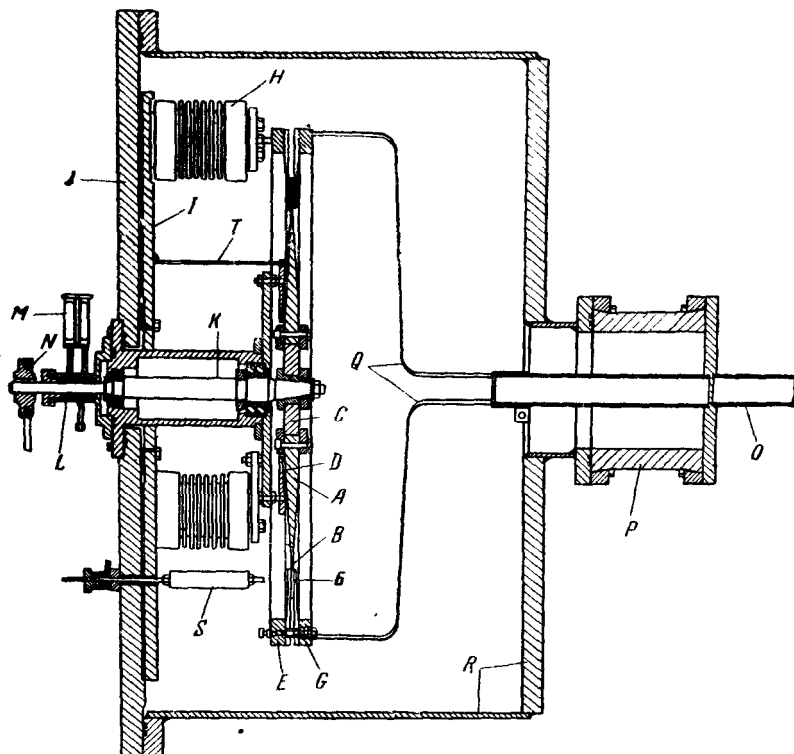


Рис. 4. Схема конденсатора:

A — ротор; B — лопасти ротора; C — цирконо-фарфоровый изолятор; D — соединительный конденсатор; E — кольцо статора; F — лопасти статора; G — регулируемое кольцо статора; H — изоляторы, держащие кольцо статора; I — поддерживающая изоляционная пластинка; J — передняя стенка; K — ось и подшипники; L — „шевроп“—вакуумное уплотнение; M — указатели уровня масла; N — приводной шкив; O — ввод связывающей линии; P — полый цирконо-фарфоровый изолятор; Q — медные ленты; R — вакуумный ящик; S — ось и изолятор для регулировки кольца статора.

Легко видеть, что если лопасть ротора прямоугольная, то производная от кривой, изображающей зависимость ёмкости от времени, есть требуемая форма края лопасти статора, ибо ёмкость есть линейная функция от площади лопастей ротора, перекрываемой лопастями статора.

Диаметр ротора до конца лопастей 27 дюймов. Он может делать до 3200 оборотов в минуту. Толщина ротора в центре равна 1 дюйму и доходит до $\frac{1}{8}$ дюйма у края лопастей.

Ротор укреплен на фарфоровом изоляторе, который представляет собой диск диаметром в 6 дюймов и толщиной 1 дюйм. Этот диск предохраняет от утечки высокочастотного тока на ось и подшипники. Высоко-частотный ток отводится к земле через соединительный конденсатор, одной обкладкой которого является поверхность диска ротора. Другой обкладкой, присоединенной к земле, служит специальный неподвижный диск без лопастей, помещенный рядом с ротором.

Соединительная емкость в 10 раз больше емкости всех пластин.

Наружный диаметр статора 38 дюйма. Диски статора крепятся на изоляторах из цирконового фарфора. Один из них может быть повернут на небольшой угол. Этим самым регулируется частотно-временная характеристика. Статор присоединяется к внутреннему проводнику коаксиальной линии медными лентами.

Вся система находится в вакууме и приводится во вращение мотором в $1/3$ л. с. Вращающий шкив расположен вне вакуума. Несмотря на то что ось конденсатора проходит сквозь стенку камеры, внутри последней поддерживается вакуум $5 \cdot 10^{-5}$ мм в течение многих часов работы. Это удалось достичь с помощью применения специальных подшипников и уплотнений.

При напряжении 15 kV через конденсатор проходил ток порядка 175–200 А. При этом не было сильного нагревания дисков, несмотря на отсутствие водяного охлаждения.

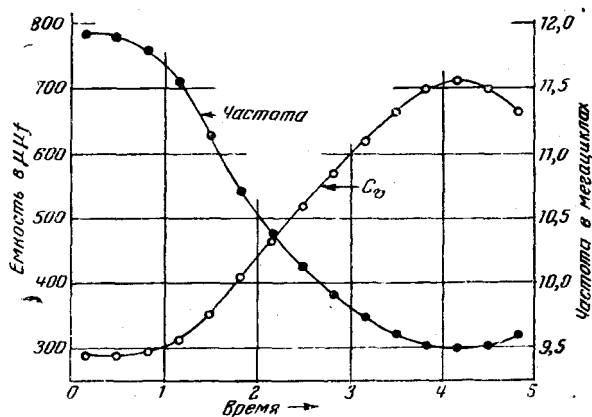


Рис. 5. Зависимость емкости и частоты от времени.

Полученная зависимость частоты от времени изображена на рис. 5. На этом рисунке приводится также и зависимость емкости от времени. Обе кривые сняты при расстоянии между ротором и статором 0,04 дюйма. Измерения проводились статически. Основные результаты сведены в таблицу.

Ширина зазора между пласти- нами (в дюймах)	$C_v \min$	$C_v \max$	$C_v \max$	Частота в мегагик- лах в сек.		Δf в % от $f_{\max}$
	μF	μF	$C_v \min$	$f_{\max}$	$f_{\min}$	
0,060	290	592	2,04	11,98	9,93	17,0
0,040	290	714	2,46	11,92	9,50	20,3

В первом случае при 5000 оборотов в минуту частота изменялась на 13% за 162 микросек., а во втором за 106 микросек. Была достигнута скорость 3200 оборотов в минуту, что соответствует 1900 циклам модуляции в секунду. При таком режиме конденсатор мог работать несколько часов непрерывно.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОТРОНА НА 37-ДЮЙМОВОМ ЦИКЛОТРОНЕ

Для проверки принципа «автофазировки» был выбран 37-дюймовый циклотрон в Беркли. Так как величина магнитного поля не позволяла получить дейтоны с энергией, большей чем 7 MeV, и, следовательно, масса частиц практически не изменялась, было решено с помощью шиммирования уменьшить поле к краю магнита на 13%, тем самым искусственно создав условия, возникающие на большом 184-дюймовом циклотроне. Действительно,

при 200 MeV для дейтона $\frac{\Delta m}{m_0} =$

$= 10,7\%$. 2,3% оставалось на возможный спад магнитного поля к краю магнита в большой машине. Без модуляции частоты на таком «испорченном» циклотроне можно было получить всего 0,5 MeV (по теории Розе ³).

С помощью модуляции частоты по способу, описанному в предыдущем разделе, 600 циклов в секунду и 3 kV на единственном дуанте, был получен средний ионный ток 0,2 μA с энергией дейтонов 7 MeV. Время ускорения

было 500 микросек., что соответствует 5000 оборотов дейтона. Конденсатор вращался со скоростью 1000 оборотов в минуту. На рис. 6 показан ток в микроамперах как функция частоты модуляции. Сплошная кривая рассчитана теоретически, кружки — экспериментальные значения.

При отсутствии модуляции на радиусе 2,5 дюйма интенсивность тока равнялась 22 μA . Это показывает, что эффективность фазотрона по выходу ускоренных частиц по сравнению с циклотроном составляет 1% в согласии с теорией. На рис. 7 показан ток как функция радиуса.

Было обращено внимание на то, что 1) интенсивность повышается в 10 раз при переходе от напряжения в 2 kV к 3 kV, в то время как теория предсказывает повышение в $\sqrt{\frac{3}{2}}$ раз, 2) интенсивность повышается в 10 раз, если дуантная система не заземлена, а находится под постоянным потенциалом 1500 V.

Авторы считают, что это обстоятельство связано с повышением эффективности источника ионов. Постоянное поле служит очистителем от остаточных ионов. В отсутствии такого поля остаточная ионизация при малых напряжениях так нагружает осциллятор, как будто мешает возрастанию разности потенциалов на дуанте. В большой машине по этой причине было решено окружить дуант заземлённой защитой, чтобы уменьшить доступный объём для дугового разряда.

Амплитуда энергии проверялась путём возбуждения радиоактивности в меди с временем жизни 12,8 часа. Одновременно с определением тока из-

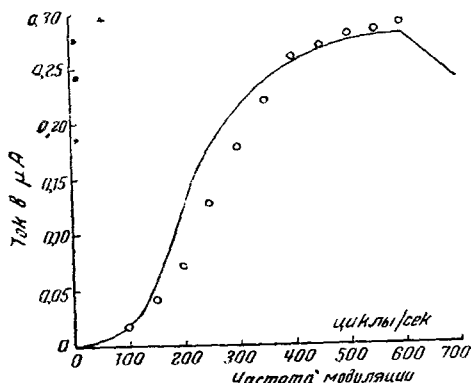


Рис. 6. Ток пучка ионов на радиусе 17 дюймов в 37-дюймовом циклотроне как функция скорости модуляции.

мерялось излучение из циклотрона в ионизационной камере, помещённой в 6 футов от машины. Излучение из циклотрона было строго пропорционально среднему току.

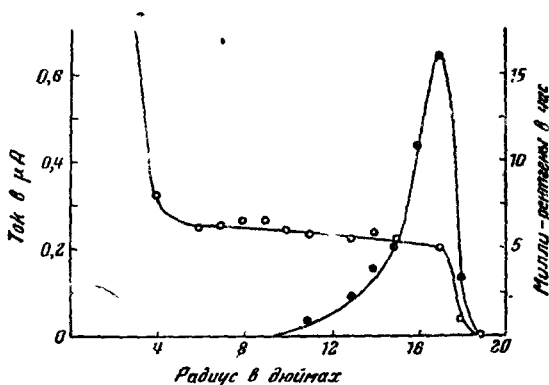


Рис. 7. Ток пучка ионов как функция радиуса в 37-дюймовом циклотроне.

Успех этих опытов, как указано в излагаемой работе, привёл к решению переоборудовать 184-дюймовый циклотрон в фазотрон. В настоящее время 37-дюймовый циклотрон работает на принципе фазотрона и используется для получения протонов с энергией 15 MeV.

ПЕРВОЕ СООБЩЕНИЕ О РАБОТЕ 184-ДЮЙМОВОГО ЦИКЛОТРОНА

Циклотрон впервые заработал в ноябре 1946 г.¹⁰

Основные его данные следующие:

Магнитное поле циклотрона спадало от центра к краю почти линейно и на радиусе 80 дюймов составляло 95,4% от поля в центре. Подходящий вид поля осуществлялся с помощью шимм, помещённых внутри вакуумной камеры. Размеры шимм определялись эмпирически, путём измерений на масштабной модели. Для ускорения дейтронов до 200 MeV требовалось изменить частоту на $11 \pm 5\% = 16\%$. На практике оказалось желательным провести значительно большее изменение частоты, чтобы иметь возможность уверенно получить в области 16% удовлетворительный вид кривой частота—время.

Частотная модуляция осуществлялась вращающимся механическим вакуумным конденсатором, подобным в принципе описанному выше. Модуляция частоты достигала 2000 циклов в секунду. Единственный дуант и конденсатор монтируются, как и раньше, на каком-либо конце экранированной линии, образующей резонансную систему, частота которой меняется между 12,6 и 9 мегациклами. Система возбуждается посредством генератора с самовозбуждением, с заземлённой сеткой, индуктивно связанной с резонансной цепью. Подводимая мощность 18 kW (вместо 250 kW в первом проекте Лоуренса⁴). Амплитуда напряжения на дуантах (усреднённая по модуляционному циклу) равнялась 15 kV. В центре магнитное поле имеет напряжённость 15 000 гаусс. Магнитный зазор—19 дюймов, из которого для ионов доступно 5 дюймов. При обычных условиях работы модуляция частоты равнялась 120 циклам в секунду. Но уже при 8 kV на дуантах и при соответствующей наивыгоднейшей скорости модуляции 48 циклов в секунду.

ду (что соответствовало 120 оборотам конденсатора в минуту) были получены удовлетворительные результаты.

Мишень помещалась на радиусе 80 дюймов. При нормальных условиях работы ион затрачивал 1000 микросек. на путь от инжектора до мишени, совершая примерно 10 000 оборотов. На радиусе 20 дюймов был измерен с помощью пробной мишени средний ток в 0,6 μ A. Этот ток остаётся постоянным до радиуса 42 дюйма, что соответствует 52 MeV. От этой точки измеренный ток быстро уменьшается, на радиусе 81 дюйм едва измерим ($\sim 2 \cdot 10^{-10}$ A) и равен нулю около 82 дюймов. Во время уменьшения тока в пробной мишени нейтронная радиация возрастает и резко спадает до нуля в окрестности 82 дюйма. Авторы считают, что это уменьшение тока является кажущимся и объясняется проникновением пучка через пробную мишень, суживающуюся к концу.

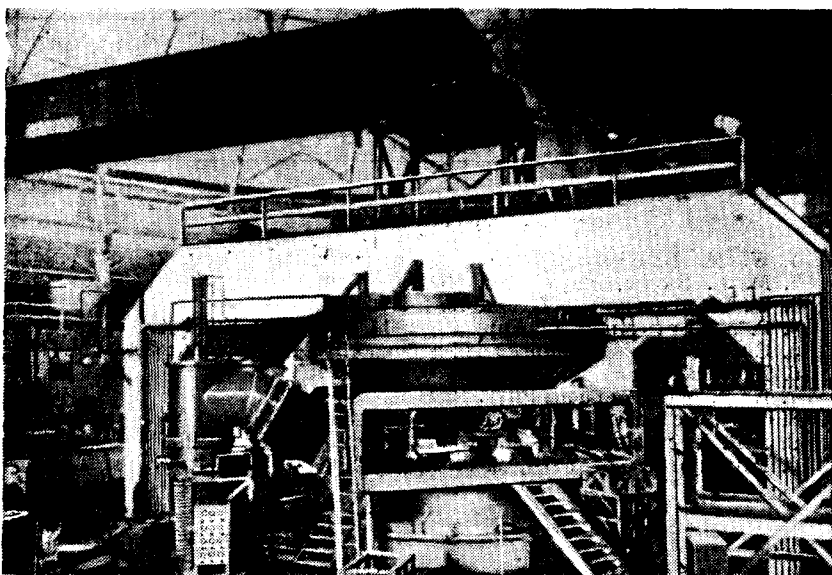


Рис. 8. Фотография 184-дюймового циклотрона во время строительства.

Непосредственное измерение нейтронного излучения и радиоактивности дуанта и пробной мишени показывает, что за 82 дюйма пучок теряется из-за вертикального расположения. До настоящего времени все измерения точно совпадали с теорией.

В ближайшее время, как указывают авторы, не предполагается сделать попытки увеличения тока ионов и выпуска пучка из магнитного поля.

Были проведены эксперименты с ускорением α -частиц до энергии 400 MeV. Выход ионного тока — примерно того же порядка, что и у дейтронов. Но пока ещё сделано слишком мало экспериментов с α -частицами, чтобы провести сравнение с теорией.

Измерения нейтронного излучения, испускаемого из мишени как с помощью ионизационных камер, так и с использованием радиоактивного детектора, чувствительного к быстрым нейтронам, показывают, что большая часть излучения испускается вперёд в конусе с углом 11° . Конус определён так, что на его поверхности интенсивность уменьшается в 2 раза.

Расщепления ядер под действием нейтронной и дейтронной бомбардировки наблюдаются с помощью радиохимических исследований и с помощью измерения многочисленных «звёзд» в камере Вильсона и в фотографической эмульсии. Предварительная оценка нейтронной энергии с помощью измерения треков протонов отдачи в камере Вильсона с магнитным полем 10 000 гаусс указывает, что распределение нейтронов по энергиям простирается примерно до 100 MeV.

Авторы сообщают, что эти и другие эксперименты будут опубликовываться по мере их завершения.

В заключение приведём таблицу, характеризующую преимущество метода модуляции частоты.

	Проект Лауренса ⁴	Данные фазотрона ¹
Высота вакуумной камеры	1 м	0,5 м
Мощность высокочастотной части	2500 kW	18 kW
Напряжение на дуантах	$1\div 2 \cdot 10^3$ kV	15 kV
Энергия дейтронов	50—100 MeV	200 MeV

М. Рабинович

ЛИТЕРАТУРА

1. W. M. Brobeck, E. O. Lawrence, Phys. Rev. 71, 449 (1947).
2. M. E. Rose, Phys. Rev. 53, 392, (1938).
3. W. B. Mann, The Cyclotron, 2-е изд. (1944).
4. P. Morrison, J. of Appl. Phys. 11, 339, 1940, УФН XXIV, 529 (1940).
5. Смит, Атомная энергия для военных целей, Гострансиздат, М. (1946).
6. В. И. Векслер, J. of Phys. 9, 153 (1945).
7. E. M. McMillan, Phys. Rev. 68, 143 (1945).
8. F. H. Schmidt, Rev. Sci. Instr. 17, 301 (1946).
9. J. R. Richardson et al. Phys. Rev. 69, 669 (1946).
10. Philip Morrison, J. of Appl. Phys. 18, 133 (1947).

НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ С ПОМОЩЬЮ РАДАРОВ

В начале 30-х годов при ионосферных исследованиях и исследованиях распространения радиоволн изредка отмечались кратковременные радиоэхо. Они возникали на высоте около 100 км, т. е. в районе слоя E. Эти эхо наблюдались и днём и ночью и потому они не могли быть связаны с ультрафиолетовой радиацией Солнца. Скеллет и другие исследователи приписывали их метеорной ионизации, но это предположение долгое время оставалось недоказанным.

В ноябре 1940 г. Пирс ¹ с помощью ионосферной станции установил, что отражения возникали после пролёта ярких метеоров, наблюдавшихся визуально. В дальнейшем изучение кратковременных эхо стало проводиться с помощью радиолокационной аппаратуры. Они видны на экране катодного осциллоскопа дальности в виде «всплесков» длительностью от долей секунды до нескольких десятков секунд. Их амплитуда иногда в 10—20 раз превосходит амплитуду «шумов».

В Англии изучение кратковременных эхо проводилось Эппльтоном, Экерслеєм и другими исследователями. С января 1944 г. на Исследователь-