

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 спада 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:

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

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 системы 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.

с) 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 —

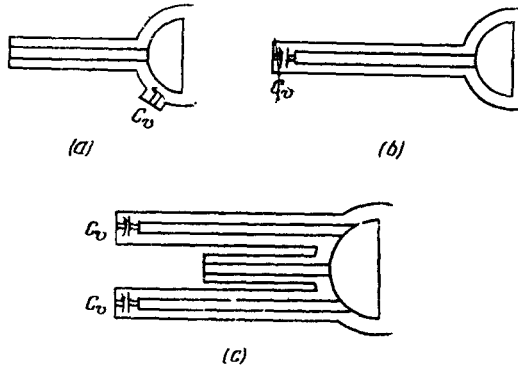


Рис. 1. Схемы включения переменного конденсатора в цепь дуанта.

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 .

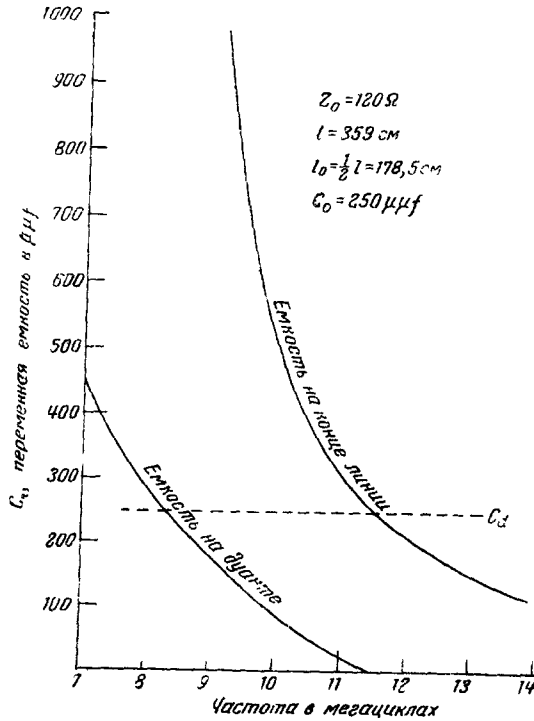


Рис. 2. Зависимость частоты от ёмкости переменного конденсатора. Верхняя кривая — в случае включения конденсатора на конце полуволновой линии. Нижняя — в случае непосредственного приключения к дуантам.

В качестве компромисса Шмидт выбрал $C_{v\max} = C_d$, 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

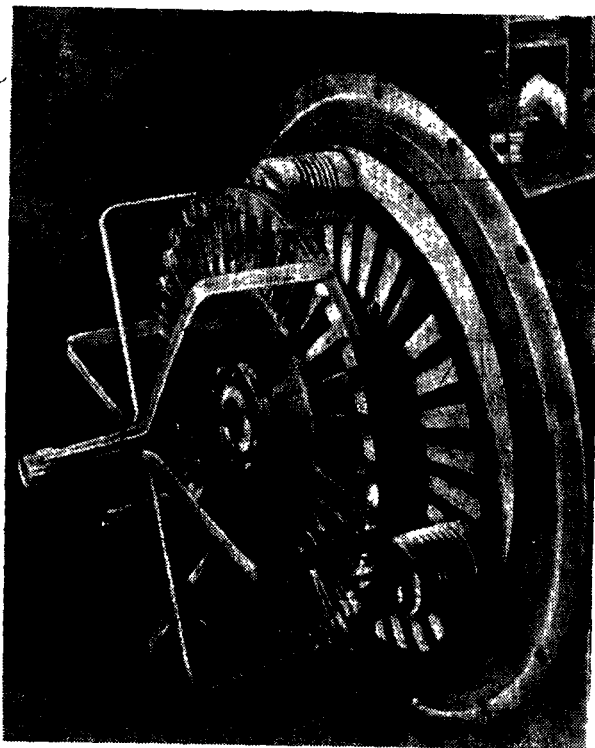


Рис. 3. Фотография ротора и статора.

измерять значение l_v в зависимости от C_v , вместо того чтобы математически определять l_v с помощью второго уравнения (4). Тогда второе уравнение (4) даст точное значение частоты в зависимости от C_v и l_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.

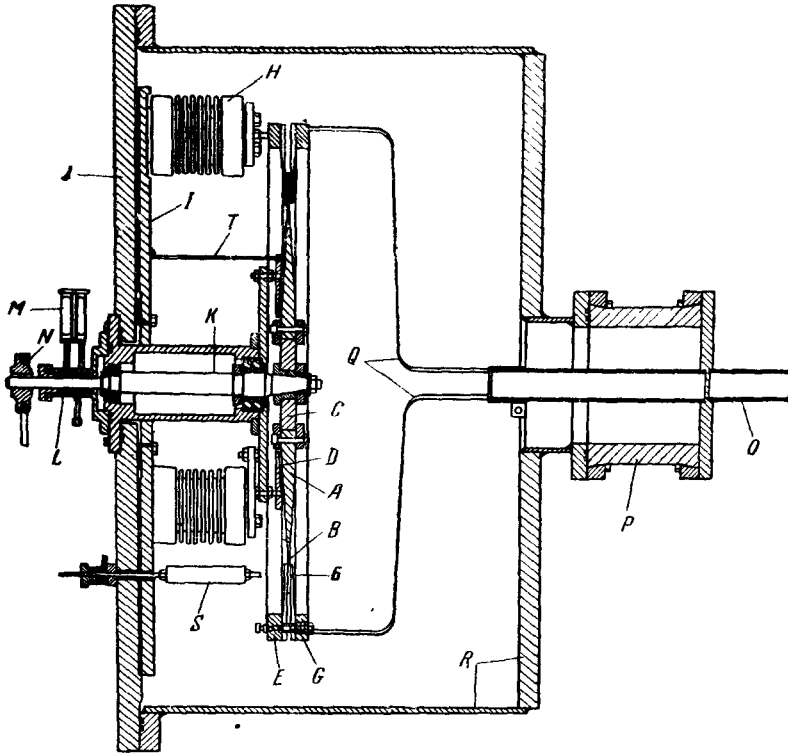


Рис. 4. Схема конденсатора:

A — ротор; B — лопасти ротора; C — цирконо-фарфоровый изолятор; D — соединительный конденсатор; E — кольцо статора; F — лопасти статора; G — регулируемое кольцо статора; H — изоляторы, держащее кольцо статора; I — поддерживающая изоляционная пластинка; J — передняя стенка; K — ось и подшипники; L — „шеврон“—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 крап 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 ёмкость в 10 раз больше ёмкости всех пластин.

Наружный диаметр статора 33 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.

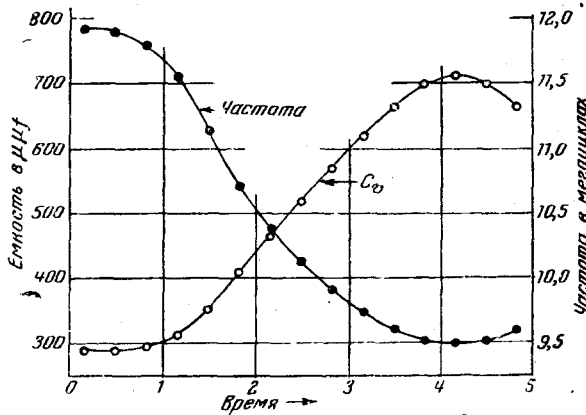


Рис. 5. Зависимость ёмкости и частоты от времени.

Полученная зависимость частоты от времени изображена на рис. 5. На этом рисунке приводятся также и зависимость ёмкости 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 пластинами (в дюймах)	C_v min μF	C_v max μF	C_v max C_v min	Частота в мегагц-лах в сек.		Δf в % от f_{max}
				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 1000 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% оставлялось 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 ²).

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 мкА с энергией дейтонов 7MeV. 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 мкА. 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-

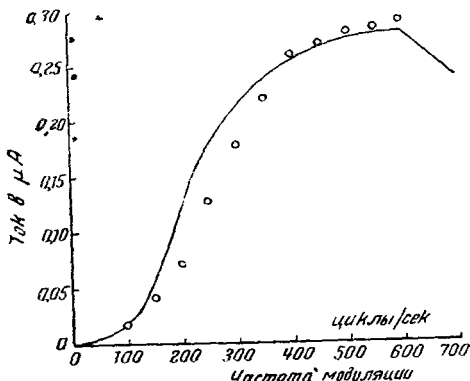


Рис. 6. Ток пучка ионов на радиусе 17 дюймов в 37-дюймовом циклотроне как функция скорости модуляции.

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

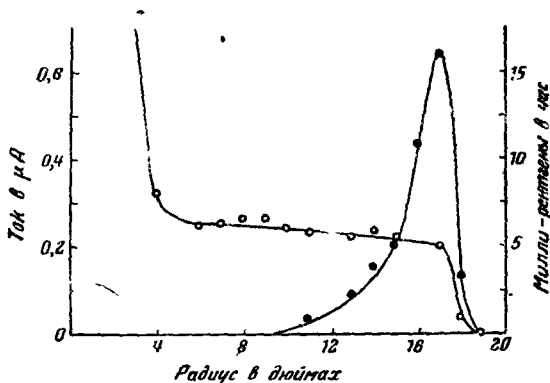


Рис. 7. Ток пучка ионов как функция радиуса в 37-дюймовом циклотроне.

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 MeV¹.

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 15000 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 наилучшей 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.

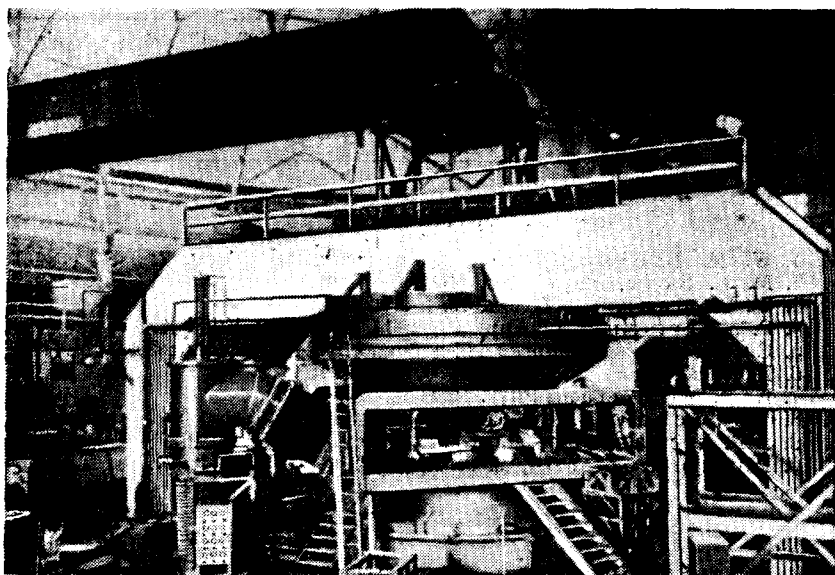


Рис. 8. Фотография 184-дюймового циклотрона во время строительства.

Непосредственное измерение нейтронного излучения и радиоактивности дуанта и пробной мишени показывает, что за 82 дюйма пучок терется 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	1-2 · 10 ⁸ 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 Эпплтоном, Эккерслеем и другими исследователями. С января 1944 г. на Исследователь-

ской станции в Слоу начались непрерывные наблюдения этих эхо с целью изучения суточной и годичной вариаций.

С октября 1944 г. Хей и Стюарт начали систематические исследования кратковременных эхо с помощью радаров, применявшихся во время войны для наблюдения за ракетами V-2. Эти радары имеют длину волны 4—5 м и пиковую мощность 1:0 kW. С их помощью наблюдается в среднем 10 эхо в час. Предварительные результаты этих исследований, подтвердивших метеорную природу эхо, были опубликованы в октябре 1946 г. ².

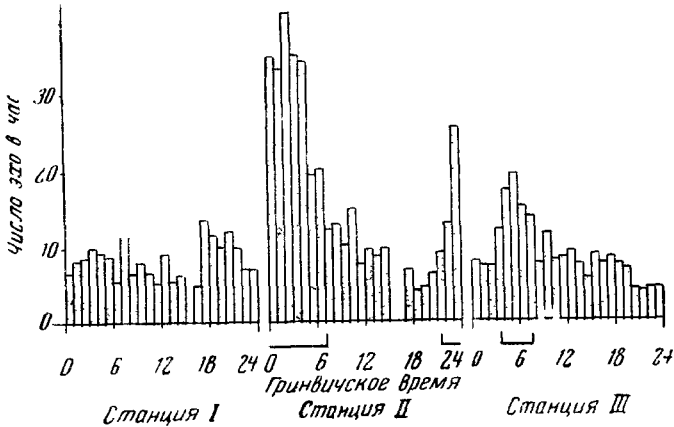


Рис. 1.

Ночные наблюдения с радиолучом, направленным вертикально вверх, показали, что все метеоры, замечавшиеся визуально вблизи зенита, сопровождались радиоотражением. Однако наблюдалось в несколько раз больше эхо, не совпадавших с видимыми метеорами и, очевидно, вызывавшихся телескопическими метеорами. При систематических ежедневных наблюдениях в течение длительных сроков часовые числа эхо дали заметные максимумы в дни активных метеорных потоков, что явилось подтверждением их метеорной природы.

Другой, гораздо более интересной проверкой метеорной гипотезы явились одновременные наблюдения метеорного потока δ Акварид на станциях с наклонными радиолучами, направленными по разным азимутам. Для каждой станции получалась своя кривая часовых чисел (рис. 1). На станции I кривая не имеет ясно выраженного максимума, а у станций II и III моменты и величина максимумов получились различными. Этот результат объясняется следующим: ионные облака, создаваемые метеорами, имеют форму длинных колонн. Естественно считать, что наилучшие условия получения эхо бывают тогда, когда колонна облучается перпендикулярно к её длине. Полагая, что это условие выполнялось в то время, когда на данной станции наблюдался максимум, можно было вычислить зону на небесной сфере, где мог находиться метеорный радиант (рис. 2). Зоны, найденные для двух станций, пересекались, и следовало ожидать, что радиант находится близ середины перекрывающейся части (R). Экваториальные координаты точки R: $\alpha = 345^\circ$, $\delta = 10^\circ$, тогда как метеорный радиант имеет координаты $\alpha = 340^\circ$, $\delta = -17^\circ$. Направление радиолуча станции I в течение круглых суток было неблагоприятно для наблюдений метеоров погоды Акварид, и потому максимум отсутствовал. Немногочисленные эхо, наблюдающиеся при любом направлении луча, обусловлены метеорным фоном.

Во время метеорного дождя Драконид в ночь с 9 на 10 октября 1946 г. в Англии были проведены наблюдения на нескольких радарных установках. Эпплтон и Нэсмит³ наблюдали на частоте 27 *мгц/сек.* Специальная антенна излучала, главным образом, вертикально вверх. Импульсы были длительностью в 15 микросек. и частотой 50 в сек. Лента фотобумаги равномерно двигалась перед экраном катодного осциллоскопа перпендикулярно к развёртке дальностей и на ней регистрировалась дальность и длительность эхо (рис. 3). Наблюдения позволили построить кривую численности метеоров во время дождя Драконид.

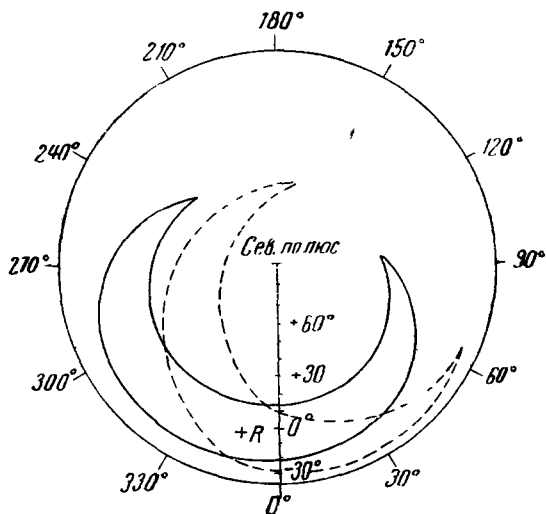


Рис. 2.

На заседании Royal Astronomical Society 13 декабря 1946 г. д-р А. Ловел и Хей доложили о результатах своих наблюдений⁴. А. Ловел проводил наблюдения на частоте 72 *мгц/сек.* Передатчик излучал в секунду 150 импульсов длительностью в 8 микросек. с пиковой мощностью 150 *кВт.* Специальный приёмник давал легко различимый сигнал при проходящей мощности в 10^{-14} *Вт.* Радиолуч мог быть повернут в любом направлении. Эхо наблюдались визуально на экране катодного осциллоскопа. Во время максимума метеорного дождя был снят кинофильм.

С антенной, направленной под углом 90° к радианту, было проведено непрерывное наблюдение в течение 71 часа с 8 до 11/Х. Весь период активности потока был заключён между 0 ч. 00 м. и 6 ч. 00 м. 10/Х. В начале этого интервала число кратковременных эхо составляло 0,03 в минуту (нормальная частота для данной установки в период отсутствия метеорных потоков). Число эхо быстро возрастало и в 3 ч. 40 м. достигало 168 в минуту (увеличение в 5000 раз). Пик активности был чрезвычайно коротким — через пять минут число эхо упало до 50 в минуту.

Теория, разрабатываемая Херлофсоном (Herlofson), показала, что для радиолуча, направленного под прямым углом к метеорному следу, сила полученного эхо даёт формулой

$$\epsilon = 8,88 \cdot 10^{-28} \frac{\sigma^2 \lambda^2}{R^3} P_0 G \text{ ватт,}$$

где α — число электронов, созданных метеором на 1 см пути, R — дальность эхо в см, P_0 — пиковая мощность передатчика в ваттах, λ — длина волны в см, G — коэффициент направленности приемной и передающей антенн. По кинофильму, снятому в период максимума, были измерены α и R и по ним вычислено α . При данной скорости α пропорционально размерам метеора.

В начале действия потока было отмечено 21 совпадение с визуально наблюдавшимися метеорами. Из эхо, длившихся более 0,5 сек., 50% совпадали с видимыми метеорами. (Такой же результат был получен ранее для Персеид.)

Доклад Хея был посвящён определению скоростей метеоров. Усовершенствование аппаратуры, в частности улучшение фоторегистрации, позволило изучать тонкую структуру эхо. Разрешающая способность была уве-



Рис. 3.

личина путём развёртки полосы дальностей от 80 до 115 км на всю ширину катодной трубки.

На ленте сперва получается слабый след, связанный с приближающимся метеором и обусловленный ионизацией в непосредственном соседстве с ним самим. Затем приходит главное эхо от ионизованной колонны на минимальном расстоянии. У начального слабого следа получается изменение дальности со временем, соответствующее телу, движущемуся прямолинейно с постоянной скоростью. Последняя может быть найдена путём промеров 3 точек на каждом следе. Это было сделано для 22 метеоров, и средняя скорость получилась 22,9 км/сек с дисперсией 1,3 км/сек. Скорость вне атмосферы, вычисленная из астрономических данных, — 23,7 км/сек. Некоторые следы показывают торможение к концу пути.

Присутствовавший на заседании Э. Эппльтон выразил свой восторг от работы Хея и назвал её «делающей эпоху». Далее он сказал:

«Когда война в Европе окончилась, в нашей стране было много радарных установок и штатов операторов, для которых больше не оказалось работы. Меня спросили, не могу ли я указать, чем их стоит занять, и я предложил наблюдать спорадические метеоры. В результате мы имеем огромное количество материалов со всей страны с круглосуточными наблюдениями в течение целого года. Это — уникальный материал и притом такой, который едва ли будет когда-либо повторён, если учесть количество затраченных людских сил.

Мы ещё не имеем результатов этой работы, но Несмит и я, при наших исследованиях ионосферы, пришли к заключению, что ночная ионизация поддерживается спорадическими метеорами».

Эппльтон отметил, что радионаблюдения показали заметный максимум метеоров в полдень и сезонный максимум летом. Возможно, это связано с тем, что при наличии ионизаций, созданной солнечным излучением, более слабые метеоры начинают давать радиоэхо.

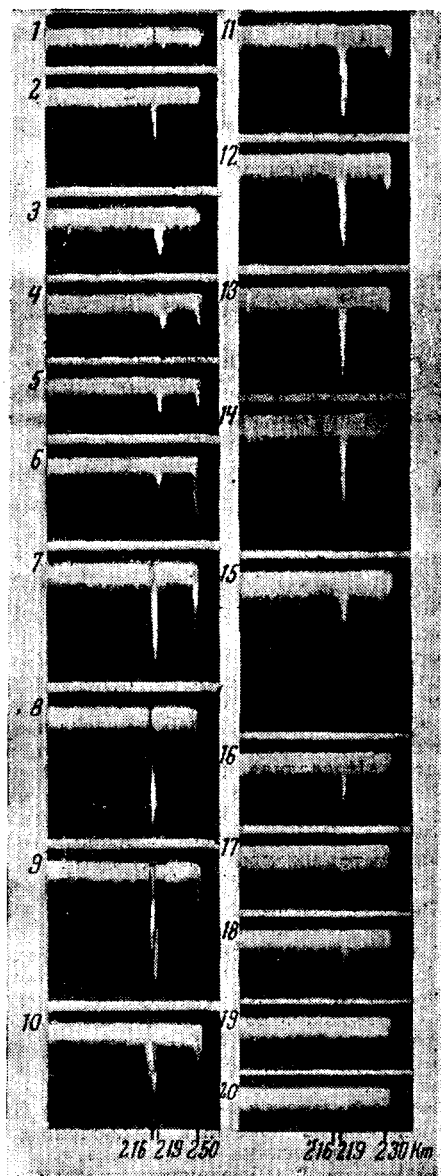


Рис. 4.

Ловел и Хей отметили, что хотя наблюдения не анализировались с точки зрения атмосферных ветров, но скорости дрейфа до 200 км/час, отмеченные визуальными наблюдателями метеоров, несомненно существуют. Одно эхо длительностью в 95 сек. дало скорость дрейфа 600 км/час.

В США наблюдения метеоров с помощью радаров проводились в значительно меньшем масштабе, чем в Англии. При участии Обсерватории Принстонского университета во время метеорного дождя Драконид были проведены наблюдения на 21 военной радарной установке⁵. Применялись волны от 3 м до 3 см, но положительные результаты были получены только на 3-метровых волнах (радар типа SCR-270). Частоты микроволновых радаров превосходят критические частоты ионных облаков, создаваемых метеорами.

Наблюдения велись на осциллокопе дальностей. В течение 23 минут проводилась киносъемка изображения на экране с частотой 1 кадр в секунду. Несколько десятков отражений длились более 1 сек. (до 27 сек.) и потому они вышли на ряде кадров (рис. 4). Согласно предварительному анализу, эффективная площадь следов достаточной длительности доставляет от 50 до 4000 м².

Изложенные выше результаты показывают, как велики наблюдательные возможности, которые открывает перед исследователями метеоров, применение радиолокационной аппаратуры.

Б. Ю. Левин

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. A. Pierce, Phys. Rev. 59, 625 — 626 (1941).
 2. Y. S. Hey and G. S. Stewart, Nature 158, 481 — 482 (1946).
 3. E. Appleton and R. Naismith, Nature 158, 936 — 937 (1946).
 4. The Observatory 67, 3 — 8 (1947).
 5. J. Q. Stewart, M. Ference, J. J. Slattery, H. A. Zahl Sky and Telescope, VI, 3 — 5 (1947).
-