

Тормозное излучение электронов при больших энергиях имеет узко направленный характер и испускается преимущественно по направлению движения электронов (в пределах угла  $2^\circ$  при энергиях  $100 \text{ Мэв}$ ). Оно становится видимым при энергии в несколько десятков мегаэлектронвольт.

### § 105. Синхротроны и синхрофазотроны

В связи с ограничением возможной мощности бетатрона, которое создается излучением электронов, более перспективным является аппарат, совмещающий принцип действия бетатрона с принципом действия циклотрона или, точнее, фазотрона (§ 103). Такие аппараты для ускорения электронов называют *синхротронами*, а аналогичные аппараты для ускорения ионов *синхрофазотронами*.

В начале каждого цикла синхротрон ускоряет электроны по принципу бетатрона, т. е. электрическим полем, которое индуцируется изменяющимся магнитным потоком. Но менее чем через тысячную долю секунды, когда электроны уже успевают набрать энергию порядка  $2 \text{ Мэв}$  и скорость их становится близкой к скорости света, бетатронный режим работы автоматически заменяется режимом ускорения электронов электрическим полем, которое создается высокочастотным генератором.

Ускорительная камера синхротрона имеет такую же тороидальную форму, как у бетатрона, и в ней, так же как и в камере бетатрона, поддерживается высокий вакуум. Камера эта помещена между кольцевыми полюсными наконечниками электромагнита (рис. 388), имеющими ширину порядка  $10 \text{ см}$ . Электромагнит, как и у бетатрона, питается переменным током. Внутри камеры имеются два близко расположенных друг к другу электрода, к которым подводится напряжение от высокочастотного генератора. Каждый раз (во второй части цикла), когда электроны проходят зазор между этими электродами, они ускоряются электрическим полем высокочастотного генератора.

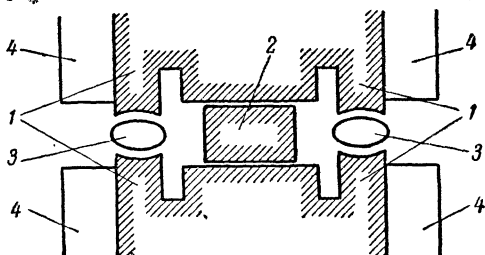


Рис. 388. Схема электромагнита синхротрона: 1 — полюсные наконечники кольцевой формы; 2 — сердечник; 3 — тороидальная ускорительная камера; 4 — обмотки электромагнита.

Но в начальной стадии ускорительного цикла коротковолновый генератор отключен от электродов. Начальный разгон электронов, поступающих в ускорительную камеру из электронной пушки (расположенной в камере синхротрона приблизительно так же, как в бетатроне), осуществляется, как уже упоминалось, электрическим

полем, которое индуцируется нарастающим магнитным потоком электромагнита.

Кольцевые полюсные наконечники, между которыми расположена ускорительная камера, делают из весьма тонких (около  $\frac{1}{3}$  мм) листов динамной стали. Чтобы обеспечить устойчивость электронной орбиты (§ 104), полюсным наконечникам придают такую форму, что напряженность поля между ними уменьшается при удалении от центра приблизительно обратно пропорционально корню квадратному из радиуса (точнее, пропорционально  $r^{-3/2}$ ).

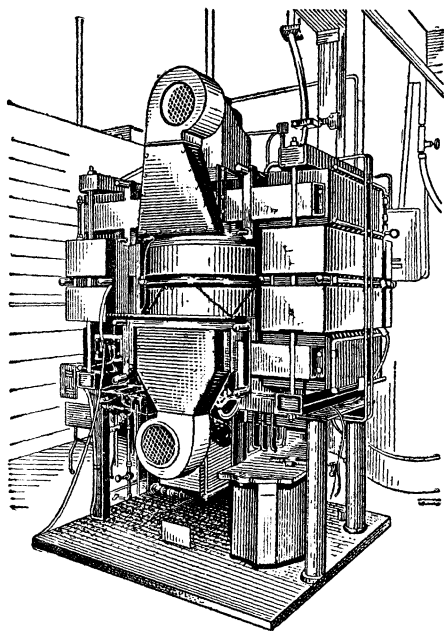


Рис. 389. Синхротрон.

сердечник электромагнита устроен так, что при намагничивании он быстро насыщается. Пока возрастает магнитный поток, проходящий через сердечник, электроны в камере ускоряются индуцированным электрическим полем. Насыщение сердечника вызывает автоматическое подключение к электродам ускорительной камеры высокочастотного генератора, и дальнейшее (основное по своей величине) ускорение электронов производится полем, которое создается этим генератором.

В этой второй циклотронной стадии ускорительного цикла обеспечивается такое увеличение со временем напряженности магнитного поля  $H$  между полюсными наконечниками, что величина  $H$

все время остается пропорциональной возрастающей со скоростью массе  $m$  ускоряемых электронов. Поэтому время, в течение которого ускоряемые электроны описывают окружность, определяемое формулой (2)  $T = \frac{2\pi c}{eH} m$ , остается постоянным. Радиус орбиты электронов, определяемый формулой (1)  $r = \frac{cm}{e} \frac{v}{H}$ , также практически остается постоянным, так как в первой бетатронной стадии ускорительного цикла электроны разгоняются до скорости, близкой к скорости света.

Таким образом, в синхротроне, в отличие от фазотрона, высокочастотный генератор работает при постоянной частоте и устранено возрастание радиуса орбиты ускоряемых частиц. Весь ускоритель-

ный цикл в синхротроне завершается меньше чем за одну четверть периода изменения тока, питающего электромагнит.

В связи с тем, что в синхротроне для ускорения электронов может быть подведена (за счет мощности, отдаваемой высокочастотным генератором) значительно большая энергия, чем в бетатроне, предельное ускорение, которое способен сообщить электронам синхротрон, намного превышает предельное ускорение бетатронов.

Теория синхротронов (в устройстве которых использованы идеи, высказанные В. М. Векслером и Мак-Миланом в 1944—1946 гг.) была детально разработана в 1946—1947 гг. Хилеем, Франком и др. Конструктивная отработка синхротронов началась в 1947 г. После испытания нескольких небольших моделей в конце того же 1947 г. был построен и устойчиво работал синхротрон, дававший электроны с энергией около 80 Мэв (рис. 389). Первые построенные в США синхротроны на 300 — 330 Мэв и в Англии на 340 Мэв работали при небольшой частоте повторения ускорительных циклов (2—6 в 1 сек). В Физическом институте АН СССР в 1949 г. был введен в эксплуатацию более совершенный синхротрон, в котором частота повторения ускорительных циклов доведена до 50 в 1 сек. Синхротрон ФИАН СССР характеризуется следующими параметрами:

Максимальная энергия электронов на мишени 280 Мэв

Количество электронов, ускоряемых в каждом цикле  $\sim 1,5 \cdot 10^9$

Радиус орбиты 82,5 см

Максимальная напряженность магнитного поля на орбите 12 000 э

Вес электромагнита 120 т

Поперечное сечение ускорительной камеры  $22,5 \times 10,0$  см<sup>2</sup>

Рабочий вакуум в ускорительной камере  $5 \cdot 10^{-6}$  мм Нг

Электроны инжектируются в ускорительную камеру синхротрона рабочим напряжением 100 кВ, импульсами длительностью 4 мксек при полном токе в импульсе 300—400 ма.

В бетатронном режиме ускорение электронов производится до энергии около 4 Мэв.

В последние годы некоторыми лабораториями были сооружены синхротроны на энергии более 1000 Мэв.

С помощью синхротрона в 1957 г. в Калифорнийском университете при облучении веществ тормозными фотонами с энергией 1080 Мэв была осуществлена реакция фоторождения гиперонов и тяжелых мезонов ( $\gamma + p \rightarrow K^+ + \Lambda^0$ ).

Успешная конструктивная отработка синхротронов позволила поставить и решить задачу создания аналогичного аппарата для ускорения ионов — синхрофазотрона. В мощных синхрофазотронах радиус стабильной орбиты ускоряемых протонов (или других ионов) имеет порядок 10 м и более. Этим определяются размеры огромного электромагнита, между полюсными наконечниками которого помещается ускорительная камера; кольцевые электромагниты синхрофазотронов весят тысячи тонн. Предварительное ускорение протонов (направляемых затем системой магнитов и электродов в камеру

синхрофазотрона) осуществляют посредством особого линейного ускорителя (§ 106); в предварительном ускорении протонам сообщается энергия в несколько мегаэлектронвольт. В первой, бетатронной стадии ускорительного цикла протоны набирают энергию в несколько десятков мегаэлектронвольт. При этом их скорость остается в несколько раз меньшей скорости света. Основное ускорение до энергии в тысячи мегаэлектронвольт производится во второй стадии цикла переменным электрическим полем высокочастотного генератора. Существенное возрастание скорости протонов в этой второй

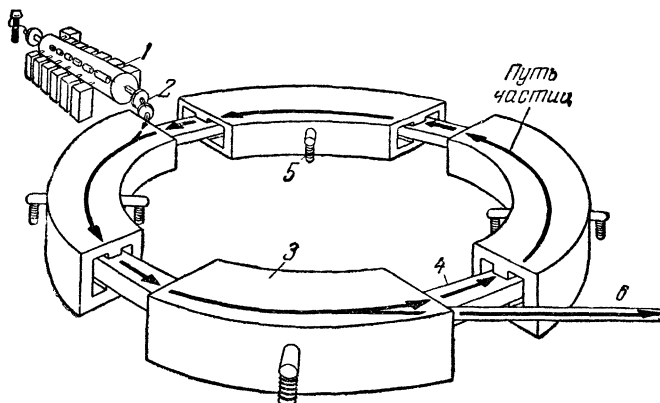


Рис. 390. Схема синхрофазотрона:

1 — предварительный линейный ускоритель; 2 — система ввода протонов в ускоритель; 3 — электромагнитные блоки; 4 — вакуумная камера; 5 — вакуумный насос; 6 — выводное устройство к мишени.

стадии (когда в синхротроне скорость электронов практически уже постоянна) значительно осложняет расчет и устройство синхрофазотрона. Частоту ускоряющего поля приходится в течение каждого ускорительного цикла плавно увеличивать.

Первый мощный синхрофазотрон был построен в 1952 г. в США (в Брукхавене); его назвали «космотрон». Он дает протоны, ускоренные до 3000 Мэв. Стоимость этого сооружения 7 млн. долларов. Кольцевая ускорительная камера брукхавенского синхрофазотрона состоит из четырех квадрантов, каждый длиной около 15 м (диаметр стабильной орбиты ускоряемых частиц 18,3 м). В поперечном сечении камера имеет размеры  $15 \times 120 \text{ см}^2$ . Вакуум в ней поддерживают 12 больших диффузионных насосов. Кольцеобразный магнит имеет поперечное сечение  $2,4 \times 2,4 \text{ м}^2$  и весит 2200 т. Мощность альтернатора 21 000 квт.

В 1957—1958 гг. в США в Брукхавенской лаборатории с помощью этого синхротрона были получены  $\pi$ -мезоны с энергией 1100 Мэв и детально изучено образование гиперонов при соударении

$\pi$ -мезонов с протонами (в реакциях  $\pi^{\mp} + p \rightarrow K^+ + \Sigma^{\mp}$  и им аналогичных).

В 1953—1954 гг. в США (в Беркли) был построен еще более мощный синхрофазотрон (названный «беватрон»). Он дает протоны, ускоренные до 6300 Мэв (20 импульсов в минуту по 100 млн. частиц в импульсе).

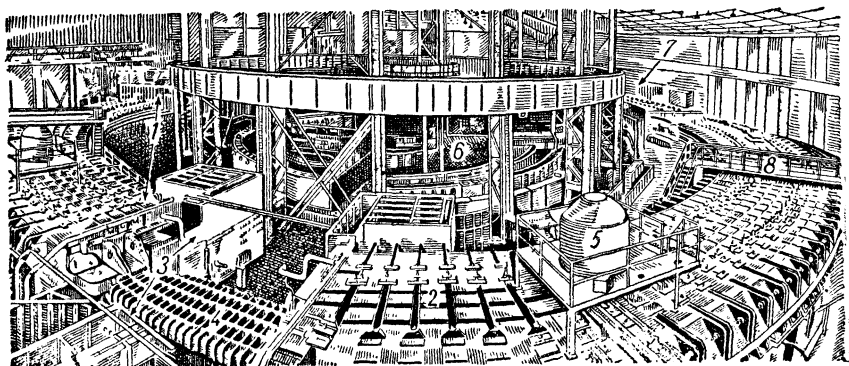


Рис. 391. Внешний вид синхрофазотрона Объединенного института ядерных исследований на 10 000 Мэв:

1 — один из четырех квадрантов электромагнита; 2 — блок электромагнита; 3 — шкаф системы высокочастотного питания электродов; 4 — коробка, внутри которой размещен ускоряющий электрод; 5 — бак с жидким азотом для обеспечения работы вакуумной системы ускорителя; 6 — шкафы и пульты системы управления контроля и сигнализации; 7 — в этой стене сделана амбразура, через которую ускоренные частицы попадают в экспериментальный зал; 8 — переходной мостик.

В 1955—1957 гг. советскими инженерами и учеными был сооружен синхрофазотрон на 10 000 Мэв, переданный правительством СССР Объединенному институту ядерных исследований (рис. 390 и 391).

Ниже приведены некоторые сведения о нем.

Радиус стабильной орбиты  $\sim 30$  м.

Наружный диаметр кольцевого электромагнита 72 м.

Общий вес кольцевого электромагнита 36 000 т.

Мощность питания электромагнита 140 000 квт (что превышает  $\frac{1}{5}$  мощности Днепрогэса).

Каждый квадрант кольцевого электромагнита собран из 12 блоков Ш-образной формы весом по 800 т.

Полусные наконечники каждого блока служат одновременно нижней и верхней крышками вакуумной камеры, и расчетное положение их фиксировано с точностью до десятых долей миллиметра.

Между квадрантами кольцевого электромагнита имеются четыре промежутка, каждый длиной по 8 м; в двух из них размещены ускоряющие электроды; в двух других системы ввода и вывода ускоряемых частиц.

Предварительное ускорение протонов осуществляется в линейном ускорителе, в который протоны выступают из ионного источника и форинжектора с энергией 0,6 Мэв и из которого выходят в камеру синхрофазотрона с энергией 9 Мэв.

В ускорительном цикле при каждом обороте по стабильной орбите протоны приобретают энергию 2,2 кэв. Ускорительный цикл продолжается 3,3 сек; за это время протоны совершают около 4 млн. оборотов по орбите и проходят путь, в 2½ раза превышающий расстояние от Земли до Луны.

Частота повторения ускорительных циклов 5 в минуту.

Частота коротковолнового генератора, создающего ускоряющее электрическое поле, в течение ускорительного цикла плавно увеличивается от 0,182 до 1,45 Мгц.

Вакуум в ускорительной камере (порядка  $10^{-6}$  мм Hg) поддерживается работой 56 мощных насосов.

Защитная бетонная стена, отделяющая лабораторию от синхрофазотрона, имеет толщину 8 м.

Синхрофазотрон обслуживают: 6000 различных реле, автоматов и контакторов; 2000 контрольно-измерительных приборов; свыше 2000 различных аппаратов управления (электрокабели, соединяющие эту аппаратуру, имеют длину около 1000 км).

Ввод в эксплуатацию синхрофазотронов привел к ряду важных открытий. В 1955 г. при опытах с протонами, ускоренными в беватроне Калифорнийского университета (в Беркли), Лоуренс, Серге и их сотрудники открыли *антипротоны* — частицы с массой протона, но заряженные отрицательно. В этих опытах было установлено, что столкновение протона, имеющего энергию 6300 Мэв, с ядром атома меди приводит к одновременному появлению протона и антипротона. Было установлено также, что антипротон устойчив в вакууме (не распадается самопроизвольно). Но когда антипротон встречается с протоном, обе частицы превращаются в мезоны. По следам в эмульсии фотопластинок были изучены десятки случаев такой «аннигиляции» протона и антипротона (точнее, их превращения в мезоны).

Опыты по облучению мишеней протонами, ускоренными в беватроне, доставили также важные сведения об условиях возникновения и распада тяжелых мезонов и гиперонов; это привело к пересмотру одного из принципов волномеханического расчета некоторых ядерных процессов (так называемого «сохранения четности»; § 111, п. 4).

Для решения многих вопросов ядерной физики энергия частиц порядка 10 000 Мэв еще не достаточна. В связи с этим в СССР проектируется сооружение синхрофазотрона на 50 000 Мэв.

Синхрофазотрон будет иметь средний диаметр электромагнита почти в полкилометра (470 м). Здание для него предполагается соорудить в форме кольца, заглубленного в землю. Чтобы уменьшить вес электромагнита (до 22 тыс. т), в этом синхрофазотроне будет осуществлена «жесткая фокусировка» пучка ускоряемых частиц магнитным полем. Электромагнит будет состоять из 120 блоков (из них: 60 — фокусирующих по вертикали, 45 — фокусирующих по горизонтали и 15 — компенсирующих). Система фокусировки позволит уменьшить поперечное сечение ускорительной камеры до  $12 \times 20$  см<sup>2</sup>.

В Австралии в 1957—1958 гг. (по идее и под руководством президента Австралийской академии наук М. Л. Олифанта) осуществлялось сооружение синхрофазотрона на 10 000 Мэв без применения железа для кольцевого электромагнита, который будет представлять собой систему проводников, обтекаемых импульсами тока в миллионы ампер.

Генерирование столь больших токов будет производиться резким затормаживанием четырех 20-тонных металлических дисков, вращающихся между полюсами магнита (который предназначался для циклотрона). Сверхмощный ток будет сниматься с подвижных дисков струями расплавленного натрия и калия. Весь генератор будет помещен в атмосферу гелия.

В Швейцарии в начале 1960 г. введен в эксплуатацию синхрофазотрон на 25 000 Мэв.

## § 106. Линейные ускорители электронов и ионов

Аппараты, в которых ускоряемые заряженные частицы движутся прямолинейно, называют *линейными ускорителями*.

Линейные ускорители применялись в ядерной физике еще до изобретения циклотрона (в 1927—1932 гг.). Их называли *ускорительными трубками*. Это были аппараты, в которых ускорение электронов и ионов производилось постоянным электрическим полем высокого напряжения (в отличие от современных линейных ускорителей, питаемых ультракоротковолновыми генераторами).

Ускорительные трубки, предназначенные на напряжение, превосходящее 300 тыс. в, приходилось устраивать в виде многокамерной системы, подразделенной на секции с таким расчетом, чтобы на соседних электродах устанавливалась разность потенциалов не более 250—300 тыс. в. Первая ускорительная разрядная трубка на высокое напряжение порядка 2 млн. в была построена в 1931 г. Ланге и Брашем. Общее представление о такого рода трубках могут дать рис. 392 и 393, где показаны внешний вид и схема электроноускорительной трубки на 3—4 млн. в, построенной в 1938 г. в Украинском физико-техническом институте К. Д. Синельниковым, А. К. Вальтером и др. Трубка имеет длину 11 м и укреплена между колоннами электростатического генератора Ван-дер-Граафа (т. II, § 10, 1959; в предыдущих изданиях § 19).

На такое же напряжение порядка 3 млн. в в 1939 г. была построена трубка в Ленинграде (она изготовлена из микалекса и имеет около 100 дискообразных промежуточных электродов).

Источниками высокого постоянного напряжения для электронных и ионных трубок обычно служит генератор Ван-дер-Граафа или же высоковольтные трансформаторы с умножением выпрямленного напряжения по схеме, представленной на рис. 394. В этой схеме несколько высоковольтных ртутных выпрямителей включены последовательно так, что через цепь, образуемую выпрямителями, заряд одного знака (на схеме — отрицательный) стекает в землю. Тогда заряд другого знака (на схеме — положительный) сосредоточивается на верхних пластинах конденсаторов, две цепочки которых подключены к обоим концам вторичной высоковольтной обмотки трансформатора. Когда нагрузка невелика, на каждом конденсаторе получается удвоенное максимальное напряжение вторичной обмотки трансформатора. При  $n$  конденсаторах в каждой ветви во внешнюю